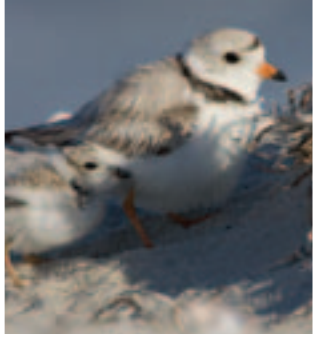
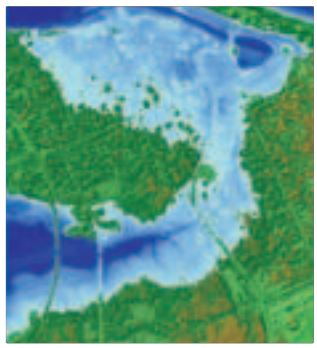
Environnement Canada Environment Canada





Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick

Octobre 06

Canada

Catalogage avant publication de Bibliothèque et Archives Canada

Vedette principale au titre : Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick.

Publ. aussi en anglais sous le titre : Impacts of Sea Level Rise and Climate Change on the Coastal Zone of Southeastern New Brunswick.

Également disponible sur l'Internet.
Également publ. sur CD-ROM.
ISBN 0-662-72412-7
N° de cat. : En84-45/2006F
EPSM-754

1. Climat—Changements—Évaluation du risque—Nouveau-Brunswick.
2. Mer—Niveau—Aspect de l'environnement—Nouveau-Brunswick.
3. Littoral—Modifications—Nouveau-Brunswick.
4. Inondations—Prévision—Nouveau-Brunswick.
5. Ondes de tempête—Nouveau-Brunswick—Modèles mathématiques.
6. Écologie littorale—Nouveau-Brunswick.
I. Canada. Environnement Canada.

QC985.N4I46 2006 551.69715'2 C2006-980218-1

Ce document est imprimé sur le papier certifié par Éco-Logo[M].

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, représentée par le Ministre de l'Environnement, 2006.

Table des matières

REMERCIEMENTS **10**

1. RÉSUMÉ **11**

2. SOMMAIRE **12**

2.1 **BUT DE L'ÉTUDE** 12

2.2 **SOMMAIRE DES RÉSULTATS** 13

2.2.1 Élévation du niveau de la mer et subsidence régionale 13
2.2.2 Climatologie - Ondes de tempête, Vents, Vagues et Glace 14
2.2.3 Modélisation des ondes de tempête et des conditions météorologiques 19
2.2.4 Modèle altimétrique numérique LiDAR et cartographie des risques d'inondation 20
2.2.5 Érosion des côtes 21
2.2.6 Impacts sur les écosystèmes 25
2.2.7 Impacts socioéconomiques 29
2.2.8 Stratégies de mesures d'adaptation 32
2.2.9 Établissement d'une capacité d'adaptation 34

3. INTRODUCTION **36**

4. COMPOSANTES DU PROJET **38**

4.1 ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER ET SUBSIDENCE RÉGIONALE **38**

4.1.1 Introduction et contexte à long terme 38
4.1.1.1 Situation et objectifs 38
4.1.1.2 Taux à long terme d'élévation relative du niveau de la mer dans la région 39
4.1.2 Tendances récentes du niveau de la mer tirées des données sur les niveaux d'eau 40
4.1.2.1 Sources et prétraitement des données 40
4.1.2.1.1 Données de marégraphes 40
4.1.2.1.2 Marées astronomiques prévues 41
4.1.2.1.3 Prétraitement des données du SDMM 41
4.1.2.1.4 Erreurs dans les ensembles de données 42
4.1.2.2 Examen des niveaux d'eau moyens 42
4.1.2.2.1 Niveaux d'eau moyens annuels et mensuels à Charlottetown 42
4.1.2.2.2 Niveaux d'eau moyens annuels et mensuels à Escuminac et à Pointe-Chêne 49
4.1.3 Normalisation des niveaux d'eau en fonction de la pression atmosphérique 54
4.1.3.1 Pression atmosphérique 54
4.1.3.2 Correction des données de niveau d'eau à Charlottetown en fonction des variations de la pression 55
4.1.3.3 Correction des données d'Escuminac et de Pointe-du-Chêne pour tenir compte des variations de la pression 62
4.1.4 Estimation des tendances à plus long terme du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne à l'aide de méthodes de propagation des différences 66
4.1.4.1 Propagation des différences dans les tendances linéaires 66
4.1.4.1.1 Escuminac et Charlottetown 66
4.1.4.1.2 Pointe-du-Chêne, Charlottetown et Escuminac 68
4.1.4.2 Propagation des tendances linéaires à partir des différences des moyennes mensuelles 71
4.1.5 Sommaire de l'analyse des niveaux d'eau et comparaison avec des travaux antérieurs 84

4.1.5.1 Tendances linéaires dégagées des enregistrements individuels des stations 84
4.1.5.2 Tendances linéaires dégagées de la propagation des différences....85
4.1.5.2.1 Élévation relative à long terme du niveau de la mer à Escuminac....86
4.1.5.2.2 Élévation relative à long terme du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne 86
4.1.6 Composantes de l'élévation du niveau de la mer dans le sud-est du Nouveau-Brunswick 89
4.1.6.1 Mouvement vertical dans l'est du Nouveau-Brunswick....91
4.1.6.2 Élévation du niveau de la mer dans la zone à l'étude....94
4.1.6.3 Taux projetés d'élévation relative du niveau de la mer (2000-2100) 95
4.1.7 Sommaire et conclusions 95
4.1.8 Références 97
4.2 CLIMATOLOGIE - ONDES DE TEMPÊTE, VENTS, VAGUES ET GLACE 101
4.2.1 Introduction....101
4.2.2 Sources et prétraitement des données 101
4.2.2.1 Données de marégraphes....101
4.2.2.2 Marées astronomiques prévues....102
4.2.2.3 Prétraitement des données SDMM 103
4.2.2.4 Erreurs dans l'ensemble de données....103
4.2.2.5 Examen des moyennes....104
4.2.3 Les ondes de tempête à Charlottetown....104
4.2.3.1 Ajustement de l'ensemble de données pour Charlottetown....104
4.2.3.2 Ondes de tempête à Charlottetown – 1960-2005 105
4.2.3.3 Prise en compte des données manquantes pour Charlottetown 1960-2005....109
4.2.4 Climatologie des ondes de tempête à Charlottetown....111
4.2.4.1 Climatologie des ondes de tempête à Charlottetown – 1960-2004 111
4.2.4.2 Données de 1911 à 1959 sur le niveau de l'eau à Charlottetown 115
4.2.4.3 Statistiques décennales des ondes de tempête à Charlottetown 119
4.2.4.4 Rajustement des niveaux d'eau à l'année 2000 123
4.2.5 Les ondes de tempête à Pointe-du-Chêne et à Escuminac....129
4.2.5.1 Ajustement de l'ensemble de données pour Pointe-du-Chêne 129
4.2.5.2 Correction de l'ensemble de données pour Escuminac et Pointe-Sapin....135
4.2.6 Climatologie des ondes de tempête à Pointe-du-Chêne et à Escuminac....140
4.2.7 Épisodes extrêmes à Pointe-du-Chêne et à Escuminac....144
4.2.8 Les tempêtes 151
4.2.9 Les tempêtes de référence....156
4.2.9.1 La tempête du 21 janvier 2000....157
4.2.9.2 La tempête du 29 octobre 2000 166
4.2.9.3 La tempête du 6 février 2001 172
4.2.9.4 Juan blanc – 19 février 2004....175
4.2.9.5 La tempête du 27 décembre 2004 177
4.2.9.6 Ouragan Gladys – 21 octobre 1968, et tempête du 19 décembre 1963....180
4.2.9.7 Grandes tempêtes et inondations du passé....181
4.2.10 Climatologie des vents et des vagues....184
4.2.10.1 Introduction....184
4.2.10.2 Tempêtes de vent....185
4.2.10.2.1 Processus des tempêtes de vent....185
4.2.10.2.2 Épisodes de vent depuis 1953....186
4.2.10.2.3 Épisodes de vent d'ici 2100 192
4.2.10.3 Vagues 194
4.2.10.3.1 Formation, influence du fond et déferlement des vagues....194
4.2.10.3.2 Vagues depuis 1954 195
4.2.10.3.3 Vagues d'ici 2100....203
4.2.11 Climatologie des glaces de mer 205

4.2.11.1 Climatologie actuelle des glaces de mer dans le golfe du Saint-Laurent 206
4.2.11.1.1 Produits climatiques et base de données de cartes numériques du SCG.....206
4.2.11.1.2 Formation normale de glace 207
4.2.11.1.3 Concentrations normales de glace et épaisseur.....207
4.2.11.1.4 Fonte normale de la glace 207
4.2.11.2 Variabilité de la couverture glacielle d'une année à l'autre et d'une décennie à l'autre 217
4.2.11.3 Incidences de la glace sur les vagues et les ondes de tempête.....218
4.2.11.4 Tendances et climatologie future des glaces.....222
4.2.12 Sommaire et conclusions 225
4.2.13 Références 230
4.2.14 Photos.....233
4.2.15 Pièces jointes.....234
4.2.15.1 Pièce jointe A.:Données mensuelles manquantes pour Charlottetown en pourcentage (1960-2005).....234
4.2.15.2 Pièce jointe B: Estimation du niveau d'eau à Pointe-du-Chêne pendant la tempête du 29 octobre 238
4.2.15.3 Pièce jointe C: Cartes des trajectoires des tempêtes 240
4.3 MODÉLISATION DES ONDES DE TEMPÊTE ET DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES.....275
4.3.1 Contexte 275
4.3.2 Observations du niveau de la mer : installation de marégraphes côtiers 276
4.3.3 Niveaux d'inondation pour le sud-est du Nouveau-Brunswick 277
4.3.4 Modèle d'ondes de tempête et validation de ses résultats 278
4.3.5 Reconstruction sur 40 ans des ondes de tempête.....281
4.3.5.1 Ondes de tempête reconstruites et exactitude des reconstructions 284
4.3.5.2 Analyse extrémale des ondes observées et reconstruites.....287
4.3.5.3 Tendances pluridécennales des ondes extrêmes.....291
4.3.6 Analyse des tendances et des extrêmes des niveaux d'eau totaux.....293
4.3.6.1 Tendances et extrêmes d'endroits de la reconstruction sur 40 ans 295
4.3.6.2 Extrêmes dans des scénarios réalistes de changement climatique 300
4.3.6.2.1 Scénario 1 301
4.3.6.2.2 Scénario 2 302
4.3.6.2.3 Scénario 3 303
4.3.7 Affichage sur le Web 303
4.3.8 Mise à l'échelle des municipalités du risque d'inondation.....306
4.3.8.1 Visualisation du risque d'inondation dans un climat en évolution.....309
4.3.9 Sommaire et conclusions 310
4.3.10 Remerciements 312
4.3.11 Références 312
4.4 MODÈLE ALTIMÉTRIQUE NUMÉRIQUE LIDAR ET CARTOGRAPHIE DES RISQUES D'INONDATION 315
4.4.1 Introduction.....315
4.4.2 Méthodes.....316
4.4.2.1 Systèmes LiDAR 316
4.4.2.2 Les systèmes LiDAR Mark I et Mark II de Terra Remote Sensing 318
4.4.2.3 Attributs des points LiDAR 322
4.4.2.4 Modèle altimétrique numérique.....322
4.4.2.5 Modèles de surface LiDAR (MAN, MNS, cartes d'intensité).....323
4.4.2.6 Validation du MAN LiDAR 323
4.4.2.7 Niveaux de la mer causant l'inondation 324
4.4.2.8 Modélisation et cartographie des risques d'inondation 325
4.4.2.9 Détection des variations à la Dune de Bouctouche (2003-2004) 325

4.4.3 Résultats 326
4.4.3.1 Exemples de modèles de surface d'après les levés LiDAR de 2003 (MAN, MNS) 326
4.4.3.2 Exemples de modèles de surface d'après les levés LiDAR de 2004 (MAN, MNS et intensité) 328
4.4.3.3 Validation des hauteurs LiDAR (données de 2003 et 2004) 330
4.4.3.4 Exemples de cartes des risques d'inondation (tempête de janvier 2000 plus élévation du niveau de la mer) 332
4.4.3.5 Visualisation des modèles altimétriques et des cartes des risques d'inondation 334
4.4.3.6 Détection des changements le long de la Dune de Bouctouche (2003-2004) 336
4.4.4 Sommaire et conclusions 338
4.4.5 Remerciements 339
4.4.6 Références 339
4.5 ÉROSION DES CÔTES 342
4.5.1 Introduction 342
4.5.1.1 Objectifs de cette composante 342
4.5.1.2 Érosion versus accumulation 343
4.5.1.3 Index de sensibilité à l'érosion 344
4.5.1.4 Base de données sur l'érosion 345
4.5.2 Travaux antérieurs sur les tendances et les impacts de l'érosion 345
4.5.2.1 Études régionales 346
4.5.2.1.1 Construction d'un pont-chaussée 346
4.5.2.1.2 Extraction industrielle de sable 346
4.5.2.1.3 Installation de murs de protection 347
4.5.2.2 Études locales 348
4.5.2.2.1 Évolution des cordons sableux 348
4.5.2.2.2 Evolution des forêts littorales 350
4.5.3 Études réalisées dans le cadre de cette composante 351
4.5.3.1 Kouchibouguac à Bouctouche 351
4.5.3.1.1 Introduction 351
4.5.3.1.2 Méthodologie 355
4.5.3.1.3 Résultats 355
4.5.3.1.4 Discussion 364
4.5.3.2 Cocagne à Shemogue 368
4.5.3.2.1 Description des secteurs étudiés 368
4.5.3.2.2 Production des cartes géocodées multidates 375
4.5.3.2.3 Évolution récente des flèches littorales 383
4.5.3.2.4 Évolution récente des falaises 397
4.5.3.2.5 Évolution récente de la Plage Parlee 402
4.5.3.2.6 Interventions humaines à la côte 408
4.5.4 Sommaire et conclusions 413
4.5.5 Glossaire 417
4.5.6 Références 420
4.6 IMPACTS SUR LES ÉCOSYSTÈMES 424
4.6.1 INTRODUCTION AUX IMPACTS SUR L'ÉCOSYSTÈME CÔTIER DE L'ÉLÉVATION DU NIVEAU DE LA MER ,DES ONDES DE TEMPÊTE ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE 424
4.6.1.1 Références 424
4.6.2 Vue d'ensemble de l'habitat côtier dans le sud-est du Nouveau-Brunswick' 425
4.6.2.1 Introduction 425
4.6.2.2 Méthodes 425
4.6.2.3 Résultats 427
4.6.2.4 Sommaire et conclusions 430

4.6.2.5 Références 430
4.6.3 Impact de l'élévation du niveau de la mer et de l'expansion résidentielle sur la superficie occupée par les marais salés dans le sud-est du Nouveau-Brunswick de 1944 à 2001' 431
4.6.3.1 Introduction 431
4.6.3.2 Méthodes 432
4.6.3.2.1 Sites à l'étude 432
4.6.3.2.2 Méthodes de cartographie 437
4.6.3.3 Résultats 437
4.6.3.4 Sommaire et conclusions 442
4.6.3.5 Références 443
4.6.4 Modifications temporelles de l'habitat de plages et de dunes dans le sud-est du Nouveau-Brunswick de 1944 à 2001' 444
4.6.4.1 Introduction 444
4.6.4.2 Méthodes 444
4.6.4.3 Résultats 444
4.6.4.4 Sommaire et conclusions 458
4.6.4.5 Références 459
4.6.5 Impact de l'élévation du niveau de la mer sur la flore des marais salés' 460
4.6.5.1 Introduction 460
4.6.5.2 Méthodes 460
4.6.5.2.1 Zones à l'étude 460
4.6.5.2.2 Relevé des communautés végétales 460
4.6.5.2.3 Détermination des niveaux de marée 461
4.6.5.3 Résultats 461
4.6.5.4 Sommaire et conclusions 465
4.6.5.5 Références 466
4.6.6 Impact de l'élévation du niveau de la mer sur la sterne et le goéland nicheurs coloniaux 467
4.6.6.1 Introduction 467
4.6.6.2 Méthodes 467
4.6.6.2.1 Recensement des colonies de nicheurs 467
4.6.6.2.2 Cartographie 468
4.6.6.3 Résultats 468
4.6.6.4 Sommaire et conclusions 472
4.6.6.5 Références 473
4.6.7 Impact de l'élévation du niveau de la mer sur le harle huppé colonial du parc national Kouchibouguac ' 474
4.6.7.1 Introduction 474
4.6.7.2 Méthodes 474
4.6.7.3 Résultats 475
4.6.7.4 Sommaire et conclusions 478
4.6.7.5 Références 479
4.6.8 Impact de l'élévation du niveau de la mer et d'une onde de tempête sur l'habitat du Pluvier siffleur' 480
4.6.8.1 Introduction 480
4.6.8.2 Méthodes 481
4.6.8.3 Résultats 483
4.6.8.3.1 Longueur des plages 483
4.6.8.3.2 Largeur des plages 483
4.6.8.3.3 Superficie de sable 484
4.6.8.3.4 Pente de la plage 484
4.6.8.3.5 Caractéristiques de la plage 485
4.6.8.3.6 Tendance à Shemogue 485

4.6.8.4 Sommaire et conclusions 487
4.6.8.4.1 Conditions actuelles de l'habitat 487
4.6.8.4.2 Tendances à Shemogue 488
4.6.8.4.3 Gestion des habitats 489
4.6.8.5 Références 489
4.6.9 Impact des ondes de tempête sur la reproduction du Pluvier siffleur au parc national Kouchibouguac 491
4.6.9.1 Introduction 491
4.6.9.2 Méthodes 492
4.6.9.2.1 Site à l'étude 492
4.6.9.2.2 Relevés de la nidification du Pluvier siffleur 492
4.6.9.2.3 Ondes de tempête à Pointe-Sapin et à Escuminac de 1964 à 2005 492
4.6.9.3 Résultats 497
4.6.9.3.1 Couples reproducteurs et taux de reproduction du Pluvier siffleur 497
4.6.9.3.2 Ondes de tempête à Pointe-Sapin et à Escuminac de 1964 à 2005 498
4.6.9.3.3 Ondes de tempête à Charlottetown de 1938 à 2005 500
4.6.9.4 Sommaire et conclusions 501
4.6.9.5 Références 502
4.6.10 Impact de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et du changement climatique sur les populations de Pluviers siffleurs' 503
4.6.10.1 Introduction 503
4.6.10.2 Méthodes 503
4.6.10.2.1 Population étudiée 503
4.6.10.2.2 Structure du modèle de population 503
4.6.10.2.3 Perturbations et rétablissement de la population 504
4.6.10.3 Résultats 504
4.6.10.3.1 Objectifs de rétablissement et perturbation des paramètres 505
4.6.10.4 Sommaire et conclusions 506
4.6.10.4.1 Indices vitaux de la population 506
4.6.10.5 Références 507
4.6.11 Résumé des impacts de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et du changement climatique sur l'écosystème côtier 508
4.7 IMPACTS SOCIOÉCONOMIQUES 513
4.7.1 Introduction 513
4.7.1.1 Objectifs de la recherche 513
4.7.1.2 Composantes de la recherche 514
4.7.1.2.1 Engagement des intervenants ou des communautés 514
4.7.1.2.2 Impacts sur les secteurs économiques 514
4.7.1.2.3 Impacts sur les caractéristiques de la communauté 515
4.7.1.2.4 Coûts et avantages de l'adaptation 515
4.7.1.3 Justification pour chaque composante et étude de cas 515
4.7.1.3.1 Bouctouche : Évaluation des effets intégrés sur l'industrie du tourisme 516
4.7.1.3.2 Baie de Shediac : Coûts possibles des dommages causés par les ondes de tempête et les inondations côtières 516
4.7.2 Processus d'engagement des communautés 516
4.7.2.1 Motifs et justification 516
4.7.2.2 Approche générale 517
4.7.2.3 Résultats du processus d'engagement 518
4.7.3 Questions méthodologiques 518
4.7.3.1 Utilisation de canevas et de scénarios socioéconomiques 519
4.7.3.2 Zone à l'étude et méthodologie 525
4.7.3.2.1 Bouctouche : Évaluation des effets intégrés sur le secteur du tourisme 525

4.7.3.2.2 Baie de Shediac : Coûts des dommages éventuels causés par les ondes de tempête et les inondations côtières....526
4.7.3.3 Rôle de l'incertitude, limites de l'analyse, sources d'erreur....527
4.7.3.3.1 Impacts du changement climatique....528
4.7.3.3.2 Modèle altimétrique numérique....528
4.7.3.3.3 Scénarios futurs de la conjoncture socioéconomique....528
4.7.3.3.4 Horizon temporel....528
4.7.3.3.5 Analyse complète des coûts et avantages....529
4.7.3.3.6 Établissement de la valeur....529
4.7.3.3.7 Limites géographiques....530
4.7.3.3.8 Analyse économique....530
4.7.4 Examen des résultats des études de cas....531
4.7.4.1 Interprétation des résultats de l'étude de cas de Bouctouche....531
4.7.4.2 Interprétation des résultats de l'étude de cas de la baie de Shediac....534
4.7.4.2.1 Propriétés existantes à risque....534
4.7.4.2.2 Futurs développements à risque....539
4.7.4.2.3 Coûts des dommages estimés pour les maisons et les chalets....540
4.7.4.2.4 Coûts d'adaptation....542
4.7.5 Sommaire et conclusions....543
4.7.5.1 Recommandations pour les études subséquentes....546
4.7.6 Remerciements....547
4.7.7 Références....548
4.8 STRATÉGIES DE MESURES D'ADAPTATION....550
4.8.1 Introduction....550
4.8.1.1 Objectifs de la composante adaptation et méthodologie/justification générales....550
4.8.1.2 Présentation de la section....551
4.8.2 Stratégies d'adaptation – Analyse de la documentation....552
4.8.2.1 Qu'entend-on par adaptation?....552
4.8.2.2 Quels sont les cadres de réflexion en matière d'adaptation?....552
4.8.2.3 Que pouvons-nous apprendre des autres provinces, des autres programmes et des autres pays?....553
4.8.3 Approche communautaire....559
4.8.3.1 Portée et méthode de la recherche auprès des communautés....559
4.8.3.2 Ateliers avec les communautés : partage des expériences et des connaissances....559
4.8.3.3 Stratégies traditionnelles dans le sud-est du Nouveau-Brunswick....561
4.8.3.3.1 Impacts....561
4.8.3.3.2 Adaptation....561
4.8.3.4 Résultats de la participation des communautés....563
4.8.3.5 Résumé des résultats du processus de participation communautaire....565
4.8.4 Développement d'un cadre décisionnel pour une prise en charge par les communautés envers des stratégies d'adaptation....566
4.8.4.1 Description du cadre....566
4.8.4.2 Éléments du cadre....567
4.8.4.3 Le processus du cadre....569
4.8.4.4 Participation des communautés....571
4.8.4.5 Pratiques exemplaires du cadre....573
4.8.4.6 Application du cadre d'adaptation....576
4.8.4.6.1 Exemples d'application du cadre : Parc national Kouchibouguac....576
4.8.4.6.2 Exemples d'application du cadre : la Politique de protection des zones côtières (PPZC)....579
4.8.4.6.3 Exemples d'application du cadre : Bouctouche....586

4.8.4.6.4 Exemples d'application du cadre : Pointe-du-Chêne 589
4.8.5 Sommaire et conclusions 592
4.8.6 Références 594
Appendice 1: Liste de stratégies d'atténuation des catastrophes et d'adaptation aux risques d'ondes de tempête et d'inondations côtières 597
4.9 ÉTABLISSEMENT D'UNE CAPACITÉ D'ADAPTATION 599
4.9.1 Introduction 599
4.9.2 Cadre méthodologique théorique utilisé pour visualiser les issues possibles en termes d'impacts, de vulnérabilité, de mesures d'adaptation et de capacité d'adaptation 602
4.9.2.1 Étude de cas 603
4.9.2.1.1 Bouctouche 603
4.9.2.1.2 Shediac (Pointe-du-Chêne) 603
4.9.2.1.3 Acquisition de données LIDAR et MAN 604
4.9.2.1.4 Analyse des écosystèmes 604
4.9.2.1.5 Consultation des communautés 608
4.9.2.1.6 Évaluation de la compréhension qu'a la communauté du changement climatique et de la vulnérabilité 609
4.9.2.1.7 Intégration 610
4.9.3 Résultats et discussions 612
4.9.3.1 Étude de cas de la Dune de Bouctouche et du village de Bouctouche 612
4.9.3.1.1 Types d'impacts liés au changement climatique 612
4.9.3.1.2 Zones et évaluation de la vulnérabilité sous l'angle des facteurs biophysiques à socioéconomiques 613
4.9.3.1.3 Composante sociale 614
4.9.3.1.4 Mesures d'adaptation potentielles 615
4.9.3.1.5 Évaluation de la capacité d'adaptation et de la conservation à long terme de l'écosystème côtier naturel et du tourisme côtier à Bouctouche 620
4.9.3.2 Étude de cas de Shediac et de Pointe-du-Chêne 624
4.9.3.2.1 Types d'impacts relatifs au changement climatique 624
4.9.3.2.2 Zones et évaluation de la vulnérabilité, sous l'angle des facteurs biophysiques à socioéconomiques 627
4.9.3.2.3 Intégration des données et des impacts à l'adaptation 629
4.9.3.3 Mesures d'adaptation potentielles et évaluation des impacts environnementaux 632
4.9.3.3.1 Évaluation des impacts environnementaux (EIE) en tant que moyen d'accroître la capacité d'adaptation 633
4.9.3.3.2 Adaptation : considérations financières et temporelles 636
4.9.3.3.3 Intégration avec la Politique de protection des zones côtières pour le Nouveau- Brunswick 637
4.9.4 Sommaire et conclusions 638
4.9.4.1 Résumé des conclusions et des tendances communes de ces études de cas 638
4.9.4.2 Enseignements tirés de ces exemples 640
4.9.4.3 Défis et questions concernant la mise en œuvre de mesures et de stratégies d'adaptation 640
4.9.5 Références 642

5.0 ANNEXES 644
ANNEXE A CARTES DES PÉRIODES DE RÉCURRENCE POUR LES ONDES DE TEMPÊTE SUR LA BAIE DE SHEDIAC 644
ANNEXE B CARTES D'INONDATION POUR L'ONDE DE TEMPÊTE DE JANVIER 2000 644

ANNEXE C CARTES D'ÉROSION DES CÔTES 644
ANNEXE D CARTES D'HABITAT CÔTIER 644

Remerciements

Une partie importante du financement de ce projet a été assurée par le Programme sur les impacts et l'adaptation liés au changement climatique du gouvernement du Canada et par le Service météorologique d'Environnement Canada. Des ressources supplémentaires ont été fournies par le Fonds en fiducie pour l'environnement du ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick; Sécurité publique et Protection civile Canada; le Secteur des sciences de la Terre de Ressources naturelles Canada; l'Agence canadienne d'évaluation environnementale; Parcs Canada (parc national Kouchibouguac); le Conseil de recherches en sciences humaines du Canada et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada.
Ces recherches n'auraient pas pu être menées sans les importantes contributions en nature des partenaires dont la liste figure ci-dessous.

Nous tenons aussi à souligner les contributions particulières de Martha McCullough et de John Parker, du Service météorologique d'Environnement Canada, qui ont collaboré à préparer la présentation de projets pour cette recherche.

Partenaires gouvernementaux: Environnement Canada, le ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, le ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick, Pêches et Océans Canada, Parcs Canada, Ressources naturelles Canada

Partenaires universitaires: Centre of Geographic Sciences, Université Dalhousie, Université Laurentienne, Université de Moncton, Université Mount Allison, Université du Nouveau-Brunswick

Responsable du projet : Réal Daigle

Équipe de recherche: Diane Amirault, Natacha Bernier, Dominique Bérubé, Andrew Boyne, Anna Calvert, Richard Chagnon, Omer Chouinard, Shawn Craik, Lisa DeBaie, Kénel Délusca, Don Forbes, Alan Hanson, Lorne Ketch, Edward MacKinnon, Matthew Mahoney, Gavin Manson, Gilles Martin, Kelly Murphy, Sue Nichols, Stéphane O'Carroll, Jeffrey Ollerhead, Léa Olsen, Hazel Onsrud, George Parkes, Hal Ritchie, Daniel Roberts, Jennifer Stewart, Jennifer Strang, Michael Sutherland, Lee Swanson, Keith Thompson, Rodger Titman, Éric Tremblay, Liette Vasseur, Tim Webster

1. Résumé

L'objectif de ce projet de recherche pluridisciplinaire qui s'est étalé sur trois ans (2003-2006) était de quantifier les impacts du changement climatique, et plus précisément de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et de l'érosion, sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick, qui donne sur le golfe du Saint-Laurent, afin d'appuyer la gestion durable, la résilience des communautés et l'élaboration de stratégies d'adaptation.

Des données LiDAR ont été utilisées pour générer un modèle altimétrique numérique (MAN) détaillé de la côte, essentiel pour délimiter les zones d'inondation et d'ennoiement, les structures naturelles de protection telles que les dunes côtières, et l'altitude de l'arrière-côte en vue d'estimer l'apport de sédiments lié à l'érosion du littoral. Les études météorologiques, géologiques et hydrographiques concernent les changements mesurés et prévus du niveau de la mer dus à la subsidence de la croûte et au changement climatique. Nous modélisons les événements repères de l'onde de tempête du 21 janvier 2000 (cette tempête ayant été déclarée catastrophe par le gouvernement fédéral) et de celle du 29 octobre 2000, et nous développons une onde de tempête potentielle maximale sur cette côte à la lumière de notre compréhension des phénomènes passés. Ces fourchettes d'épisodes d'ondes de tempête et les scénarios proposés d'élévation du niveau de la mer induite par le changement climatique ont été superposés au MAN pour identifier les régions de la côte du golfe du Saint-Laurent au Nouveau-Brunswick qui sont vulnérables à l'inondation, à l'érosion des côtes et à l'ennoiement à l'horizon de 100 ans. Ces impacts sont définis en termes de risque probable, avec des échelles de pénétration dans les terres des ondes de tempête reposant sur les scénarios présentés et leurs effets sur l'infrastructure, l'industrie et les écosystèmes côtiers.

La zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick abrite plusieurs espèces animales et végétales menacées. Un aspect important de la recherche sur les écosystèmes est donc de déterminer quel effet l'élévation du niveau de la mer et les tempêtes à venir auront sur les habitats essentiels et les espèces en péril.

2. Sommaire

2.1 But de l'étude

Les collectivités et les écosystèmes côtiers du monde entier sont considérés comme vulnérables à l'élévation du niveau de la mer et aux autres impacts des changements climatiques, comme en témoignent les divers rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Au Canada, un grand nombre de régions côtières sont très sensibles à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête (aperçu publié par la Commission géologique du Canada, bulletin n^{o} 505, 1998). Certaines régions de la côte de l'Atlantique figurent parmi les secteurs les plus vulnérables. C'est notamment le cas de la partie sud du golfe du Saint-Laurent, en particulier de certaines régions de la côte est du Nouveau-Brunswick. En effet, le niveau de la mer y monte déjà, avec des impacts démontrables, que l'accélération de l'élévation du niveau de la mer imputable au réchauffement par effet de serre devrait exacerber. Ainsi augmentent les besoins en adaptation pour contrer les dommages et les coûts. Dans cette région, les menaces sont surtout liées aux impacts de l'inondation et de l'érosion des côtes; des dommages peuvent être causés par le mouvement forcé des glaces de mer sous l'effet des ondes de tempête en hiver, comme cela a été le cas avec la tempête repère du 21 janvier 2000. Certaines parties de cette région sont très exposées à l'action des vagues pendant les tempêtes de la saison sans glaces, comme en témoignent les dommages au rivage et à l'infrastructure subis le 29 octobre 2000. Des épisodes semblables quoique moins intenses se sont produits encore en 2001 et en 2002, et quelques autres en 2004. Détail intéressant, la tempête du 27 décembre 2004 a causé certains dommages semblables à ceux du 21 janvier 2000.

Des données LiDAR ont été utilisées pour générer un modèle altimétrique numérique (MAN) détaillé de la côte, essentiel pour délimiter les zones d'inondation et d'ennoiement, les structures naturelles de protection telles que les dunes côtières, et l'altitude de l'arrière-côte en vue d'estimer l'apport de sédiments lié à l'érosion du littoral. Les études météorologiques, géologiques et hydrographiques concernent les changements mesurés et prévus du niveau de la mer dus à la subsidence de la croûte et au changement climatique. Nous modélisons les événements repères des ondes de tempête du 21 janvier 2000 (cette tempête ayant été déclarée catastrophe par le gouvernement fédéral) et du 29 octobre 2000, et développons une onde de tempête potentielle maximale sur cette côte à la lumière de notre compréhension des phénomènes passés. Ces fourchettes d'épisodes d'ondes de tempête et les scénarios proposés d'élévation du niveau de la mer induite par le changement climatique ont été superposés au MAN pour identifier les régions de la côte du golfe du Saint-Laurent au Nouveau-Brunswick qui sont vulnérables à l'inondation, à l'érosion des côtes et à l'ennoiement à l'horizon de 100 ans. Ces impacts sont définis en termes de risque probable, avec des échelles de pénétration dans les terres des ondes de tempête reposant sur les scénarios présentés et leurs effets sur l'infrastructure, l'industrie et les écosystèmes côtiers.

L'objectif général de ce projet de recherche pluridisciplinaire qui s'est étalé sur trois ans (2003-2006) était de quantifier les impacts du changement climatique — et plus précisément de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et de l'érosion — sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick, qui donne sur le golfe du Saint-

Laurent, afin d'appuyer la gestion durable, la résilience des communautés et l'élaboration de stratégies d'adaptation.

2.2 Sommaire des résultats

2.2.1 Élévation du niveau de la mer et subsidence régionale

Sur la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, le niveau de la mer monte depuis plusieurs milliers d'années; les eaux ont graduellement inondé le détroit de Northumberland et les tronçons les plus en aval des cours d'eau drainant la région à l'étude, ce qui a fait reculer le trait de côte et entraîné une croissance verticale et un mouvement vers l'intérieur des marais salés. Ces changements se poursuivent encore lentement, et deviennent visibles sur plusieurs décennies. Le réchauffement du climat, par le truchement de l'expansion thermique des océans et de la fonte de la glace sur les continents, menace de faire monter, à l'échelle planétaire, le niveau moyen des mers de quelques décimètres au cours du prochain siècle, ce qui accélérera les taux historiques d'élévation relative du niveau de la mer au Canada atlantique.

L'élévation relative observée du niveau de la mer (autrement dit, la montée du niveau de la mer par rapport à des points fixes sur les terres) est due à la combinaison d'une subsidence régionale et d'une montée du niveau de la mer dans le nord-ouest de l'Atlantique. La subsidence découle de l'ajout et de la disparition du poids des glaces il y a plus de 10 000 ans, qui ont conduit à l'affaissement graduel et à la migration d'un bourrelet marginal qui se serait formé autour des bordures des inlandsis d'Amérique du Nord, et de l'ajout de charge sur le plancher du golfe du Saint-Laurent par l'eau de mer qui a remonté sur toute la planète de plus de 100 m après les bas niveaux de l'époque glaciaire. Le niveau mondial de la mer a continué de monter, s'accélérant dans la seconde moitié du XX^{e} siècle jusqu'au taux actuel d'environ 17 cm par siècle. En raison d'un gradient de subsidence sur la région, l'élévation relative observée du niveau de la mer est moindre dans le nord-ouest, et plus marquée dans le sud-est du secteur à l'étude. Le long enregistrement marégraphique de Charlottetown, Î.P.É., qui date de plus de 95 ans, révèle une élévation relative de 32 cm sur le siècle. À l'autre extrémité de la zone à l'étude, l'élévation relative du niveau de la mer à Escuminac aura été d'environ 23 cm sur la même période. Cette inclinaison régionale se poursuivra dans le futur. On peut donc conclure que les taux à venir d'élévation relative du niveau de la mer présenteront encore un gradient sur la région.

Notre analyse de la subsidence isostatique et de l'inclinaison présentée plus haut et celle de l'élévation régionale du niveau de la mer basée sur les travaux du GT I du GIEC (2001) nous conduisent à formuler les estimations suivantes de l'élévation relative du niveau de la mer pour le prochain siècle (2000-2100) sur la région à l'étude :

- Cap-Jourimain 59 ± 35 cm
- Shemogue 57 ± 35 cm
- Cap-Pelé 56 ± 35 cm
- Shediac 54 ± 35 cm
- Bouctouche 53 ± 35 cm
- Kouchibouguac 51 ± 35 cm
- Escuminac 50 ± 35 cm

Ces valeurs de l'élévation du niveau de la mer doivent être examinées dans le contexte des impacts des tempêtes et des dangers qui les accompagnent. Pendant les fortes tempêtes, les ondes de tempête causent des inondations côtières, les grosses vagues entraînent de l'érosion et des dommages aux infrastructures et la glace de mer peut gagner les terres, avec des effets destructeurs. Comme la hausse du niveau d'eau et les vagues, que la tempête entraîne se superposent au niveau moyen de la mer, l'élévation de ce dernier a un effet important sur le degré d'inondation et d'attaque par les vagues, assorti de répercussions majeures pour les facteurs écologiques et socioéconomiques et pour les mesures d'adaptation qui doivent être prises pour réduire les pertes. Ces questions sont abordées plus loin dans le présent rapport.

2.2.2 Climatologie - Ondes de tempête, Vents, Vagues et Glace

La totalité du stock numérique de données sur les niveaux d'eau dans le sud du golfe du Saint-Laurent a été examinée ici, pour établir la climatologie des ondes de tempête dans la zone à l'étude et identifier les épisodes d'ondes de tempête et de niveaux d'eau extrêmes. La plupart des tempêtes qui frappent la partie sud de la zone à l'étude ont des répercussions ailleurs sur le détroit de Northumberland. Les données de longue durée de Charlottetown sont donc cruciales pour cette étude, puisqu'elles permettent une évaluation des conditions de tempête à travers les décennies et démontrent l'importance fondamentale de la tempête du 21 janvier 2000 et le fait que l'élévation du niveau de la mer a déjà eu un effet sur les niveaux d'eau extrêmes dans la période visée par les données.

L'enregistrement marégraphique de Charlottetown est un des plus longs qui existent pour l'est du Canada; il remonte en effet à 1911 et il est très complet depuis 1938. Celui d'Escuminac remonte à 1973 mais, si on le combine à des enregistrements antérieurs à Pointe-Sapin, pas très loin de là, on peut le faire remonter à 1963 (43 ans). Les données de niveau d'eau de Pointe-du-Chêne, plus limitées, ne couvrent que la période de 1971 à 1992. Le marégraphe de Pointe-du-Chêne y a cependant été remis en service pour les fins du présent projet et, dans les nouvelles données recueillies de 2003 à 2006, on note quelques tempêtes très importantes.

Les épisodes d'ondes de tempête de plus de 60 cm ont été extraits de l'enregistrement des niveaux d'eau de Charlottetown en prenant en compte l'élévation du niveau de la mer et en interpolant, dans la mesure du possible, les épisodes manquants à partir des données de marégraphes proches. Ces épisodes ont ensuite été colligés par décennie (années 1940 aux années 1990), par demi-décennie, par année et par mois.

On a choisi les données de niveau d'eau de 1960 à 1998 pour représenter la climatologie des ondes de tempête à Charlottetown. En général, les ondes de tempête de plus de 60 cm sont des phénomènes fréquents à Charlottetown, puisqu'il y en a en moyenne huit par an (contre, par exemple, deux ou trois en moyenne sur la côte atlantique à Halifax). Les ondes de tempête de 100 cm ou plus surviennent en moyenne environ une fois par an. Celles qui dépassent 120 cm sont rares, et se produisent en moyenne environ trois fois par décennie. Nous n'avons relevé aucun épisode de plus de 160 cm. À Charlottetown, les ondes de tempête sont surtout associées à la période de tempêtes de la fin de l'automne et de l'hiver. Les statistiques moyennées montrent une augmentation de leur fréquence en octobre et en novembre, avec une pointe d'activité en décembre et

en janvier. La fréquence des tempêtes diminue significativement en avril, et il y a peu d'occurrences de mai à septembre. La fréquence des ondes de tempête présente une forte variabilité interannuelle, due à la grande diversité de la fréquence, de la gravité et de la trajectoire des tempêtes elles-mêmes. Les statistiques décennales montrent que les ondes de tempête à Charlottetown semblent être devenues un peu plus fréquentes des années 1940 aux années 1960, et que les ondes les plus importantes (>120 cm) sont totalement absentes dans les années 1940 et les années 1950 (ainsi que dans les données quelque peu incomplètes des périodes antérieures), mais on en observe par la suite. Les décennies 1960, 1970 et 1980 ont été marquées de fortes ondes de tempête, avec en moyenne plus de deux épisodes dépassant 80 cm par an, et les années 1980 présentent en moyenne plus d'un épisode de 100 cm par an. Les années 1990 ont généralement connu moins d'ondes de tempête, malgré quelques épisodes particulièrement forts. Depuis 2000, il y a eu beaucoup de cas de fortes ondes de tempête. Les statistiques par demi-décennie attirent l'attention sur le fait que certaines périodes sont plus actives que d'autres, en particulier le début des années 1960 et la fin des années 1980, périodes pour lesquelles la climatologie révèle une augmentation de fréquence des coups de vent du nord-est. La période depuis 2000 a été très active.

Le 21 janvier 2000, une vigoureuse tempête d'hiver a causé une inondation généralisée des régions côtières du sud-est du Nouveau-Brunswick et tout le long du détroit de Northumberland, dont Pointe-du-Chêne et le front de mer du centre-ville de Summerside et Charlottetown à l'Île-du-Prince-Édouard. À Charlottetown, la tempête a amené le niveau d'eau à un nouveau record, de 4,23 m au-dessus du zéro des cartes (ZC), qui dépassait de 39 cm le record précédent (établi exactement 39 ans plus tôt). Cette tempête et les niveaux d'eau atteints dans toute la région constituent le véritable point de repère du présent projet. D'autres épisodes d'ondes de tempête et niveaux d'eau extrêmes ont été identifiés pour Charlottetown et les données de niveau d'eau ont été systématiquement ramenées à l'année 2000 pour faire la preuve des impacts que l'élévation du niveau de la mer, sur la période des données existantes, a déjà eu sur les extrêmes de niveau d'eau et sur les inondations côtières. Par exemple, quand l'élévation du niveau de la mer est prise en compte, la différence entre l'ancien record de niveau d'eau à Charlottetown et le nouveau est réduite à 27 cm.

Nous avons aussi établi une climatologie des ondes de tempête pour la région d'Escuminac-Pointe-Sapin, située juste au nord de la zone à l'étude, à l'aide de 28 ans de données, et pour Pointe-du-Chêne, à l'aide de 15 ans de données. Les ondes de tempête à Escuminac-Pointe-Sapin présentent les mêmes caractéristiques de fréquence, de distribution et d'intensité qu'à Charlottetown. En moyenne, il y a chaque année environ sept épisodes de plus de 60 cm et un épisode de plus de 100 cm. On observe une grande variabilité interannuelle de la fréquence, où aucune tendance nette ne peut être détectée. Neuf ondes de tempête de plus de 120 cm ont été identifiées à Escuminac-Pointe-Sapin sur la période 1963-2005, comparativement à 13 à Charlottetown entre 1960 et 2005. Les très fortes ondes de tempête peuvent cependant être un peu plus fréquentes, avec trois épisodes de plus de 150 cm identifiés à Escuminac (même en l'absence de la tempête du 21 janvier 2000) contre deux à Charlottetown. L'onde de tempête la plus haute enregistrée atteignait 160 cm, le 17 mars 1976. Ce genre d'onde est surtout associé à la période d'activité cyclonique de la fin de l'automne et de l'hiver. Comme à Charlottetown, on a observé une augmentation de fréquence en octobre et en novembre, avec un pic d'activité en décembre et en janvier; la

fréquence diminue significativement en avril, et il y a peu d'occurrences de mai à septembre.

Les ondes de tempête sont plus hautes et plus fréquentes à Pointe-du-Chêne qu'à Escuminac ou à Charlottetown, mais leur distribution sur l'année est bien entendu semblable, puisqu'elles sont généralement déclenchées par les mêmes tempêtes. En moyenne, on a observé chaque année dix épisodes de plus de 60 cm, avec deux ou trois de plus de 100 cm. Les ondes de tempête dépassant 150 cm se produisent tous les deux ou trois ans; on en a vu qui atteignaient 200 cm (198 cm le 17 mars 1976 et 200 cm le 21 janvier 2000), et qui constituent les plus hautes ondes de tempête enregistrées au Canada atlantique, à la connaissance des auteurs.

Sous l'effet du réchauffement planétaire, on prévoit que l'élévation du niveau de la mer va s'accélérer. Avec le passage de tempêtes dans la zone côtière, de fortes ondes de tempête vont un jour se trouver en phase avec des marées suffisamment hautes pour entraîner de nouveaux records du niveau de l'eau dans la zone à l'étude et à Charlottetown. De plus, avec le temps, les inondations atteignant un niveau donné vont connaître une augmentation de fréquence substantielle; cet état de choses a été démontré quantitativement pour Charlottetown et Pointe-du-Chêne à l'aide d'un dénombrement des dépassements de divers seuils dans les données existantes (corrigées pour tenir compte de l'élévation du niveau de la mer).

On a examiné les cartes météorologiques synoptiques correspondant aux dépressions qui ont généré des ondes de tempête de 90 cm ou plus à Charlottetown et de 110 cm ou plus à Pointe-du-Chêne, et produit des cartes des trajectoires. Ces systèmes sont surtout des dépressions maritimes extratropicales qui subissent un creusage explosif au large de la côte est et passent à l'est de la zone à l'étude, généralement accompagnées d'une période de vents du nord-est ou du nord de la force d'un coup de vent ou d'une tempête, qui soufflent à travers le golfe du Saint-Laurent. Leur géométrie est généralement favorable à l'arrivée de grosses mers dans la zone à l'étude (en l'absence de glaces de mer). L'historique des cyclones tropicaux dans la zone à l'étude a été examiné à l'aide de la base de données HURDAT ou base de données des « meilleures trajectoires » (1851 à 2004) du National Hurricane Center. Bien que moins courants que les épisodes d'ondes dus à des tempêtes extratropicales, ceux imputables à des cyclones tropicaux peuvent être très intenses et survenir pendant la saison des systèmes tropicaux (juin à novembre), époque où il n'y a pas de glace de mer pour protéger le littoral contre l'impact des vagues; de tout temps, ces systèmes ont contribué pour beaucoup au processus continuel d'érosion de la côte dans la région.

Nous avons utilisé les plus hauts niveaux d'eau aux sites marégraphiques de Charlottetown, Escuminac-Pointe-Sapin et Pointe-du-Chêne pour identifier les tempêtes repères des 40 dernières années, qui sont présentées comme des études de cas, où l'accent est mis sur les impacts des tempêtes. Ces études de cas illustrent, entre autres, l'important rôle protecteur de la glace de mer pendant les mois d'hiver et attirent l'attention sur l'augmentation des taux d'erosion des côtes à laquelle on peut s'attendre avec une saison de glace plus courte dans un climat futur plus chaud. Elles mettent aussi en lumière l'importance du programme de prévision des ondes de tempête pour les interventions d'urgence et l'atténuation à court terme, ainsi que la valeur des données LiDAR en temps réel pour la cartographie des inondations.

Une brève revue de la documentation sur les épisodes d'inondation dans la région permet de mettre en relief d'autres grandes tempêtes datant d'avant les données marégraphiques et nous rappelle que les inondations et l'érosion de la côte dans la zone à l'étude sont un processus continuel et que les dommages aux infrastructures côtières ne sont pas un phénomène nouveau.

Il est clair que les niveaux d'inondation de la tempête du 21 janvier 2000 sont proches des maximums qui peuvent être atteints dans le climat actuel; cependant, cette tempête est survenue à un moment où le rivage était protégé par la glace de mer. D'un autre côté, la tempête du 29 octobre 2000, qui était accompagnée de très grosses vagues superposées à un niveau de la mer élevé, a fait beaucoup de dommages aux rivages et à l'infrastructure côtière. Elle a été la pire des 40 dernières années pour ce qui est de l'erosion des côtes et des dommages dus aux vagues; cependant, les choses auraient été infiniment pires si la tempête avait été en phase avec la plus élevée des marées hautes de la journée. Il pourrait donc, même à l'époque actuelle, survenir des cas plus graves en termes de dommages dus aux vagues, comme il y en a fort probablement eu par le passé, sans qu'intervienne l'élévation du niveau de la mer imputable au changement climatique.

Nous avons examiné les relevés de mesure et de simulation rétrospective de la vitesse et de la direction des vents ainsi que de la hauteur et de la période des vagues (et de leur direction, lorsque les données étaient accessibles) dans un triple but : identifier les vents et les phénomènes éoliens qui contribuent le plus à la formation des vagues influant sur le littoral sud du golfe du Saint-Laurent, dégager des tendances à partir du profil des tempêtes passées et du forçage de l'erosion des côtes dans la zone d'étude et, enfin, tenter de prédire le forçage futur jusqu'en 2100.

Les vents qui semblent produire le plus efficacement les vagues qui influent sur la zone d'étude soufflent du nord-est et sont associés au passage de systèmes dépressionnaires tropicaux, en transition ou extratropicaux qui se dirigent généralement vers le nord et le nord-est. Ces vents tendent à survenir en automne et en hiver, mais ils ne produisent efficacement des vagues que pendant les mois où les eaux sont exemptes de glaces, période où le fetch est le plus long. Nous avons examiné le jeu de données sur les vents de la base AES40 pour un point situé à l'extrémité ouest du détroit de Northumberland. Des épisodes récurrents de vents d'automne qui soufflaient du nord-est à plus de 40 km/h ont été décelés au cours des périodes suivantes : 1960, 1962-1966, 1967-1968, 1970, 1974-1982, 1985, 1987-1989, 1991, 1993, 1998-2001 et 2004. Nous avons isolé 58 phénomènes éoliens au cours desquels des vents d'automne du nord-est ont soufflé à plus de 40 km/h pendant au moins six heures. Un examen de la fréquence annuelle de ces phénomènes révèle une tendance évidente à la hausse.

Les bouées de mesure des vagues utilisées dans le cadre de cette étude ont enregistré trois phénomènes éoliens importants qui ont eu des incidences sur la zone d'étude : le premier est survenu le 7 décembre 2003, le deuxième (la tempête subtropicale Nicole), les 11 et 12 octobre 2004, et le dernier, le 27 décembre 2004. Ces phénomènes éoliens du nord-est ont créé des vagues d'une hauteur significative pouvant aller jusqu'à 4,8 m et d'une période de pointe de 10 secondes. La disposition physique des bouées a permis de démontrer que les vagues pénétrant dans la partie ouest du détroit de Northumberland perdent en hauteur lorsqu'elles se dirigent vers le sud et l'est.

Le relevé de simulation rétrospective des vagues pour l'extrémité ouest du détroit révèle une hausse de la fréquence des vagues automnales de plus de 3 m en provenance du nord-est au cours des périodes suivantes : 1960-1966, 1968, 1970, 1974, 1977-1981, 1986-1988, 1991, 1998-2000 et 2003-2004. Nous avons dressé une liste de 53 phénomènes météorologiques automnaux ayant créé des vagues de plus de 3 m en provenance du nord-est pendant au moins six heures. Il n'a toutefois pas été possible de dégager de tendance significative dans la fréquence des phénomènes météorologiques annuels depuis 1960.

Nous avons utilisé les données de la base AES40 sur la vitesse moyenne quotidienne des vents pour réduire à des sous-échelles statistiques les variables de différents modèles de circulation générale et pour prédire la vitesse des vents jusqu'en 2100. Il a cependant été impossible de répéter l'exercice pour la direction des vents. Les résultats donnent à penser qu'il n'y aura aucun changement important dans la vitesse des vents. Mais, comme les variations dans la vitesse des vents ont été sous-estimées, ces résultats ne fournissent aucune indication sur les phénomènes extrêmes. Les données obtenues laissent entrevoir une réduction globale de la fréquence des phénomènes éoliens, qui pourrait toutefois s'accompagner d'un accroissement de la fréquence des phénomènes extrêmes. Compte tenu des données à échelle réduite sur la vitesse des vents et de la corrélation entre la vitesse des vents et la hauteur des vagues dans le jeu de données de simulation prospective, nous avons déterminé que la hauteur des vagues risquait peu de changer de façon significative d'ici 2100. Comme pour les vents, cependant, il a été difficile de prédire les variations dans la hauteur des vagues et d'élaborer un scénario qui tienne compte des phénomènes extrêmes. Les phénomènes météorologiques producteurs de vagues suivront vraisemblablement un scénario semblable à celui des vents, mais qui sera assorti d'une complication supplémentaire.

À l'heure actuelle, la formation des vagues est entravée par la glace de mer pendant les mois d'hiver. Or, le scénario prévu est celui d'une réduction des glaces de mer dans le sud du golfe du Saint-Laurent. En pareil cas, les tempêtes hivernales produiront plus de vagues, ce qui accroîtra la fréquence globale des vagues et des phénomènes météorologiques violents

À partir des cartes des glaces du Service canadien des glaces, nous avons développé une climatologie exacte de la glace de mer dans le golfe du Saint-Laurent. L'examen de la couverture totale de glace accumulée dans le golfe montre une grande variabilité d'une année à l'autre et révèle que certains cycles peuvent être associés à l'oscillation nord-atlantique (NAO) et à d'autres paramètres environnementaux. Nos dossiers montrent également une tendance à la baisse de la couverture glacielle et de la durée de la saison des glaces, qui n'est toutefois pas statistiquement significative**.**

On croit que la présence de glace a un effet modérateur sur les ondes de tempête et sur les vagues qui causent les inondations et l'érosion. Des indices de la sévérité des conditions des glaces ont été calculés et devraient être utilisés dans les études qui tentent de démontrer ce lien sur le plan quantitatif.
Bien que cette étude n'ait pas eu pour but d'établir la corrélation exacte de la glace avec les ondes de tempête et avec l'érosion causée par les vagues, il s'agit d'une observation qualitative de l'effet modérateur de la présence de glaces. Par conséquent, nous supposons que dans un climat plus chaud à l'avenir, entraînant une diminution de la

concentration et de l'épaisseur des glaces dans le golfe du Saint-Laurent, les ondes de tempête et l'érosion causée par les vagues pourront être plus graves.

D'autres enjeux n'ont pas été traités dans la présente étude. Il s'agit notamment des dommages directs causés par la glace qui est transportée sur la côte par la tension du vent et la pression des glaces, comme pendant la tempête du 21 janvier 2000; et des conséquences de la perte potentielle de la barrière de protection saisonnière qu'offre la glace de rive, perte entraînée par le futur réchauffement climatique.

2.2.3 Modélisation des ondes de tempête et des conditions météorologiques

Au cours de cette étude, nous avons élaboré, face au risque d'inondation sur la côte du Nouveau-Brunswick, une stratégie qui repose sur les observations du niveau de la mer, l'analyse extrémale et un modèle d'ondes de tempête. Elle demandait que soient installés deux nouveaux marégraphes, pour fournir des données indépendantes sur le niveau de la mer afin de tester le modèle, et qu'on analyse les observations du niveau de la mer faites au cours du dernier siècle. Nous nous sommes beaucoup attachés à rendre l'information utile pour des non-scientifiques. Par exemple, nous avons conçu un site Web à accès libre pour fournir au grand public des prévisions d'inondation quotidiennes. Nous avons aussi développé de nouvelles manières de visualiser le risque d'inondation, qui puissent être facilement comprises par les intéressés.

Les deux nouveaux marégraphes ont été installés à Pointe-du-Chêne et à Wood Island, afin de recueillir des données sur des endroits pour lesquels on ne disposait pas d'assez d'observations pour évaluer avec précision la performance de notre modèle d'ondes de tempête. Une analyse ultérieure donne à penser que les prévisions d'une journée issues du modèle pour ces marégraphes sont exactes à moins de 10 cm près.

Une reconstitution sur 40 ans des ondes de tempête a été effectuée pour le nord-ouest de l'Atlantique afin de quantifier la période de récurrence de niveaux marins extrêmes. Il a été encourageant de constater que l'écart type de l'erreur de la reconstruction (les écarts entre les différentiels observés des marées et les ondes reconstruites par le modèle) est de l'ordre de 8 cm et se compare bien avec l'erreur habituelle de prévision opérationnelle. Les reconstitutions des ondes de tempête présentaient de plus les mêmes variations saisonnières et interannuelles de l'écart type que les différentiels observés. Ayant fait la preuve de la valeur de la reconstruction, nous avons réalisé des cartes de l'écart type des ondes, par saison, pour le nord-ouest de l'Atlantique. Comme nous nous y attendions, la variance des ondes était maximale en automne et en hiver. Nous avons également montré que les régions présentant la variance des ondes la plus élevée étaient le sud du golfe du Saint-Laurent et la côte est de Terre-Neuve.

Pour estimer la fréquence des niveaux marins totaux extrêmes (par opposition aux ondes extrêmes), nous avons fait intervenir la marée et d'autres processus physiques non résolus par le modèle d'ondes de tempête. Il est à cet égard important de remarquer que l'approche adoptée ici ne demande que quelques années d'observations horaires du niveau de la mer pour estimer les niveaux de récurrence pluridécennaux du niveau de la mer total. Dans l'ensemble, les niveaux de récurrence sur 40 ans prévus pour le niveau de la mer total (marée plus onde) se situent à une dizaine de centimètres des niveaux de

récurrence sur 40 ans observés. La méthode a également été adaptée pour calculer la période de récurrence d'épisodes extrêmes pour une saison donnée.

Il est difficile d'évaluer les changements de fréquence et d'intensité des tempêtes (selon les scénarios de changement climatique); il faudrait à terme se baser pour cela sur des scénarios fiables de changement climatique issus de modèles du climat du globe. Étant donné que nous ne disposions pas de champs de forçage ramenés à cette échelle, nous avons effectué certaines études de sensibilité de l'effet des changements de la distribution des ondes sur la fréquence des niveaux marins totaux extrêmes et en avons comparé les impacts à ceux de l'élévation du niveau de la mer. Nous avons trouvé que des changements significatifs de l'activité cyclonique, représentés par de grands changements de la distribution des ondes de tempête, avaient moins d'impact sur la période de récurrence de niveaux marins extrêmes que l'importante élévation du niveau de la mer prévue pour certaines zones de la région à l'étude (p. ex. la plate-forme néo-écossaise). On ne devrait pas en conclure que des changements de l'intensité des tempêtes n'auraient pas d'impact sur la période de récurrence des épisodes extrêmes. L'étude de sensibilité suggère plutôt que, dans les régions où l'élévation du niveau de la mer prévue pour le prochain siècle est considérable (de l'ordre de 1 m), elle entraînera à elle seule un abaissement spectaculaire de la période de récurrence des épisodes extrêmes.

Grâce à la disponibilité d'un modèle altimétrique numérique (MAN), on a pu opérer une réduction d'échelle sur les résultats d'une analyse extrémale pour réaliser des cartes de la période de récurrence de l'étendue des inondations. Les cartes de la période de récurrence présentées ici ont l'avantage de la simplicité. Elles sont faciles à comprendre et permettent de visualiser rapidement quelles zones sont le plus menacées par les inondations. Elles constituent donc, pour les planificateurs et responsables des politiques, un bon outil pour identifier les zones où il faudrait limiter l'aménagement, mettre en place des mesures d'adaptation et envisager une gestion de l'écosystème.

On trouvera à la section 5.0 du rapport principal (Annexe A) un ensemble de cartes des périodes de récurrence, pour des régions proches de la baie de Shediac. La méthodologie utilisée pour calculer ces cartes repose sur les niveaux de récurrence extrêmes calculés à partir de l'enregistrement du niveau de la mer de Shediac. Pour les autres régions, des cartes ont été produites pour représenter les étendues d'inondation de la tempête du 21 janvier 2000, pour le niveau de la mer actuel et dans un scénario d'élévation de 60 cm du niveau de la mer. On les trouvera à la section 5.0 du rapport principal (Annexe B).

À noter que, dans la baie de Shediac, le niveau de récurrence de 40 ans des ondes de tempête devrait devenir plutôt un niveau de récurrence de 5 ans dans un scénario d'élévation du niveau de la mer de 60 cm, conditions qui devraient être atteintes en 2100.

2.2.4 Modèle altimétrique numérique LiDAR et cartographie des risques d'inondation

La cartographie par LiDAR implique l'émission depuis un aéronef d'impulsions laser orientées vers la Terre et la mesure du temps requis par celles-ci pour revenir à leur source. Le balayage laser est réalisé par la répétition rapide de l'impulsion laser et la

déflexion du faisceau perpendiculairement à la trajectoire de vol à l'aide d'un miroir oscillant, ce qui produit un motif en zigzag de points laser sur les surfaces au sol exposées au rayonnement.

Des sondages LiDAR effectués en 2003 et en 2004 dans le sud-est du Nouveau-Brunswick ont servi de base à un modèle altimétrique numérique (MAN) à haute résolution qui illustre les zones inondables de la plupart des secteurs côtiers visés. D'autres produits LiDAR, à savoir des modèles numériques de surface (illustrant les bâtiments et les arbres) et des cartes de rétrodiffusion, ont également été créés pour les secteurs visés. Ces levés ont respecté les spécifications d'exactitude et fourni un échantillonnage de haute résolution le long du littoral, éléments nécessaires pour l'établissement de MAN permettant de cartographier les risques d'inondation et la profondeur de l'eau lors de l'inondation. Les aires inondées et les profondeurs de l'eau associées à l'onde de tempête de janvier 2000 ont été qualitativement validées par des visites sur le terrain là où les niveaux d'eau atteints lors de cet événement sont connus. L'aire inondée associée à la tempête de janvier 2000 concorde généralement avec le modèle, tout comme la profondeur de l'eau, qui correspond généralement à 10 cm près aux profondeurs d'eau observées. Les données altimétriques du MAN sont celles du Plan de référence altimétrique du Canada 1928 (CGVD28), c'est-à-dire que le zéro orthométrique se trouve à une vingtaine de centimètres au-dessous du niveau moyen de l'eau mesuré par le marégraphe de Pointe-du-Chêne.

La trajectoire de l'eau dans les basses terres situées du côté terre des ponts-jetées et d'autres ouvrages connexes a été modélisée à l'aide de méthodes innovatrices, ce qui a permis de déterminer l'étendue possible des inondations à des intervalles de 10 cm jusqu'à un niveau d'eau correspondant à 4 m au-dessus du NMM. Ceci a permis de produire des animations et des simulations quasi continues. Cette capacité de générer une séquence complète de niveaux d'eau offrira aux planificateurs de mesures d'urgence un accès à davantage d'information pour la conception de plans d'urgence et de mesures d'adaptation aux changements climatiques.

Les levés LiDAR répétés à la Dune de Bouctouche ont permis d'évaluer la valeur de cette technologie pour la mesure des changements dans un système dunaire. De nombreuses variations ont été cartographiées entre les MAN de 2003 et celui de 2004. Les changements de la morphologie de la dune sont dus à l'importante tempête des 19 et 20 février 2004, qui a entraîné des niveaux d'eau plus élevés que la normale. La précision de la technologie LiDAR permet de détecter des variations décimétriques de l'altitude des entités côtières, comme le montre l'érosion des crêtes dunaires révélée par la présente étude.

En résumé, les cartes topographiques établies par LiDAR aéroporté ont permis de produire le MAN à haute résolution nécessaire à l'évaluation des risques d'inondation et d'érosion pour toutes les autres composantes du projet.

2.2.5 Érosion des côtes

Le sud-est du Nouveau-Brunswick est une région de relief bas reposant sur un substrat gréseux plat et friable. Comme on le décrit dans la section 2.2.1, la région a été ennoyée par la mer juste après la déglaciation, après quoi les terres se sont relevées et le niveau relatif de la mer a baissé pour exposer de grandes étendues du plancher marin du détroit

de Northumberland. Depuis 8 500 ans, le niveau de la mer remonte par rapport aux terres, faisant graduellement reculer le trait de côte dans un processus à long terme d'inondation et d'érosion des côtes. Il n'y a donc rien de nouveau dans la tendance au recul côtier observée dans les récentes décennies, mais l'impact sur l'habitation et l'infrastructure humaines augmente à mesure que s'accélèrent les aménagements en bord de mer.

Le taux d'érosion des côtes est surtout une fonction du niveau moyen de la mer (régi par l'élévation relative du niveau de la mer), du forçage des tempêtes et des vagues, de l'apport de sédiments et de la forme et de la réponse de la zone littorale (morphodynamique de la côte). Quand il n'y a pas d'apport excessif de sable, toutes choses étant égales par ailleurs, le taux de recul des côtes a des chances d'être corrélé avec le taux d'élévation relative du niveau de la mer.

Bien qu'il y ait de grandes quantités de sable sur la côte du Nouveau-Brunswick, une grande partie est stockée dans des dunes littorales (les plus importantes du Nord) ou dans de grandes bermes de marée (les plus grandes du sud-est). Les volumes de sable présents dans la zone littorale immédiate sont limités. Certains sites, comme l'embouchure des havres de Shemogue et de Little Shemogue, présentent des complexes à barres et bermes multiples sur la façade littorale intérieure, mais ils sont minces et les plages elles-mêmes le sont invariablement. C'est pourquoi, malgré l'énergie limitée des vagues, il peut se produire des changements rapides du trait de côte lorsque les tempêtes passent par-dessus et ouvrent des brèches dans les plages et les barrières basses. De vieilles cartes mettent en évidence que certaines anciennes flèches et plages-barrières, comme dans les régions de Robichaud et de Cocagne, ont disparu, ne survivant que sous la forme de hauts-fonds sur la façade littorale. La crête de sable basse cartographiée dans 8 à 10 m d'eau au large de Pointe-Sapin est considérée comme une telle plage-barrière relique abandonnée sur la plate-forme intérieure.

La présente étude a montré que la forme et l'étendue de certaines flèches de la région de Shemogue ont connu des changements rapides dans les 60 années couvertes par l'enregistrement des photos aériennes (soit depuis 1944), et que d'autres de la même région (plage Grants) sont restées stables. Le grand système de flèches et d'îles-barrières dans le parc national Kouchibouguac présente de hautes dunes qui ne peuvent pas être franchies par la mer et qui agissent comme un tampon contre les assauts des vagues de tempête. Cependant, il existe un certain nombre de basses terres où des passes se sont ouvertes et fermées à diverses époques au cours du dernier siècle, causant des changements soudains qui ont modifié la stabilité de la côte et les conditions de l'habitat, tant sur la barrière même que dans les lagunes, marais et autres habitats côtiers adjacents. Malgré la hauteur des dunes dans la région, de grandes sections du système de barrières de Kouchibouguac restent assez basses pour être franchies si une tempête majeure est accompagnée d'une onde et de vagues élevées. Cependant, les volumes de sable sont suffisants pour limiter le taux de recul de la côte. La grande flèche à pointe libre de Bouctouche (la Dune de Bouctouche) a des dunes de hauteur modérée et de multiples crêtes de dune, surtout dans sa partie distale. D'autres portions du système présentent des dunes étroites, voire pas de dune du tout. Dans ces zones, surtout sur la partie proximale (en amont de la dérive), il y a eu des débordements, ouvertures de brèches et migrations de la barrière vers les terres en réponse à

d'importantes tempêtes ou périodes de tempêtes depuis que les premières photos aériennes ont été prises dans les années 1940 et longtemps auparavant.

Certaines sections de la côte se composent de falaises basses de grès ou de till, qui peuvent atteindre quelques mètres de hauteur, et présentent généralement des taux d'érosion à long terme (pluridécennaux) compris entre 0,1 et 0,4 m par an. Même si ces taux sont bas, certaines routes et immeubles ont été partiellement détruits ou abandonnés (p. ex. dans la région de Cap-Lumière). Les impacts de l'érosion sur les infrastructures et immeubles, y compris des maisons, sont importants par endroits. Au cours du dernier siècle, à plusieurs endroits, des maisons et d'autres bâtiments ont été endommagés ou détruits par des vagues de tempête et des glaces de mer déplacées par la tempête. De grandes sections de la côte sont maintenant protégées par des ouvrages longitudinaux, talus ou autres structures, et ce « durcissement » de la côte s'est accéléré depuis 20 ans. Toutefois, l'efficacité à long terme de ces mesures d'adaptation demeure douteuse et, pour nombre d'entre elles, l'entretien, la reconstruction ou le remplacement visant à maintenir leur fonction protectrice exigeront des investissements substantiels.

Sur les plages, flèches et barrières, les taux de changement du trait de côte sont parfois négatifs, parfois positifs. Des taux d'érosion supérieurs à 0,5 m par an sont courants sur de nombreuses plages, et certains sites en présentent même de plus élevés. Le point d'ancrage de la flèche de Pointe-aux-Bouleaux a reculé en moyenne de 2,4 m par an entre 1944 et 2001. Dans d'autres cas, l'apport en sable local est suffisant pour maintenir la position du trait de côte ou en causer une progradation vers la mer. Certaines flèches ont allongé grâce au dépôt sur leurs extrémités distales, montrant des traces typiques d'érosion, de débordement et de progression graduelle, ou de dérivation dans la section proximale étroite (près du point d'ancrage à la côte) et de dépôt-engraissement à l'extrémité distale (en aval de la dérive). De façon très générale, c'est ce qu'on observe à la Dune de Bouctouche. D'autres systèmes, comme la plage Grants (côté est du havre de Little Shemogue), ont maintenu un équilibre dynamique : périodes de fragmentation des dunes entrecoupées de dépôt. Ces systèmes peuvent continuer à accumuler du sable de sources situées en amont dans l'embouchure de la baie ou sur la plate-forme intérieure. Dans d'autres cas, quand les volumes de sable sont faibles, la flèche peut être tronquée ou fragmentée. À Cap-Bimet, l'extrémité de la flèche a complètement disparu. Celle du côté est du havre de Shemogue (flèche de la pointe de Shemogue) a été ouverte d'une brèche avant 1971 et a fini par se fragmenter en deux en 2001, exposant au lessivage et à l'érosion des vagues le grand marais salé qui se trouvait derrière elle. La vulnérabilité de cette flèche au débordement et à la fragmentation a été accrue par son exposition au nord-ouest, la faible hauteur de sa crête, son étroitesse et son volume de sable réduit. D'importants changements survenus dans la morphologie et l'étendue de la flèche opposée (sur le côté ouest de l'estuaire) ont aussi pu jouer un rôle dans cette situation. Ces observations soulignent l'importance des changements de la morphologie des côtes (qui peut modifier à certains endroits les effets du fond et l'énergie des vagues), des vagues et ondes de tempête associées à de fortes tempêtes survenant individuellement ou en groupes, et du préconditionnement par l'érosion des dunes ou d'autres changements de la zone littorale. Certaines combinaisons de ces facteurs peuvent déclencher un changement rapide. Si du sable est disponible et ajouté au site, les brèches peuvent être réparées (on en veut pour exemple le remplissage de l'ancien chenal dragué traversant la Dune de Bouctouche), mais des changements morphologiques peuvent mener à une rétroaction positive, qui accroît la susceptibilité aux

dommages causés par les tempêtes. La flèche du Petit-Cap dans le havre de Shemogue a construit une crête entièrement nouvelle et réalignée à l'extérieur de la flèche de 1944, alimentée par l'érosion des plages situées en amont de la dérive, à des taux de 0,2 à 0,8 m par an.

Ces résultats montrent la grande variabilité de la réponse des côtes au forçage des tempêtes ainsi que les changements graduels découlant de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique. Il est presque impossible d'effectuer des projections communes de la réponse sur l'ensemble de la zone à l'étude. Par contre, il existe plusieurs points communs de compréhension qui peuvent être appliqués à l'analyse des sites pris individuellement.

On peut s'attendre à ce que, à la plupart des sites où il y a actuellement de l'érosion, celle-ci se poursuive à l'avenir, probablement à des taux croissants. C'est pourquoi la planification et l'aménagement ne devraient pas reposer sur les seuls taux d'érosion historiques, mais prévoir une marge de retrait supplémentaire correspondant à une érosion plus rapide pendant la durée de vie utile d'une structure ou d'un autre aménagement.

Le taux de subsidence dans la région baisse du sud-est vers le nord-ouest. Les taux les plus importants de changement du niveau relatif de la mer toucheront donc le sud-est, qui est aussi la région où les barrières et les volumes de sable sont les plus petits, ce qui les rend plus sensibles à un changement rapide. Les systèmes plus grands, avec des dunes plus hautes, présents dans cette région seront plus stables, mais l'accélération de l'élévation du niveau de la mer, la présence moindre de glace de mer ou d'autres changements liés au climat peuvent quand même en accroître la sensibilité. On peut s'attendre à une certaine augmentation des taux d'érosion des falaises, mais ceux-ci devraient rester substantiellement inférieurs à 0,5 m par an dans la plupart des endroits, particulièrement où le grès est exposé à la base des falaises.

Plus au nord, dans les régions de Bouctouche à Kouchibouguac, la présence de volumes de dunes beaucoup plus grands et de crêtes plus hautes devrait amortir en partie l'augmentation de l'énergie des vagues. Cependant, certaines régions sont très sensibles à l'érosion ou au débordement, dont la partie proximale de la Dune de Bouctouche, où une succession de tempêtes qui a commencé en 2000 a écrêté la dune et entraîné plusieurs épisodes de débordement, qui ont déposé des nappes de sable sur la crête de la barrière et dans le marais situé en arrière. Une importante brèche s'est aussi ouverte à mi-chemin de la flèche. Il y a déjà eu par le passé de grandes brèches de ce genre, surtout au début des années 1940, et des successions rapides (sur quelques années) de fortes tempêtes en sont un facteur important. Cependant, l'accélération de l'élévation relative du niveau de la mer et d'éventuelles augmentations de l'intensité des tempêtes peuvent faire croître la fréquence et la gravité des impacts à l'avenir. Il n'y a pas de risque immédiat que la flèche se détache à Bouctouche, mais les taux moyens les plus élevés d'érosion du trait de côte le long de la flèche depuis 1944 (près de 2 m par an dans une section) se situent entre les kilomètres 6,0 et 8,5 de la flèche, juste avant la transition en amont de la dérive vers une progradation à long terme. Nous en concluons qu'on ne peut donc pas exclure la possibilité que la flèche se détache à un horizon de 30 à 50 ans.

Il y a déjà eu dans la région des pertes de marais salés dues à un remplissage excessif à des fins d'aménagement. Le rétrécissement littoral est lui aussi déjà une source de préoccupation à un certain nombre de sites de la zone à l'étude, lorsque les routes et les remblais forment des obstacles en dur à l'expansion des marais. Ces observations donnent à penser que certains marais salés de la région pourraient perdre en superficie à cause de l'érosion de leur façade maritime, de la dégradation de leur surface et de l'expansion graduelle des marais bas au détriment des marais élevés. Les impacts de cet état de choses pour de nombreux habitats côtiers seront étudiés plus en détail à la section 2.2.6.

Le succès de la gestion de l'érosion des côtes dans un climat en évolution exige que soient pris en compte tous les aspects du système côtier dans la région en question. Il faudra donc analyser la cellule côtière concernée et son bilan sédimentaire, ainsi que le forçage environnemental (niveau de la mer, tempêtes, ondes de tempête, vagues, vents et glace) et les interactions entre les divers éléments de la côte, y compris la totalité du système, au-dessus comme au-dessous de l'eau. Cette approche intégrée s'impose pour assurer une pleine compréhension du système, de manière que les mesures d'adaptation adoptées à un endroit ne soient pas contre-productives ailleurs. Les sections 2.2.8 et 2.2.9, plus loin dans le présent rapport, suggèrent d'autres considérations pour l'élaboration de stratégies d'adaptation adéquates et efficaces.

2.2.6 Impacts sur les écosystèmes

Les recherches sur les impacts de l'élévation du niveau de la mer et des changements climatiques mettaient l'accent sur l'habitat côtier et les espèces sauvages qui y sont associées. En raison de la courte durée des travaux, il a fallu consulter des sources d'information sur les ressources fauniques et leur habitat. Il est à espérer que cette étude donnera lieu à d'autres recherches connexes qui incluront une analyse des impacts de l'élévation du niveau de la mer et des changements climatiques.

D'après les résultats de l'étude, un niveau d'inondation de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN (approximativement le présent niveau moyen de la mer), comme cela a été le cas le 21 janvier, 2000, aurait pour effet d'inonder 1 397 ha de zones sèches, 1 634 ha de marais côtiers, 388 ha de dunes, 159 ha de marécages et 226 ha de plages. Suivant ce scénario, le niveau de l'eau serait de 0,84 m dans les marécages, de 1,13 m sur les dunes, de 1,58 m sur les plages et de 1,64 m dans les marais côtiers. Ces analyses révèlent que la hausse future du niveau de l'eau causée par des ondes de tempête et par l'élévation du niveau de la mer aura des incidences sur la plupart des secteurs de l'habitat côtier.

En l'absence de données suffisantes sur les taux d'accrétion verticale dans les marais salés et la dynamique des sédiments sur les plages et les dunes du détroit de Northumberland, les auteurs ont procédé à une analyse rétrospective de photos aériennes dans cinq parcelles d'étude. Ces analyses ont fourni des indications sur la réaction passée des marais, des dunes et des plages à des tempêtes et à des changements du niveau de la mer. Elles serviront de point de départ pour l'étude des réactions possibles de ces habitats à des phénomènes semblables à l'avenir.

Au cap Jourimain, le marais salé couvert de végétation a perdu 28 % (88 ha) de sa superficie entre 1944 et 2001. Ce changement était principalement attribuable à la construction, en 1966, d'une route qui a physiquement détruit une partie du marais et en a modifié le régime hydrologique. À Shemogue, la perte de superficie du marais salé s'élevait à 5 % (15 ha) de 1944 à 2001, et les eaux libres occupaient 9 ha de plus (18 %). Ces changements viennent corroborer l'hypothèse selon laquelle l'accrétion verticale et la migration horizontale du marais ne suffiraient pas à compenser l'élévation du niveau de la mer. Dans la parcelle d'étude du parc de l'Aboiteau, la superficie du marais salé avait diminué de 27 % (23 ha) de 1944 à 2001, et les terres humides côtières présentaient des traces visibles de remplissage sur 24 ha. À Shediac, deux changements majeurs ont été apportés de 1944 à 2001 : l'aménagement d'éléments d'infrastructure sur 40 ha de terrain dans les terres humides côtières et la construction d'un ouvrage longitudinal de défense des côtes de 9 100 m, entraînant une perte de 21 % de la superficie du marais salé (19 ha). Dans la région de Cocagne, le marais salé a perdu 35 % de sa superficie (19 ha), et 19 ha de terres humides côtières ont été remplies entre 1944 et 2001.

Dans toutes les parcelles d'étude, les plages et les dunes occupaient une superficie moins grande en 2001 qu'en 1944. Des deux types d'habitat, ce sont les plages qui ont perdu le plus de terrain. Dans le cas du cap Jourimain, les plages et les dunes avaient perdu 22 % de leur superficie; dans la parcelle d'étude de Shemogue, la perte s'élevait à 8 %; dans celle du parc de l'Aboiteau, elle atteignait 12 %; dans le cas de Shediac, la superficie des plages et des dunes avait diminué de 32 % entre 1944 et 1971; seule une faible perte de superficie supplémentaire a été enregistrée de 1971 à 2001; à Cocagne, la superficie de la plage avait diminué de 40 %. Les travaux d'extraction du sable pour la production d'agrégats de 1944 à 1971 ont probablement eu un impact sur la superficie de la plage de cette région, de même que l'expansion des structures de durcissement du littoral. Compte tenu des diminutions déjà observées dans les 60 dernières années, toute perte supplémentaire occasionnée par l'élévation du niveau de la mer aggraverait la situation aussi bien du point de vue de l'habitat faunique que de celui des loisirs. La popularité croissante des plages comme aires de loisir et la diminution de leur superficie sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer et du réchauffement de la planète ne feraient qu'intensifier les pressions exercées par l'aménagement et les perturbations anthropiques sur l'habitat faunique côtier.

Dans les parcelles d'étude du parc de l'Aboiteau, de Shediac et de Cocagne, les auteurs ont constaté une augmentation substantielle de la superficie du littoral durci en 2001 comparativement à des périodes antérieures. En 2001, la surface durcie des plages mesurait 8 324 m dans le parc de l'Aboiteau, 9 408 m à Shediac et 13 287 m à Cocagne. Le durcissement du terrain a des incidences sur la superficie du littoral qui peut servir aux loisirs et à la faune. Ce phénomène diminue également la quantité de sédiments, ce qui pourrait entraîner une diminution supplémentaire de la superficie des plages à l'avenir.

Dans l'ensemble, les résultats de cette analyse rétrospective indiquent que, pour bien comprendre et gérer les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes côtiers, il faut tenir compte des effets de l'activité humaine. En outre, ils révèlent que l'élévation du niveau de la mer risque de réduire encore davantage la superficie des marais salés, des plages et des dunes dans des secteurs où l'activité humaine a déjà causé des pertes substantielles à cet égard.

Les auteurs de l'étude ont établi des liens entre la zonation des espèces de plantes vasculaires et l'altitude du terrain dans les marais salés qui longent le détroit de Northumberland, et ils les ont comparés aux données enregistrées pour la baie de Fundy. Les résultats indiquent que l'altitude du terrain peut servir à prédire les impacts de l'élévation du niveau de la mer sur les communautés végétales des terres humides côtières.

Pour évaluer les impacts possibles de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête sur les colonies nicheuses de Laridés et de sternes, les auteurs ont déterminé quelles colonies seraient inondées selon différents scénarios d'élévation du niveau de la mer. Parmi les lieux de nidification connus de la zone d'étude, seule la plage Bar-de-Cocagne serait inondée au niveau moyen de la mer avec une élévation du niveau de la mer de 0,60 m. Cependant, 11 lieux de nidification sur 14 seraient touchés par une onde de tempête de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN. La plus grande colonie de Sternes pierregarins de la zone d'étude (les îles aux Sternes, dans le parc national Kouchibouguac), qui comptait plus de 6 020 nids en 2005, serait inondée à un niveau d'eau de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN**.** Une tempête estivale de l'ampleur de celle du 21 janvier, 2000 aurait donc un effet dévastateur sur le succès de reproduction de la population de Sternes pierregarins dans la partie néo-brunswickoise du golfe du Saint-Laurent. D'autre part, une élévation accélérée du niveau de la mer conduirait à une probabilité accrue pour que de tels niveaux d'eau se produisent.

L'étude a permis de déterminer les impacts possibles de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête sur les populations de harles huppés qui nichent sur quatre îles-barrières extracôtières du parc national Kouchibouguac. La plupart des nids se trouvaient au-dessus du niveau de 0,60 m mais beaucoup plus bas que le niveau d'inondation maximum observé de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN. Les impacts des ondes de tempête sur les harles huppés pendant la période de nidification ne sont pas entièrement hypothétiques : la tempête qui s'est abattue sur la région en 1993 a inondé de nombreux nids et a réduit à 22 % la reproduction pour l'année. L'élévation du niveau de la mer, conjuguée à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes estivales, aurait des répercussions sur la reproduction de cette espèce.

L'effectif de la population de pluviers siffleurs qui nichent dans la région de l'Atlantique n'était estimé qu'à 255 couples en 2003. Les auteurs ont étudié la superficie et la qualité de l'habitat de nidification de cette espèce en voie de disparition, afin de prédire les impacts de l'élévation prévue du niveau de la mer. Leurs analyses révèlent que les plages actuellement occupées par l'espèce sont plus longues et plus larges que les autres plages et qu'elles ont une plus grande surface de sable. De plus, elles ont un plus grand nombre de brèches dans leurs dunes, sont moins aménagées et donnent accès à des baies, à des émissaires ou à des étangs éphémères. Les changements survenus au fil des ans ont été cartographiés et mesurés sur deux plages de la région de Shemogue. Aucune tendance évidente n'a été détectée. Les analyses ont plutôt révélé des variations temporelles qui étaient probablement liées aux tempêtes. On sait que le Pluvier siffleur préfère les habitats de stade pionnier créés par les brèches des dunes et que les tempêtes qui transforment les flèches en îles améliorent l'habitat de l'espèce. Une certaine hypothèse veut que l'élévation du niveau de la mer et les changements climatiques vont contribuer à une réduction de la superficie de l'habitat de prédilection du Pluvier siffleur; cette hypothèse doit être examinée plus à fond et quantifiée. Le fait que

l'espèce occupe surtout des plages abritées souligne l'importance de gérer les impacts humains aujourd'hui et à l'avenir, à l'heure même où la société réagit à l'élévation du niveau de la mer. Pour être en mesure de bien gérer l'habitat du Pluvier siffleur, il faut savoir quelles plages risquent d'être touchées par l'élévation du niveau de la mer.

De 1985 à 2005, les tempêtes estivales ont exercé une grande influence sur le nombre de tentatives de nidification et sur la reproduction des pluviers siffleurs adultes dans le parc national Kouchibouguac. En 1985, un grand nombre de nids ont été inondés, et aucun oisillon n'a atteint l'âge du premier envol. Le 8 juin 1985, jour de tempête, le marégraphe d'Escuminac avait indiqué des niveaux d'eau dépassant de 2 m le zéro des cartes. En 1991, le taux de reproduction était inférieur à la moyenne, et cette baisse a été attribuée à une grosse tempête qui a traversé la région le 14 juin 1991, journée où le marégraphe d'Escuminac indiquait des niveaux d'eau de 2,12 m. Le même phénomène s'est produit en 1993. Après une tempête où le niveau d'eau enregistré à Escuminac était de 2,07 m, l'inondation de nombreux nids a été signalée sur le terrain. L'examen des niveaux d'eau historiques à la Pointe Escuminac révèle que neuf ondes de tempête d'au moins 0,6 m sont survenues pendant la saison de nidification du Pluvier siffleur entre 1964 et 2004. Une de ces tempêtes a eu lieu de 1964 à 1969, une autre dans les années 1970, trois autres dans les années 1980, et les quatre dernières dans les années 1990. Aucune onde de tempête n'a encore été enregistrée depuis le début des années 2000. Assumant une coïncidence avec les marées hautes, quelques-unes, ou possiblement plusieurs de ces tempêtes auraient eu un impact sur la reproduction dans les 20 dernières années et peut-être également sur la dynamique des populations. À l'heure actuelle, il n'existe aucune preuve statistique attestant que la fréquence des tempêtes du mois de juin augmente dans la partie sud du golfe du Saint-Laurent. La réduction de l'intervalle des tempêtes estivales aurait des effets néfastes sur les populations de pluviers siffleurs et pourrait nécessiter la mise en place de mesures pour protéger les nids et les œufs contre les inondations.

Les auteurs ont procédé à une analyse de la dynamique des populations de pluviers siffleurs afin de comprendre les effets des changements climatiques et de la modification de l'habitat sur l'espèce. Ces analyses donnent à penser que, de 1998 à 2003, la population du Sud de la Nouvelle-Écosse était stable (+0,4 % par an) et que celle du golfe du Saint-Laurent était en baisse (-3,5 % par an). La baisse démographique prévue pour le golfe était essentiellement due à un faible taux de survie des juvéniles au-delà du premier envol. Il importe donc de quantifier les menaces qui guettent ces oiseaux après qu'ils ont quitté le lieu de nidification. De même, la croissance démographique des deux sous-populations était en grande partie fonction des changements dans le taux de survie des adultes. On connaît très peu les facteurs qui menacent la survie des pluviers siffleurs pendant la migration et l'hivernage. Il semblerait que les efforts déployés pour protéger l'espèce contre les prédateurs et les perturbations humaines sur les plages qui servent à la nidification ont produit de bons résultats et que les variations annuelles de la reproduction ou de la qualité de l'habitat qui sont engendrées par le climat ne limitent pas la croissance démographique à l'heure actuelle. Les auteurs suggèrent que les futurs programmes de rétablissement du Pluvier siffleur prévoient des mesures pour quantifier et gérer les facteurs essentiellement inconnus qui causent la mortalité des adultes et des juvéniles après la saison de nidification, tout en maintenant le niveau actuel de protection de l'habitat de nidification.

Dans l'ensemble, les analyses révèlent que les écosystèmes côtiers sont naturellement capables de s'adapter à la variabilité du climat et des niveaux d'eau. De tout temps, les modifications et les perturbations d'origine humaine ont un plus grand impact sur l'habitat et les populations fauniques des zones côtières que l'élévation du niveau de la mer et le réchauffement de la planète. Les impacts futurs de ces deux phénomènes pourraient être exacerbés par l'aménagement ou les projets de protection des infrastructures. Il faut continuer de surveiller les profils climatologiques, les niveaux d'eau, les populations fauniques et l'habitat pour être en mesure d'élaborer des stratégies d'adaptation qui protégeront l'infrastructure humaine et l'habitat faunique contre la hausse des niveaux d'eau et les ondes de tempête.

2.2.7 Impacts socioéconomiques

L'élévation du niveau de la mer, l'erosion des côtes et l'augmentation d'intensité et de fréquence des ondes de tempête ont des impacts socioéconomiques importants sur les communautés côtières, les écosystèmes et différents secteurs économiques. Cette analyse a évalué certains des coûts et des avantages de l'adaptation à ces impacts par l'entremise d'un engagement des communautés ainsi qu'une approche par études de cas.

Un élément clé de ce projet est l'engagement de la communauté et le renforcement des connaissances et de la compréhension, à l'échelle locale, du processus de changement du littoral et de l'adaptation à celui-ci. Des résultats clés de ce processus d'engagement des communautés incluent :

- Les premières entrevues avec les communautés ont montré que les attitudes face aux impacts des phénomènes extrêmes étaient principalement réactives; il est pourtant beaucoup plus de l'intérêt des communautés d'adopter une approche plus proactive.

- Le processus d'engagement des communautés a permis à cette recherche de répondre plus efficacement à leurs besoins et de proposer des recommandations d'adaptation pertinentes. Il a aussi fourni l'occasion de les sensibiliser davantage au changement climatique.

- Les communautés dans la zone à l'étude devront s'approprier les résultats et les interpréter dans leur contexte propre, et collaborer avec les divers intervenants de décideurs pour renforcer une capacité d'adaptation face aux conséquences du changement climatique.

On a choisi des études de cas afin de représenter les types d'impacts et de problèmes que peut entraîner le changement climatique et de faciliter une analyse détaillée. Les informations et les données utilisées pour estimer les impacts économiques se limitent à la région géographique de chaque étude de cas. Bien que la méthodologie et les approches utilisées dans cette analyse soient transférables, les résultats ne sont pas directement applicables à d'autres endroits.

Les effets du changement climatique sont de plus en plus préoccupants pour les exploitants d'entreprises touristiques du sud-est du Nouveau-Brunswick, car les secteurs de l'écotourisme et du tourisme culturel se sont développés rapidement dans les dix dernières années, et les activités touristiques sont perturbées par l'érosion et les ondes de tempête lors des tempêtes extrêmes. On a choisi la région de Bouctouche pour évaluer les impacts économiques des changements climatiques sur l'industrie touristique. Ce cas d'étude a estimé les avantages économiques après que l'industrie du tourisme a mis en œuvre des mesures d'adaptation À l'inverse, il a estimé les pertes économiques après que le secteur du tourisme a échoué dans sa tentative d'atténuer les impacts de l'élévation du niveau de la mer, de l'erosion des côtes et des ondes de tempête ou de s'en protéger. Des résultats clés de l'étude de cas de Bouctouche incluent :

- De nombreuses personnes qui visitent Bouctouche reconnaissent que le changement climatique a des répercussions sur toutes les communautés côtières de l'est de l'Amérique du Nord. Grâce à des stratégies d'adaptation et d'atténuation réfléchies, le secteur du tourisme de Bouctouche pourrait connaître une croissance économique. En revanche, ne pas réussir à s'adapter au changement climatique pourrait se traduire par des pertes dans l'industrie touristique. La prise de mesures d'adaptation appropriées sera un élément essentiel pour déterminer si les conséquences du changement climatique feront croître ou décliner l'industrie du tourisme dans la région de Bouctouche.

- Dans un scénario optimiste où le secteur du tourisme réussit à gérer les impacts du changement climatique au moyen de stratégies d'adaptation, on note dans le comté de Kent et au Nouveau-Brunswick une possibilité de gains économiques, comparé aux niveaux de référence. L'emploi dans le comté de Kent et au Nouveau-Brunswick pourrait augmenter de 8% à 18%, et l'accroissement du PIB dans le comté de Kent de l'ordre de 11% à 19%. Les recettes fiscales provinciales et fédérales pourraient éventuellement connaître une hausse de 11 % à 18 %.

- Dans un scénario pessimiste d'échec du secteur du tourisme à atténuer les impacts du changement climatique ou à s'y adapter, on note dans le comté de Kent et au Nouveau-Brunswick une possibilité de perte économique comparé aux niveaux de référence, de diminution de l'emploi de 25 % à 30 % et de chute du PIB dans le comté de Kent de 25 % à 27 %.

Les propriétés et les infrastructures qui se trouvent dans les communautés côtières sont également menacées par l'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête. À la suite de l'onde de tempête du 21 janvier 2000, déclarée catastrophe par le gouvernement fédéral, 198 réclamations pour dommages ont été déposées devant l'Organisation des mesures d'urgence du Nouveau-Brunswick (OMU), et 43 étaient admissibles à un financement, pour un total de près de 1,5 million de dollars (K. Wilmot, communication personnelle, OMU, Nouveau-Brunswick). Pour comprendre l'ampleur de ces impacts sur les communautés côtières, cette analyse a déterminé quelles propriétés risquent d'être inondées et a quantifié les coûts des dommages éventuels associés aux ondes de tempête. De plus, l'analyse a estimé certains des coûts associés aux options d'adaptation (retrait, protection et accommodement). Des résultats clés de ce cas d'étude incluent:

- Les scénarios futurs ont été élaborés par des intervenants de la communauté d'après des canevas qui décrivaient des changements aux principaux moteurs économiques. Dans le scénario optimiste, la communauté a prévu dix nouvelles zones résidentielles (valeur estimée : 114,1 M$), l'expansion de trois zones commerciales, l'agrandissement de deux marinas et l'ajout de neuf nouvelles zones vertes. Par ailleurs, dans le scénario pessimiste, la communauté a prévu cinq nouvelles zones résidentielles (valeur estimée : 26,7 M$), la fermeture de certaines entreprises commerciales, de nouveaux services publics ainsi qu'une nouvelle zone verte. Dans cette étude, les coûts des dommages aux propriétés résidentielles ont été estimés. Les nouvelles zones résidentielles identifiées, pour les scenarios optimistes et pessimistes, sont soit à aucun risque, ou à de faibles risques (moins que 0,5 m de profondeur) d'inondation, donc les coûts des dommages ont été assumés nuls.

    - Les propriétés et l'infrastructure non résidentielles dans l'étude de cas de la baie de Shediac risquent d'être inondées par les ondes de tempête. Une onde de tempête avec un niveau d'eau de 2,5 m au-dessus du zéro du MAN (comme le 21 janvier 2000) place environ 1 639 propriétés existantes de la baie de Shediac à risque d'être inondées dans une certaine mesure. La valeur estimée totale de ces propriétés est évaluée à 117,9 M$. Avec une onde de tempête donnant un niveau d'eau de 3,0 m au-dessus du zéro du MAN, environ 2 003 propriétés existantes dans la région de l'étude de cas risquent d'être inondées dans une certaine mesure. La valeur estimée totale de ces propriétés est évaluée à 139,3 M$.

    - Pour une onde de tempête donnant un niveau d'eau de 2,5 m au-dessus du zéro du MAN dans la région de l'étude de cas de la baie de Shediac, on estime que 277 propriétés résidentielles (y compris les chalets) subiraient des dommages. La valeur estimative totale de ces propriétés est évaluée à 21,7 M$. Les coûts des dommages représentent à peu près le tiers de cette valeur. Pour une onde de tempête donnant un niveau d'eau de 3,0 m au-dessus du zéro du MAN dans la région de l'étude de cas, on estime que 644 résidences risquent de subir des dommages. La valeur estimative totale de ces propriétés est évaluée à près de 48,9 M$ et les coûts des dommages à près de 17,6 M$, soit environ 36 % du total des valeurs estimatives.

    - On peut réduire au minimum les impacts de l'élévation du niveau de la mer et des inondations causées par les ondes de tempête en mettant en œuvre des stratégies d'adaptation. Lorsqu'on évalue différentes stratégies d'adaptation, l'ensemble des coûts et des avantages de chaque stratégie devrait être incorporé dans le processus de prise de décision. Même si, dans le cadre de cette analyse, on n'a pas évalué le total des coûts et des avantages d'options d'adaptation spécifiques, on a estimé certains des coûts possibles d'options d'adaptation générales. Si le retrait est une option envisagée, l'indemnisation minimum estimée requise pour 94 propriétés se classant dans les catégories d'inondation 4, 5 et 6[1] se chiffre à près de 3,4 M$ et le manque à gagner fiscal total sur les propriétés (province et municipalités) est évalué à 100 000 dollars par année.

[1] Les catégories d'inondation 4,5 et 6 représentent des profondeurs d'inondation respectivement, de >1,5-2,0m, >2,0-2,5m et >2,5m.

Quelques options de protection et d'aménagement ont également été évaluées à la lumière de consultations tenues avec différentes communautés et différents intervenants. Les coûts estimatifs d'immobilisations, d'après des gens de la communauté, s'élèvent à 1 000 dollars par mètre carré de surface de base[2] pour construire un mur de protection.

Les résultats de cette analyse ne doivent pas être interprétés au pied de la lettre, car il s'agit d'estimations qui reposent sur les meilleures informations disponibles. Par ailleurs, ils peuvent servir d'indicateurs et d'estimations de l'ampleur à des fins d'information et de sensibilisation. De plus, on peut les appliquer à des processus décisionnels locaux relatifs à la gouvernance, à la gestion des zones côtières et à l'adaptation.

2.2.8 Stratégies de mesures d'adaptation

Pour trouver le juste équilibre entre les intérêts particuliers (environnementaux, sociaux, politiques et économiques) des intervenants, il est crucial d'avoir la participation d'un large éventail d'intervenants, notamment les résidents, les leaders communautaires et les représentants gouvernementaux. Chaque intervenant apporte en effet au processus d'adaptation communautaire une expertise, une perception, des priorités et des capacités qui lui sont propres. Les stratégies d'adaptation efficaces — celles qui sont mises en œuvre et dont les objectifs respectent les valeurs locales — sont ascendantes, c.-à-d. qu'elles viennent de la communauté touchée, au lieu d'être descendantes.

Les stratégies nationales et provinciales ne peuvent être efficaces que si elles peuvent être adaptées aux conditions locales, qu'elles offrent des possibilités d'apport local et respectent les valeurs locales, et qu'elles apportent des ressources et une expertise aux communautés qui sont censées les mettre en œuvre. Même les initiatives nationales ou provinciales bien intentionnées peuvent susciter la méfiance si leur mise en œuvre au niveau local n'est pas efficace. Dans une telle situation, les objectifs de l'initiative peuvent carrément être minés.

Plusieurs éléments sont essentiels pour élaborer des réponses communautaires aux menaces que représentent l'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête : la sensibilisation à l'égard des problèmes, l'établissement d'un lien de confiance et de canaux de communication, la mise en commun de l'information et de l'expertise, et l'identification d'un champion (une personne ou un groupe) qui dirige le processus. En d'autres mots, les mesures d'adaptation communautaires consistent à constamment renforcer le prisme conceptuel, en accroissant la capacité d'adaptation de la communauté et en appliquant des pratiques exemplaires.

Lorsqu'on élabore des stratégies d'adaptation, il y a lieu de trouver un équilibre entre prendre les problèmes isolément et élaborer un plan exhaustif tenant compte de chaque dimension du problème. Un tel plan peut nécessiter beaucoup plus de recherche et d'organisation que ce que les communautés peuvent absorber, tout en arrivant à des changements utiles. Par ailleurs, la première option ne répond pas aux besoins de tous

[2] D'après des conversations personnelles avec les auteurs de cette étude et des gens des communautés.

les intervenants, et on peut aboutir à des stratégies qui portent préjudice à d'autres situations. Chaque communauté doit trouver son propre équilibre.

Les stratégies d'adaptation doivent inclure un large éventail d'approches, allant des politiques de la législation aux options faisant intervenir les technologies et l'ingénierie. Des approches qui respectent l'environnement peuvent également être efficaces et atténuer les changements, à faible coût. De plus, en sensibilisant le public et en changeant ses valeurs et ses perspectives culturelles, on peut obtenir des résultats de manière économique.

On peut citer plusieurs exemples de mesures d'adaptation dans la zone à l'étude, notamment l'abandon des terrains vulnérables à l'érosion et aux inondations et le retrait des installations côtières. Dans bien des cas, les résidences anciennes et l'infrastructure (à l'exception de l'infrastructure liée aux ports et à la pêche) étaient situées sur des hauteurs, bien en retrait de la côte. Les chalets de peu de valeur se trouvaient le long du rivage, mais ils ne représentaient que de modestes dépenses en immobilisations. Ces dernières années, le profil d'aménagement de la région a été en partie régi par la demande du marché, les consommateurs exigeant des résidences avec vue sur la mer. L'amélioration de l'infrastructure routière a favorisé un accroissement des distances entre le travail et le domicile, permettant aux travailleurs de l'économie florissante de Moncton de vivre près de la côte. Le profil d'aménagement qui en résulte est fort mal adapté aux conditions ambiantes : des résidences coûteuses construites le long des côtes, à des endroits où les glaces, les inondations, les ondes de tempête et l'érosion du littoral menacent leur stabilité et leur sécurité à long terme. De même, la demande de terres côtières a favorisé le remplissage et la mise en valeur des terres humides côtières, réduisant ainsi l'habitat disponible.

Les stratégies d'adaptation peuvent prendre de nombreuses formes et comprendre des volets qui agissent à différentes échelles. La politique provinciale sur l'aménagement des zones côtières se veut un cadre pour la gestion du littoral et la prise de mesures d'adaptation à l'échelle locale. La communication et la coordination des efforts entre les divers ordres de gouvernement, les dirigeants communautaires, les organismes locaux et les citoyens sont essentielles à la réussite de toute stratégie d'adaptation. Travaux d'ingénierie lourde et légère, réglementation de l'aménagement du territoire, adoption de politiques d'aménagement innovatrices, échange de terrains et accords institutionnels pour promouvoir l'échange d'idées – tous figurent parmi les options que peuvent envisager les collectivités pour réduire leurs impacts et leurs coûts futurs.

Les communautés ont besoin d'information, et veulent accéder à l'expertise. Même une page Web présentant simplement de l'information du type « qu'est-ce qui se passe si… » pourrait fournir les données voulues, favoriserait les communications et répondrait à de nombreux besoins.

Les chercheurs locaux des collèges communautaires et des universités peuvent établir un lien efficace entre les communautés qui commencent à s'organiser et les responsables gouvernementaux qui façonnent les politiques et les plans.

Pour que les stratégies d'adaptation aux changements climatiques soient véritablement efficaces, il faut que les collectivités directement touchées les « prennent en charge » et

en assurent elles-mêmes la gestion. Les efforts de mobilisation à l'échelle locale nécessitent l'appui des organismes d'urbanisme et des gouvernements à tous les niveaux.

2.2.9 Établissement d'une capacité d'adaptation

La zone côtière choisie pour cette étude offrait différents exemples, de l'écotourisme aux projets de développement suburbain, d'efforts communautaires qui seront touchés par les changements climatiques. L'intégration, dans l'évaluation environnementale, de la dimension humaine sous les angles des risques social et économique pourrait aider les planificateurs et les décideurs de ces communautés face aux projets futurs. Par le passé, peu de projets ont intégré ces aspects dans un Système d'information géographique (SIG) de haute précision. Cependant, tel que démontré ici, une telle approche peut permettre de mieux comprendre les liens entre les différentes composantes de l'écosystème et les communautés humaines. Son principal avantage était également de donner naissance à des recommandations sur les façons d'accroître la capacité d'adaptation des communautés et de réduire les vulnérabilités au changement climatique grâce à des outils proposés tels qu'une évaluation des impacts environnementaux (EIE) et à des stratégies telles que la protection, l'évitement ou le retrait.

Une des explications fréquentes du peu d'inclusion des impacts et de l'adaptation au changement climatique dans le processus de prise de décision et de planification de la communauté est le manque de méthodes, de données qualitatives et d'orientations claires sur la façon d'intégrer ces paramètres dans le processus de planification. La plupart des communautés ne comprennent pas entièrement les questions de changement climatique et leurs impacts potentiels sur les communautés. Parmi les outils qui peuvent aider les communautés, le processus d'EIE devrait faire en sorte que les considérations de changement climatique soient incluses avant le lancement de nouveaux projets de développement. De même, on devrait tenir des discussions sur le besoin d'améliorer la souplesse et la gestion adaptative de la politique relative à la zone côtière du Nouveau-Brunswick en vue de trouver de meilleures réponses d'adaptation aux impacts du changement climatique.

La capacité d'adaptation est liée aux mesures que les communautés pourraient adopter pour favoriser le développement durable. .Certaines des composantes de l'écosystème peuvent être contrôlées et gérées alors que pour d'autres composantes, les communautés ne peuvent que s'adapter aux changements vu que le contrôle des impacts n'est pas possible. De plus, les impacts du changement climatique sont complexes puisqu'ils peuvent influer, directement ou indirectement, sur certaines composantes de l'écosystème. Dans ce projet, le degré de vulnérabilité variait grandement selon l'emplacement, l'exposition, la capacité d'adaptation et la résilience de l'infrastructure. Pour la Dune de Bouctouche et le village de Bouctouche, le tourisme le long de la côte est certainement plus à risque que de nombreuses autres activités socioéconomiques de la région telles que l'agriculture. D'un autre côté, les résultats de Pointe-du-Chêne ont montré que les infrastructures humaines (logements et quais) ont toutes été rendues plus vulnérables par l'augmentation des pressions exercées par les projets de développement dans la dernière décennie. Il est dans ce cas encore plus nécessaire d'améliorer la planification, puisque davantage d'activités socioéconomiques peuvent être menacées par les impacts du changement climatique dans un proche avenir.

Ce projet de recherche a notamment révélé que, en l'absence de données pertinentes, les politiques et les plans d'adaptation risquent de perdre de leur efficacité. Il est question ici aussi bien d'information sur les changements climatiques et le forçage que de renseignements sur les impacts biophysiques observés dans les secteurs côtiers. Il est tout aussi crucial d'obtenir suffisamment d'information pour pouvoir intégrer les facteurs sociaux dans les plans d'adaptation, dans les politiques et dans les plans généraux qui tiennent compte de l'impact possible des changements climatiques. Dans le contexte de la planification communautaire, les changements climatiques sont rarement l'enjeu principal, mais, en tenant compte des impacts possibles et en prenant des mesures d'adaptation proactives dans toutes les activités d'évaluation environnementale, de planification et d'aménagement, il est possible d'éviter des erreurs coûteuses. Dans de nombreux cas, cette façon de procéder donne également lieu aux stratégies d'adaptation les plus rentables.

Même si l'information n'est toujours pas complète, la visualisation de scénarios à l'aide de cartes illustrant différents résultats permet aux participants des collectivités d'évaluer leurs propres risques en regard d'une éventuelle réalité future.

3. Introduction

Une étude pancanadienne de la sensibilité des côtes à l'élévation du niveau de la mer, publiée par la Commission géologique du Canada en 1998 (CGC – Bulletin 505), montre les régions de sensibilité faible, moyenne et grande sur les côtes des océans Pacifique, Arctique et Atlantique. À l'échelle nationale, parmi les zones côtières les plus gravement menacées figurent certaines parties de la côte Atlantique, dont des sections de la côte du golfe du Saint-Laurent au Nouveau-Brunswick. Dans cette région, le niveau de la mer est déjà en train de monter, avec des impacts visibles, qui seront exacerbés par l'accélération de la hausse du niveau de la mer due au réchauffement par effet de serre et accompagnés de changements des besoins en adaptation. Les dangers y sont dus surtout aux impacts de l'inondation et de l'érosion des côtes, et aux dommages découlant des impacts de la glace pendant les ondes de tempête en hiver. Certaines parties de cette zone à l'étude sont très exposées à l'action des vagues lors des tempêtes survenant pendant la saison sans glace, comme en témoignent les dommages subis par le littoral et les infrastructures le 29 octobre 2000. Des phénomènes similaires, quoique moins intenses, se sont produits en 2002 avec une fréquence plus élevée, et il y en a eu quelques autres en 2004. Il est à noter que la tempête du 26 décembre 2004 a causé certains dommages semblables à ceux du 21 janvier 2000.

Malgré l'absence d'enregistrements marégraphiques pour cette région, l'équipe a bien réussi à combler les lacunes. Pendant les tempêtes du 21 janvier 2000 (celle-là déclarée catastrophe par le gouvernement fédéral) et du 29 octobre 2000, l'équipe et d'autres personnes se sont rendues dans les régions touchées et ont recueilli des données précieuses sur l'inondation, les niveaux d'eau, les dégâts faits par la glace, les dommages aux infrastructures et l'érosion des côtes.

La zone à l'étude, située sur la côte du détroit de Northumberland au Nouveau-Brunswick, s'étend du parc national Kouchibouguac au cap Jourimain et constitue une région du plus haut intérêt sur le plan scientifique et de priorité élevée pour les gouvernements et intervenants de la côte. Le littoral du parc national Kouchibouguac, en évolution constante, est une région intéressante pour comprendre les changements que pourraient subir les infrastructures et les écosystèmes dans un parc national. La côte du golfe du Nouveau-Brunswick au sud de Cap-Lumière, sujette à des pressions d'aménagement croissantes, est une zone importante pour la durabilité de l'écosystème. La région de Bouctouche inclut l'Éco-Centre Irving, la *Dune de Bouctouche* (endommagée par la tempête du 29 octobre 2000) et le site touristique et historique du Pays de la Sagouine (qui a été inondé le 21 janvier et le 20 octobre 2000); cette communauté a été un pionnier des initiatives de planification en vue du développement durable de la région et elle a connu une rapide croissance des services d'écotourisme dans les dernières années.

Dans les baies de Cocagne et de Shediac, le littoral est de plus en plus bâti et devient vulnérable aux impacts côtiers, à cause de la faible pente de la côte et de l'érodibilité du substrat. Les effets économiques à plus long terme doivent donc y être pris en compte dans la planification et la réglementation. La baie de Shediac est un bassin versant côtier complexe, très vulnérable à l'inondation de la côte. Non loin, la station touristique de la plage Parlee est un des joyaux de la province. Le havre de Shemogue et la baie de Little

Shemogue présentent des régions côtières où le développement est limité, avec des marais salés intacts où peuvent être menées des études de référence sur les écosystèmes. Ces travaux devraient avoir des répercussions directes pour les impacts socioéconomiques du changement climatique sur les régions et les communautés côtières du Nouveau-Brunswick; ils devraient mener à élaborer des stratégies d'adaptation. Les résultats présenteront un intérêt pour les communautés côtières, plusieurs secteurs de l'économie, les particuliers propriétaires, le domaine de la pêche, les autorités portuaires, les écologistes, les gestionnaires et les planificateurs de tous les ordres de gouvernement et du secteur privé.

Parmi les impacts de l'élévation du niveau de la mer et autres aspects du changement climatique sur les régions côtières figurent les suivantes :

- des inondations plus hautes et plus fréquentes des milieux humides et des littoraux adjacents,
- l'inondation d'une plus grande surface pendant les violentes tempêtes et les grandes marées,
- une augmentation de l'énergie des vagues à proximité du rivage,
- une migration vers le haut et vers l'intérieur des profils des plages,
- une accélération du recul de la côte, accompagnée de l'érosion des dunes et falaises, l'ouverture de brèches dans les barrières littorales et la déstabilisation des passes côtières,
- l'intrusion d'eau de mer dans les aquifères côtiers d'eau douce,
- des dommages à l'infrastructure côtière,
- des impacts sur les écosystèmes côtiers,
- des impacts généralisés sur l'économie de la côte.

L'objectif général de ce projet de recherche pluridisciplinaire était de quantifier les impacts du changement climatique et, plus précisément, de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et de l'érosion, sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick, qui donne sur le golfe du Saint-Laurent. Les résultats vont appuyer la gestion durable, la résilience des communautés et l'élaboration de stratégies d'adaptation.

4. Composantes du projet

4.1 Élévation du niveau de la mer et subsidence régionale

George S. Parkes[1], Donald L. Forbes[2]*, Lorne A. Ketch[1]
[1] Centre de prévision des intempéries de l'Atlantique, Service météorologique du Canada (Atlantique), Environnement Canada, 45, promenade Alderney, 16e étage, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada B2Y 2N6
[2] Commission géologique du Canada (Atlantique), Ressources naturelles Canada, Institut océanographique de Bedford, C.P. 1006, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada B2Y 4A2

* contact avec l'auteur [courriel : dforbes@nrcan.gc.ca].

4.1.1 Introduction et contexte à long terme

4.1.1.1 Situation et objectifs

Cette section du présent rapport offre une analyse des niveaux d'eau observés et autres indications d'une élévation relative du niveau de la mer dans le sud du golfe du Saint-Laurent, en s'attachant particulièrement au sud-est de la côte du Nouveau-Brunswick (figure 1). Il prolonge un rapport antérieur préparé pour une étude similaire, mais concernant la côte de l'Île-du-Prince-Édouard (Parkes *et al.*, 2002), dont certains éléments sont intégrés ici au besoin pour étayer l'analyse visant le Nouveau-Brunswick.

Depuis des millénaires, le niveau de la mer monte par rapport à celui des terres dans les Maritimes (Grant, 1970; Shaw *et al.*, 2002; Gehrels *et al.*, 2004). Cet état de choses est dû à une combinaison de l'élévation du niveau de la mer planétaire (Church *et al.*, 2004) et d'un ajustement isostatique postglaciaire à long terme de la croûte terrestre conjugué aux effets de la charge de l'océan sur la plate-forme, qui se traduit par de la subsidence dans tout le sud des Maritimes (Walcott, 1972; Peltier, 1996, 2004; Douglas et Peltier, 2002; Dyke et Peltier, 2000). Les changements du niveau de la mer que nous observons, bien que lents, deviennent significatifs sur quelques décennies. Les effets des tempêtes viennent se superposer au niveau moyen de la mer, qui est donc le principal contrôle à long terme du degré d'inondation et d'attaque des vagues (Zhang *et al.*, 1997; Forbes *et al.*, 2004). Le réchauffement du climat, qui cause une expansion thermique des océans et la fonte de la glace sur les continents, menace de faire monter le niveau de la mer, à l'échelle planétaire, de plusieurs dizaines de centimètres au cours du siècle à venir (GIEC GT1, 2001; Church *et al.*, 2001), ce qui accélérera les taux historiques d'élévation relative du niveau de la mer au Canada atlantique.

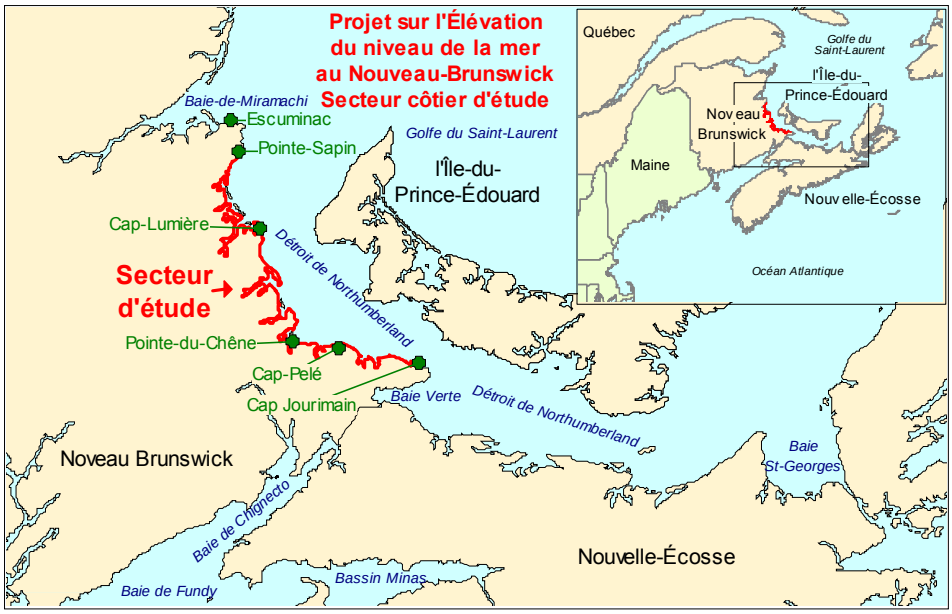


Figure 1. Région du sud du golfe du Saint-Laurent, montrant la zone à l'étude dans le sud-est du Nouveau-Brunswick (en rouge).

Nous résumons ici les indications géologiques d'une élévation relative à long terme du niveau de la mer, et examinons les enregistrements instrumentaux des données sur les niveaux d'eau dans le sud-est du Nouveau-Brunswick (figure 1) pour dégager les tendances récentes dans cette région. Enfin, nous passons en revue les plus récentes projections publiées pour définir des taux futurs plausibles de l'élévation isostatique du niveau de la mer due au réchauffement du climat; nous évaluons les autres facteurs qui influeront sur les niveaux relatifs futurs de la mer dans cette région. Nous produisons ainsi un ensemble de projections de l'élévation relative du niveau de la mer au cours du siècle à venir (2000-2100) pour divers endroits de la côte sud-est du Nouveau-Brunswick.

4.1.1.2 Taux à long terme d'élévation relative du niveau de la mer dans la région

Après le dernier maximum glaciaire (DMG), certaines parties de l'Île-du-Prince-Édouard et de l'ouest du Nouveau-Brunswick sont restées recouvertes par les restes de calottes glaciaires régionales au moins jusqu'à 13 000 ans avant le présent (13 ka BP), selon la datation au radiocarbone, voire plus tard. Cependant, le vêlage rapide d'icebergs avait enlevé la glace de la plus grande partie du centre du golfe du Saint-Laurent dès 14 ka BP (Josenhans et Lehman, 1999). Des coquilles d'animaux marins datées d'entre 10,5 et 12,6 ka BP indiquent que l'extrémité ouest de l'Î.P.É. et les terres basses de l'est du Nouveau-Brunswick étaient alors libres de glace et submergées (Kranck, 1972; Prest, 1973; Rampton *et al.*, 1984; Shaw *et al.*, 2002).

Shaw *et al.* (2002) ont compilé des isobases (lignes d'égale élévation) à intervalles de 1000 ans radiocarbone, à partir de données géologiques publiées sur le changement du niveau de la mer dans les provinces de l'Atlantique. À l'aide de ces données et d'un modèle altimétrique et bathymétrique numérique pour la région, ils présentent des cartes de la paléogéographie à 13, 12, 11, 10, 9, 8 et 6 ka BP. Celles-ci montrent que la mer s'est d'abord retirée des terres basses du Nouveau-Brunswick jusqu'à ce qu'une grande partie du plancher du détroit de Northumberland soit à sec, entre 9,0 et 7,5 ka BP (soit

environ 8 500 à 10 500 années civiles avant le présent [C ans BP]). Après ce bas niveau, le niveau relatif de la mer s'est élevé rapidement, la vitesse pouvant atteindre 120 cm/siècle (12 mm/an), voire plus, entre 8600 et 7800 C ans BP; cette hausse a ensuite ralenti graduellement jusqu'à 6000 C ans BP (Shaw *et al.*, 2002; Forbes *et al.*, 2004). Les isobases à 6 ka montrent que la subsidence était plus élevée vers l'est dans l'Î.P.É. et dans l'embouchure de la baie de Fundy, avec des taux moindres à partir de la région de Shediac au nord et le long de la côte jusqu'à la Miramichi (Shaw *et al.*, 2002). Dans la région à l'étude, le niveau relatif de la mer a monté de 10 à 20 m au cours des 6 000 dernières années. En extrapolant des données extérieures à la région à l'étude, Gehrels *et al.* (2004) ont produit des cartes des taux d'élévation relative du niveau de la mer sur les 1 000, 2 000 et 3 000 dernières années, qui suggèrent un gradient spatial concordant avec les autres données, le taux moyen des 1 000 dernières années allant de 1,2 m (12 cm/siècle) près de Charlottetown à 0,8 m (8 cm/siècle) à Miramichi.

Parkes *et al.* (2002) et Forbes *et al.* (2004) montrent que, dans les 2 000 dernières années, le taux d'élévation relative du niveau de la mer dans la région de Charlottetown a baissé à environ 20 cm/siècle. Depuis 100 ans, il a accéléré, pour atteindre 32 cm/siècle à Charlottetown (voir l'analyse des enregistrements marégraphiques ci-dessous). Cet état de choses peut être dû aux premiers effets d'un réchauffement du climat ou à des fluctuations à court terme du niveau de la mer régional semblables à celles signalées par Shaw et Ceman (1999). Les indications fournies par d'autres sources confortent l'interprétation d'une accélération de l'élévation du niveau de la mer dans la région depuis 100 à 150 ans (Gehrels *et al.*, 2002; Church et White, 2006).

4.1.2 Tendances récentes du niveau de la mer tirées des données sur les niveaux d'eau

4.1.2.1 Sources et prétraitement des données

4.1.2.1.1 Données de marégraphes

La figure 3 indique l'emplacement des marégraphes dans le sud du golfe du Saint-Laurent. Ces stations de mesure appartiennent au Service hydrographique du Canada (SHC), qui les exploite, à l'exception du marégraphe de Belledune et de l'actuel marégraphe de Pointe-du-Chêne, qui appartiennent respectivement à l'autorité portuaire de Belledune et à l'université Dalhousie, mais sont entretenus par le SHC. Dans les années 1990, plusieurs marégraphes du Réseau numérique permanent d'enregistreurs du niveau d'eau (RNPENE) ont été fermés (Pointe-du-Chêne et Dalhousie en 1992; Rustico et Pictou en 1996). Le Service de marégraphe de Pointe-du-Chêne a été rétabli en 2003 par des partenaires du présent projet. Les données de niveau d'eau de ces marégraphes sont archivées et conservées par le Service des données sur le milieu marin (SDMM) à Ottawa.

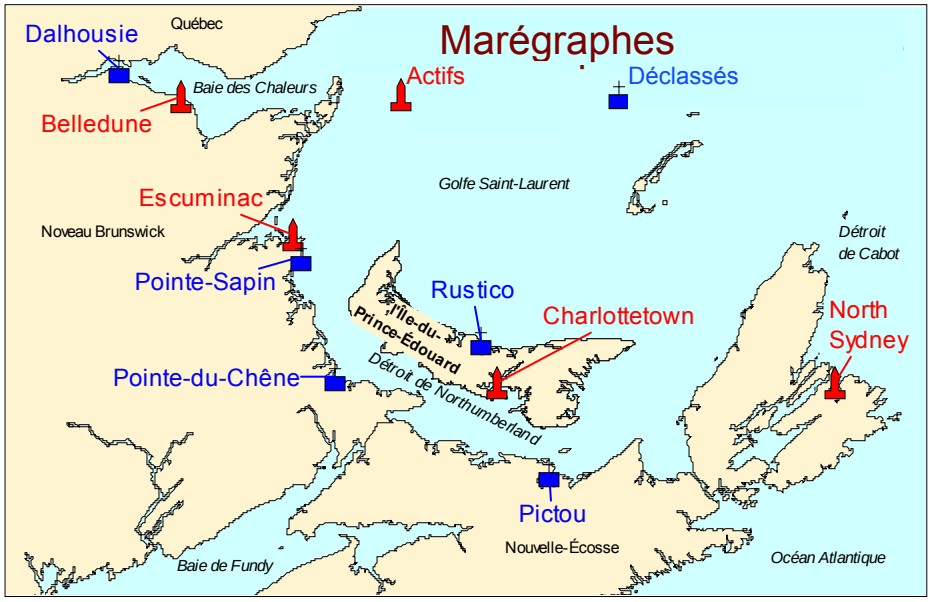


Figure 2. Emplacement des marégraphes en bordure du sud du golfe du Saint-Laurent. Les stations indiquées en rouge sont opérationnelles; les stations en bleu ont été déclassées.

Pour examiner les niveaux d'eau et les épisodes d'ondes de tempête, nous avons demandé au SDMM la totalité des données sur le niveau de l'eau pour le sud du golfe du Saint-Laurent. Il s'agissait des fichiers de données suivants :

1. observations horaires 1973–2005 à Escuminac, N.-B.;
2. observations horaires 1971–1992 et 2003-2005 à Pointe-du-Chêne, N.-B.;
3. observations horaires 1911–2005 à Charlottetown, Î.P.É.;
4. observations horaires 1963–1975 à Pointe-Sapin, N.-B.;
5. observations horaires 1965–1996 à Pictou, N.-É.;
6. observations horaires 1999–2005 à Belledune, N.-B.;
7. observations horaires 1972–1996 à Rustico, Î.P.É.

4.1.2.1.2 Marées astronomiques prévues

Les marées astronomiques prévues pour Charlottetown, Escuminac, Pointe-du-Chêne, Pictou et Rustico nous ont été fournies par le SHC pour les années 1900 à 2000 inclusivement. De plus, le SHC nous a fourni des prévisions de marées pour Pointe-Sapin et Belledune correspondant à leurs enregistrements respectifs de données sur les niveaux d'eau. C'est en effet le SHC qui est chargé de produire les prévisions officielles de marée du Canada, telles qu'on les trouve dans les *Tables des marées et courants du Canada* (SHC, 2001).

4.1.2.1.3 Prétraitement des données du SDMM

Les données marégraphiques d'Escuminac, Pointe-du-Chêne, Rustico et Pictou ont été soumises au processus de contrôle de la qualité du SDMM, tout comme les données de Charlottetown à partir de novembre 1961. Les données de Charlottetown pour la période

allant de 1911 à novembre 1961, qui n'ont pas fait l'objet d'un contrôle de la qualité, se sont révélées très incomplètes sur la période antérieure à 1938. Bien qu'un contrôle de la qualité ait été appliqué aux données de Charlottetown de novembre 1961 à décembre 1998, il n'en reste pas moins certains problèmes. Il y avait en effet des problèmes dans les données originales, et d'autres ont pu être introduits par le logiciel d'extraction des données du SDMM. Il a fallu effectuer un prétraitement des données de niveau d'eau pour structurer les fichiers de données; on a ensuite écrit un logiciel pour réunir les ensembles de données du SDMM et les marées prévues du SHC, afin de calculer les différentiels, d'isoler et d'examiner les épisodes d'ondes de tempête, au cas par cas.

4.1.2.1.4 Erreurs dans les ensembles de données

Nous avons procédé à un examen visuel des ensembles de données sur les niveaux d'eau, des marées astronomiques prévues et de leurs différentiels pour identifier les erreurs évidentes de données. De plus, un examen visuel simultané des données et des différentiels à des sites marégraphiques adjacents a permis de mieux repérer et référencer ces problèmes. Plusieurs types de problèmes ont été trouvés, comme l'énumèrent Parkes *et al.* (2002). En résumé, il s'agit :

1. de données manquantes;
2. de pointes (positives et négatives) occasionnelles dans les données;
3. de décalages de phase entre les prévisions et les observations dus à des erreurs de synchronisme des données et entraînant des différentiels périodiques d'intensités diverses;
4. des dérives de l'étalonnage du marégraphe causant des périodes de moyennes et de différentiels trop importants ou trop faibles;
5. de l'archivage de données avec la mauvaise date;
6. des données interpolées;
7. d'une courte période, à Pointe-du-Chêne (octobre 1980), pendant laquelle les données semblent inversées;
8. de courtes périodes dans les données des années 1920 à Charlottetown pendant lesquelles les données manquantes ont été cotées comme zéro (c.-à-d. zéro des cartes) au lieu du code classique 9999 pour les données manquantes;
9. d'une courte période dans les données de Charlottetown (octobre 1954) pendant laquelle une excursion de marée particulière a été répétée plusieurs fois et le reste du mois placé à la mauvaise date-heure.

4.1.2.2 Examen des niveaux d'eau moyens

Avant de calculer les moyennes aux divers sites de marégraphes, nous avons débarrassé les données des pointes et autres erreurs évidentes. Nous n'avons pas essayé d'enlever les erreurs de synchronisme, puisqu'elles n'auraient pas d'incidence négative sur les moyennes calculées.

4.1.2.2.1 Niveaux d'eau moyens annuels et mensuels à Charlottetown

Les niveaux d'eau annuels moyens ont été calculés pour Charlottetown (Î.P.É.). Les résultats sont pointés sur le graphique de la figure 3 ci-dessous, les niveaux étant donnés en centimètres au-dessus du zéro des cartes. La moyenne des moyennes annuelles est de 162,63 cm. Une droite de régression linéaire a été tracée dans les données.

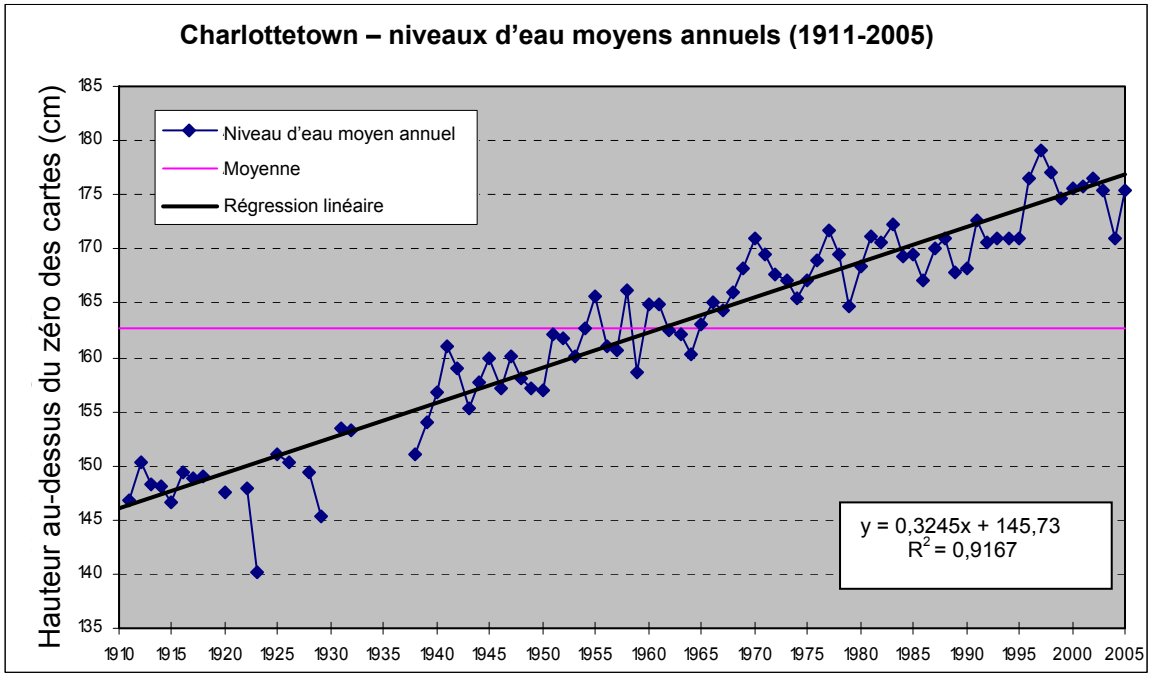


Figure 3. Moyennes annuelles (en cm au-dessus du zéro des cartes) des données de niveau d'eau pour Charlottetown – 1911-2005.

Nous avons aussi calculé les niveaux moyens mensuels pour Charlottetown, dont les résultats sont présentés à la figure 4. La moyenne des moyennes mensuelles est de 163,64 cm. L'unité de l'axe des x étant le mois, la pente des tendances linéaires doit être corrigée d'un facteur de 1200 pour obtenir une tendance en cm/siècle. Ces données indiquent un taux d'élévation du niveau de la mer de 31,4 cm/siècle. Les mêmes données sont présentées à la figure 5 avec des moyennes mobiles sur 1 an (en fait 13 mois) et 3 ans (en fait 37 mois).

On remarque nettement une variabilité saisonnière dans le pointage des moyennes mensuelles, avec la hausse graduelle du niveau moyen de la mer déjà observée dans les pointages des moyennes annuelles. On voit aussi à la figure 5 que les récents taux d'élévation du niveau de la mer ont quelque peu fluctué, comme l'avaient constaté Shaw *et al.* (1992), Forbes *et al.* (1997) et Manson (1999) à Halifax.

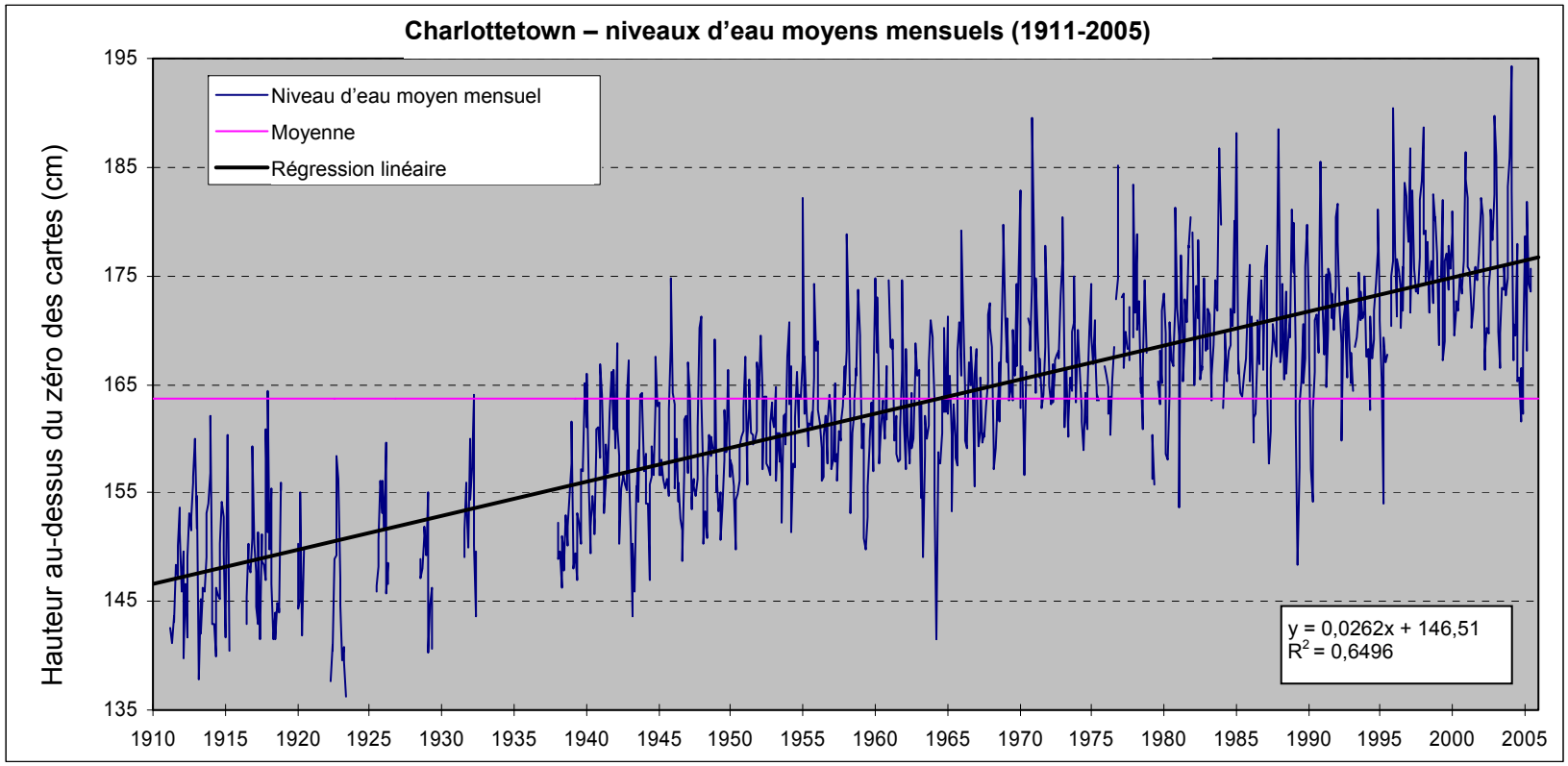


Figure 4. Moyennes mensuelles (en centimètres au-dessus du zéro des cartes) des données de niveau d'eau pour Charlottetown – 1911-2005.

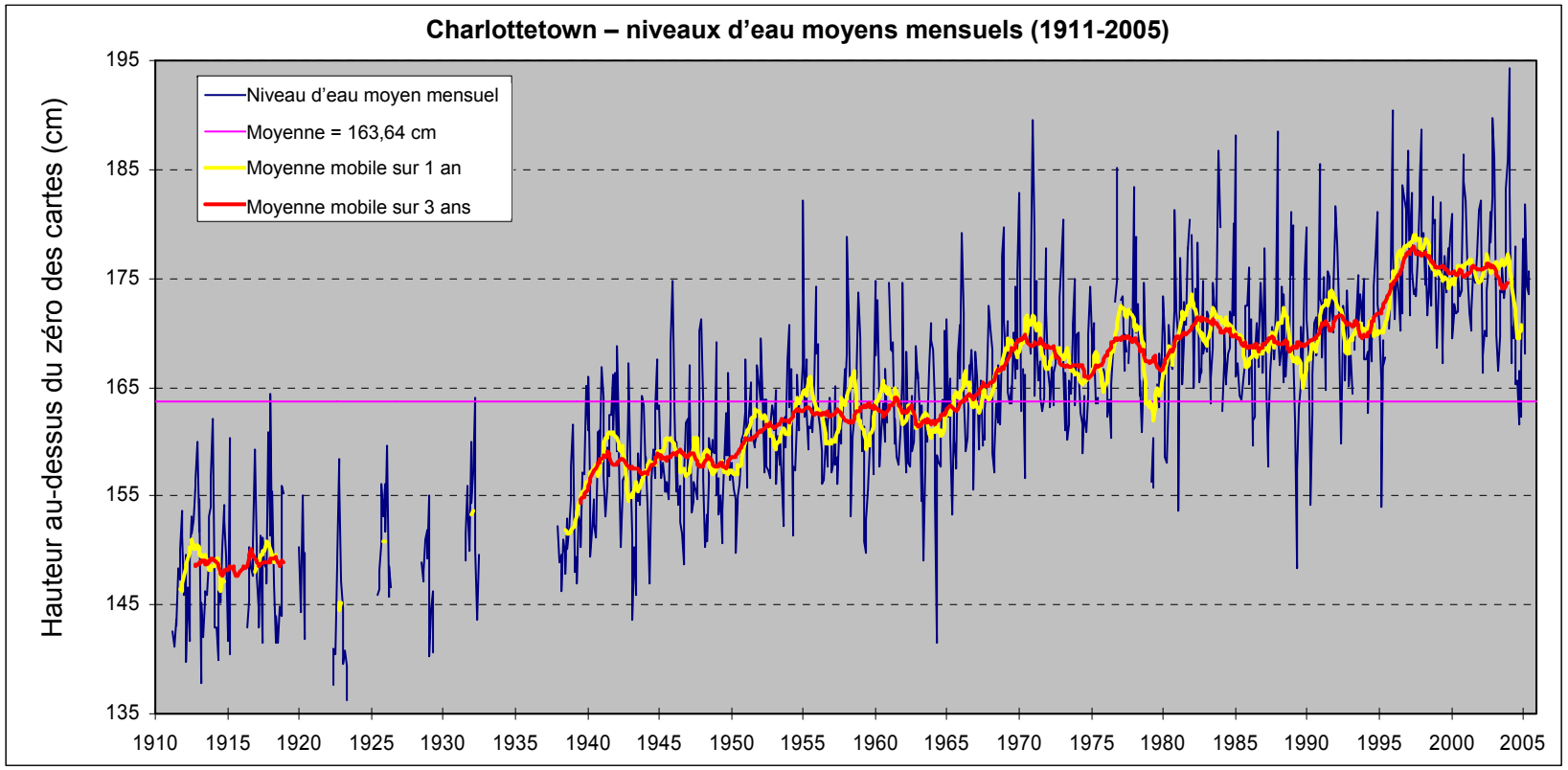


Figure 5. Moyennes mensuelles (en centimètres au-dessus du zéro des cartes) des données de niveau d'eau pour Charlottetown – 1911-2005, avec moyennes mobiles sur 1 et 3 ans.

Pour étudier la variabilité saisonnière, on a repéré toutes les années de données pour Charlottetown qui étaient pratiquement complètes (moins de 10 % de données manquantes), et pointé les moyennes de ces années sur une base mensuelle. On a ainsi trouvé 63 années qui se prêtaient à cette analyse, dont les résultats sont présentés sous la forme d'un graphique 3-D (figure 6 ci-dessous).

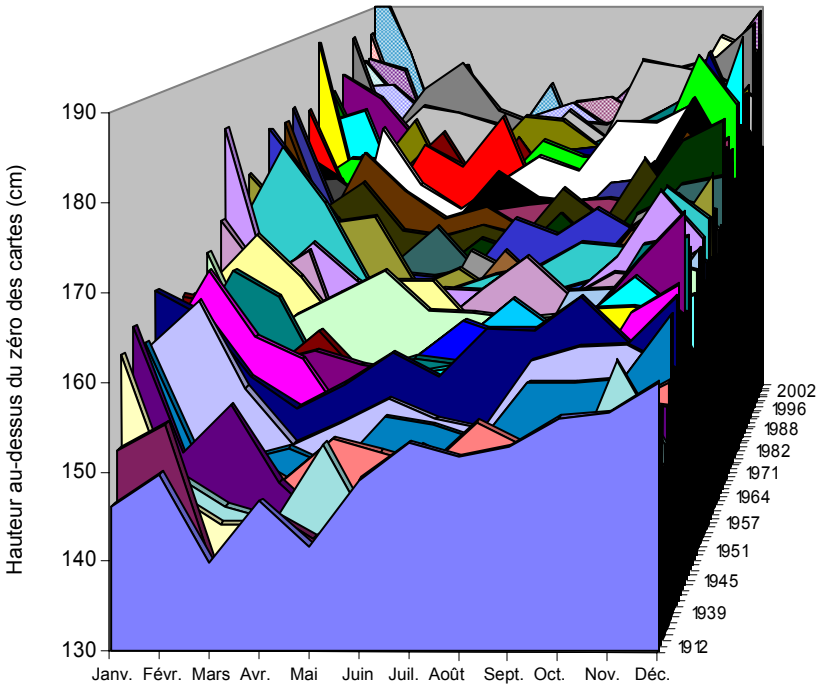


Figure 6. Moyennes mensuelles des niveaux d'eau à Charlottetown (en centimètres au-dessus du zéro des cartes) de 1910 à 2004, pour les années présentant moins de 10 % de données manquantes.

En général, les moyennes mensuelles sont plus élevées en automne et en hiver, et plus basses pendant les saisons de temps chaud. Cet état de choses est examiné plus avant en pointant la différence entre la moyenne mensuelle et la moyenne annuelle pour chaque année (avec moins de 10 % de données manquantes) et en moyennant les valeurs. Les résultats de cet exercice sont présentés ci-dessous pour Charlottetown (figure 7) et, à des fins de comparaison, pour Pictou (figure 8), le marégraphe le plus proche de Charlottetown. L'analyse pour Pictou repose sur 20 années de données.

Les anomalies du niveau de la mer moyen mensuel calculées ci-dessus pour Charlottetown ont été utilisées pour corriger les moyennes des années avec les données manquantes (figure 9). Ces corrections variaient de +0,93 cm en 1978 (pour laquelle 27,9 % des données manquaient, surtout en novembre, décembre et janvier) à –0,72 cm en 1928 (où les six premiers mois de l'année manquaient, soit 49,7 % des données), avec une valeur absolue moyenne de 0,13 cm. De plus, les deux cas aberrants de 1923

et 1929 (2 des 5 années seulement pour lesquelles il manquait plus de 50 % des données) sont éliminés de l'ensemble de données présenté à la figure 10. Ces corrections n'ont peu d'incidence sur les valeurs de régression. Les figures 9 et 10, nos graphiques finaux de l'élévation relative du niveau de la mer sur la période pour laquelle nous disposons de données marégraphiques à Charlottetown, indiquent une tendance d'environ 32 cm/siècle. Cette valeur concorde bien avec les valeurs publiées par d'autres chercheurs : Grant (1970) – 26 cm/siècle (données de 1938-1968); Lane et Associates (1986) – 29 cm/siècle (données de 1965-1984); Shaw et Forbes (1990) – 30,7 cm/siècle (données de 1938-1988) et 31,2 cm/siècle (données de 1907-1988); Carrera *et al.* (1991a, 1991b) – 32 cm/siècle à Charlottetown (données de 1911-1989) ou 36 cm/siècle en utilisant leur méthode de propagation des différences (dans ce cas à Halifax).

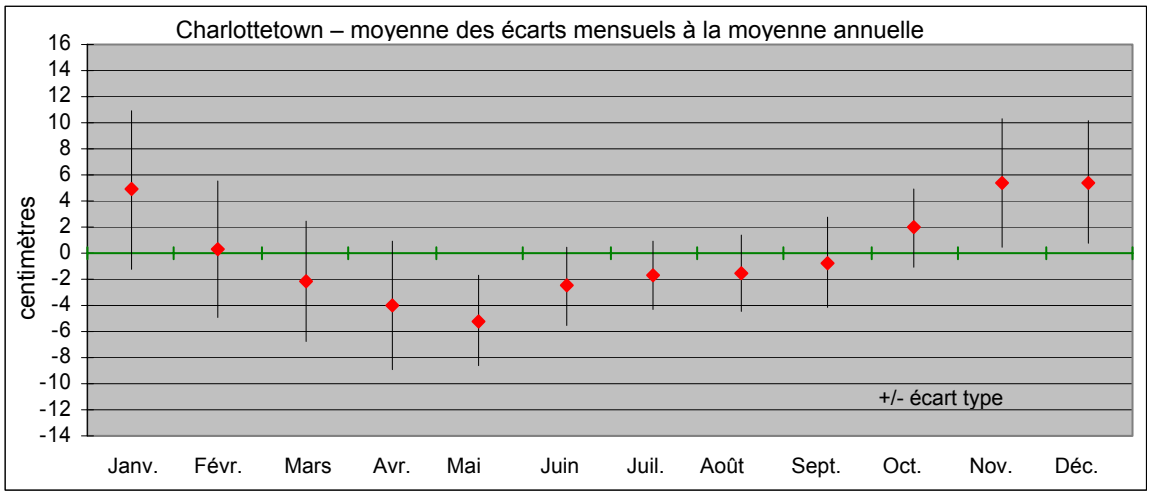


Figure 7. Moyennes des écarts mensuels à la moyenne annuelle pour les données de niveau d'eau de Charlottetown.

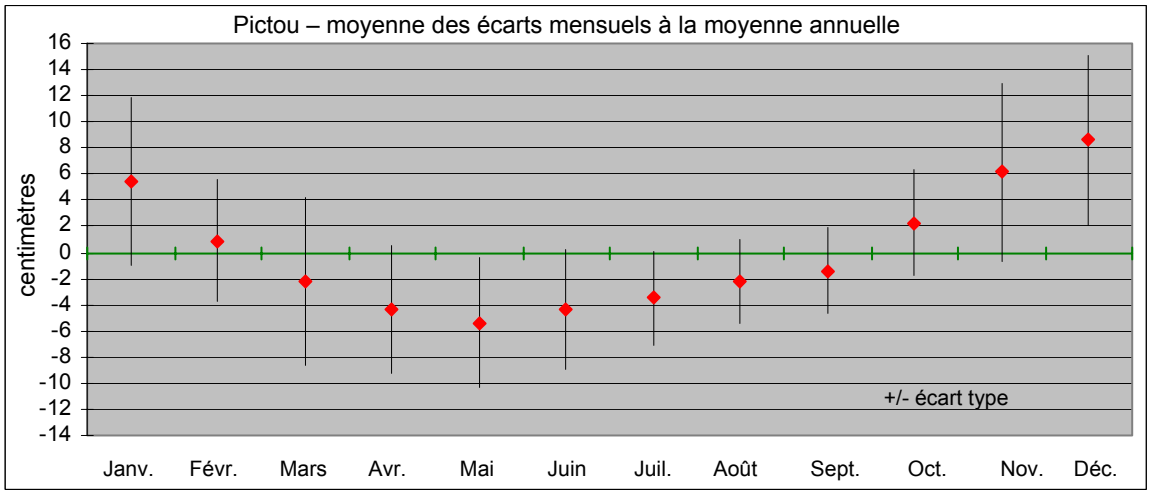


Figure 8. Moyennes des écarts mensuels à la moyenne annuelle pour les données de niveau d'eau de Pictou.

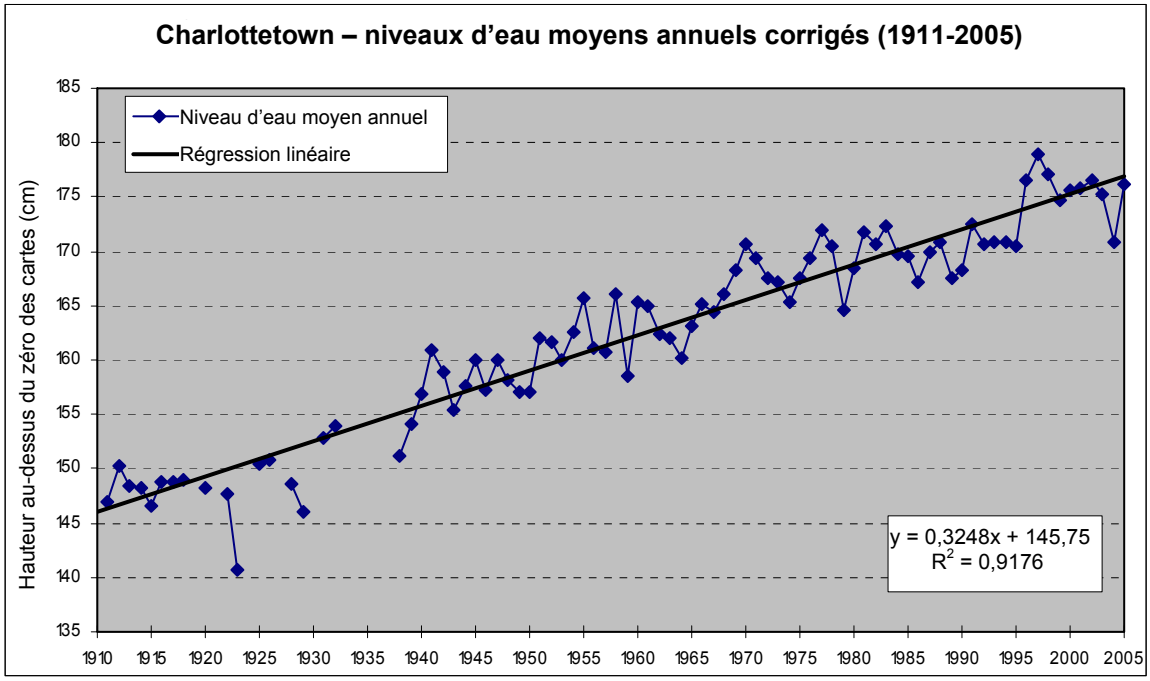


Figure 9. Données de niveau d'eau de Charlottetown, moyennes annuelles pour 1911-2005 (corrigées pour tenir compte des données manquantes).

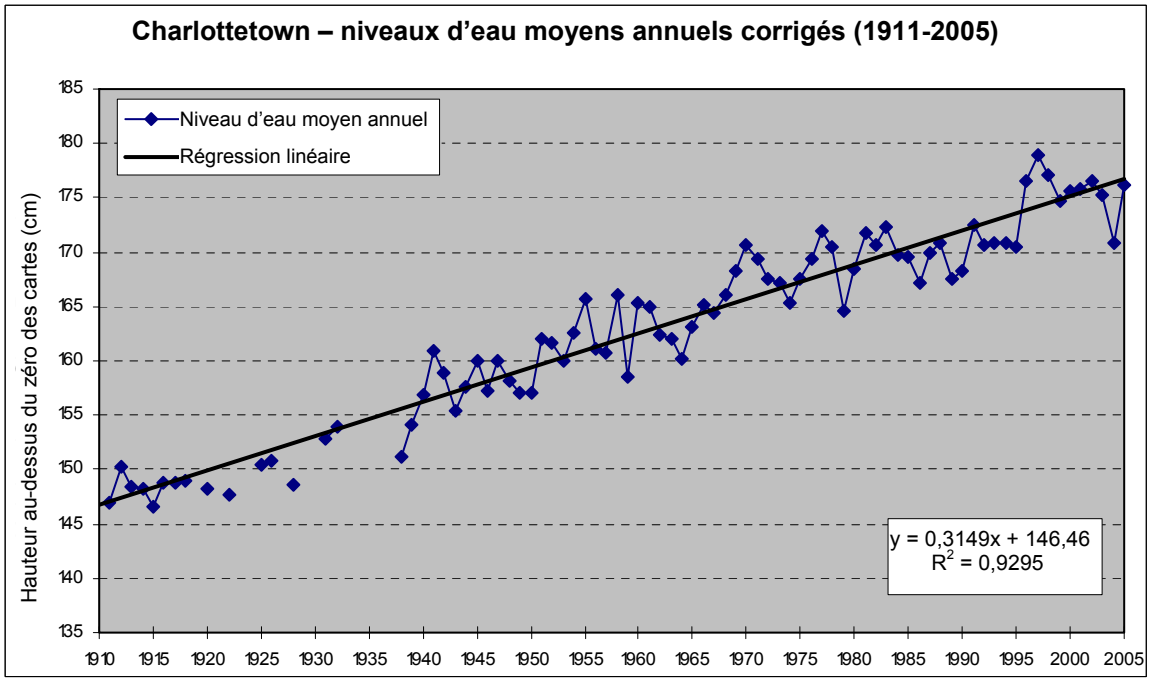


Figure 10. Données de niveau d'eau de Charlottetown, moyennes annuelles pour 1911-2005 (corrigées pour tenir compte des données manquantes; les cas aberrants de 1923 et 1929 ont été enlevés).

4.1.2.2.2 Niveaux d'eau moyens annuels et mensuels à Escuminac et à Pointe-du-Chêne

Les données d'Escuminac sont disponibles pour les années 1973 à 2005, et celles de Pointe-du-Chêne pour les années 1971 à 1992 et 2003 à 2005. Les niveaux d'eau moyens annuels ont été calculés pour Escuminac et Pointe-du-Chêne et sont présentés ci-dessous aux figures 11, 12 et 13. Les années 1971, 1992 et 2003 ont été éliminées des graphiques pour Pointe-du-Chêne parce que 88,5 %, 80,9 % et 70,4 % respectivement des données annuelles manquaient (voir section 4.2.15 pour plus de détails sur les données manquantes). Les niveaux d'eau sont donnés en centimètres au-dessus du zéro des cartes.

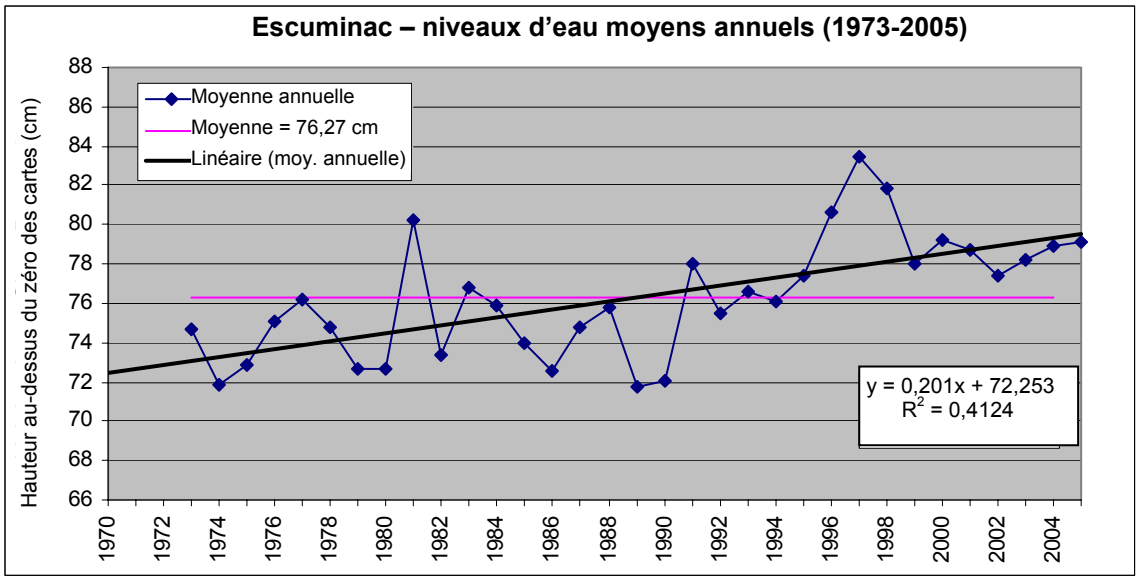


Figure 11. Moyennes annuelles des données du niveau de l'eau à Escuminac – 1973-2005.

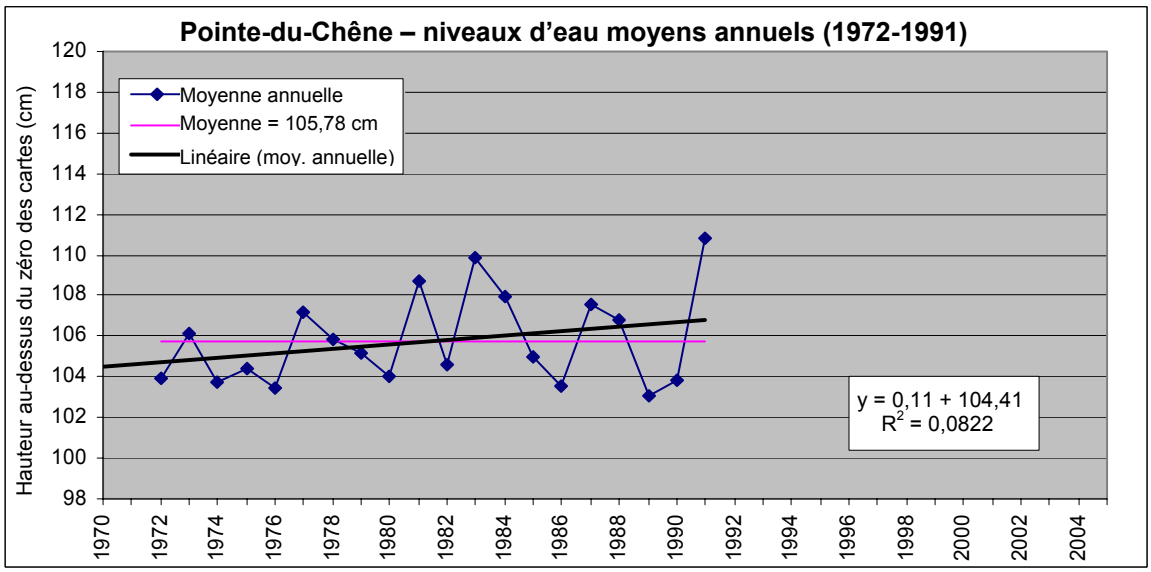


Figure 12. Moyennes annuelles des données du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne – 1972-1991.

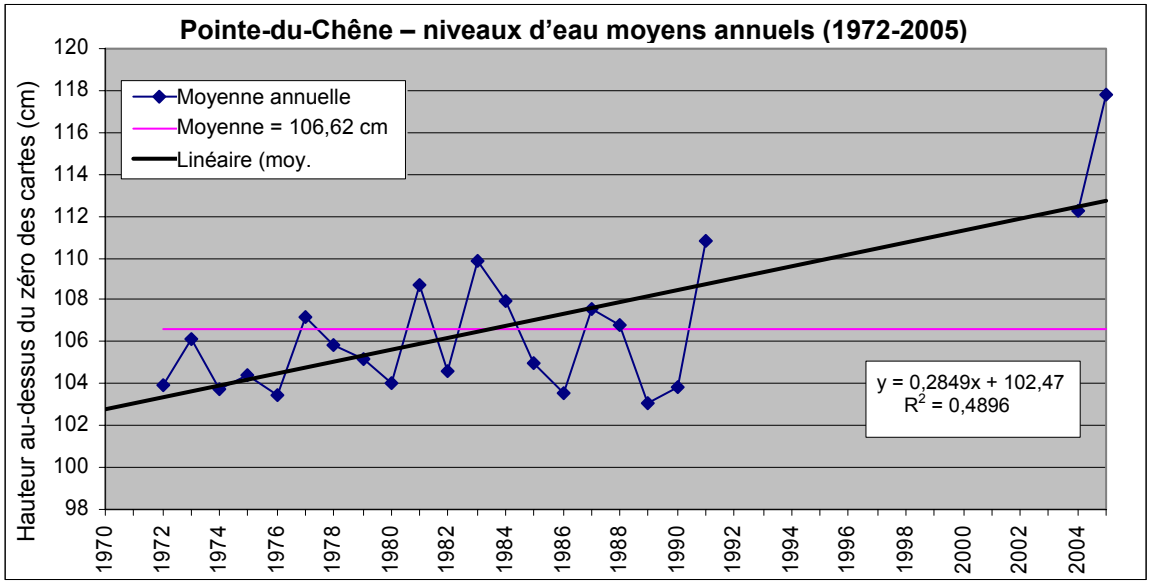


Figure 13. Moyennes annuelles des données du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne – 1972-2005.

Pour faciliter la comparaison, les axes des x et des y de ces graphiques sont à la même échelle. La régression linéaire dans les données d'Escuminac montre une tendance positive de 20 cm/siècle. Les données pour 1972 à 1991 à Pointe-du-Chêne (figure 12) présentent une tendance positive de 11 cm/siècle mais, quand on y ajoute les données de 2004 et 2005, la tendance passe à 28 cm/siècle. Les valeurs moyennes quadratiques sont basses, en raison de la variabilité, induite par les conditions météorologiques, du niveau annuel moyen de la mer et de la petitesse du nombre de données.

Nous avons repéré les années (20 pour Escuminac et 11 pour Pointe-du-Chêne) dans lesquelles les données étaient pratiquement complètes (moins de 10 % de données manquantes); les figures 14 et 15 montrent la moyenne de la différence entre la moyenne mensuelle et la moyenne annuelle pour chacune de ces années. Les plus grandes valeurs positives (surtout à Pointe-du-Chêne) se situent à la fin de l'automne et au début de l'hiver, et les plus grandes valeurs négatives à la fin de l'hiver et au début du printemps. Les graphiques semblent indiquer des caractéristiques similaires, avec une petite valeur positive en juillet, et sont quelque peu différents des pointages des mêmes paramètres (figures 7 et 8) pour Charlottetown et Pictou.

Nous avons utilisé les valeurs anormales par rapport à la moyenne mensuelle du niveau de la mer, calculées ci-dessus pour Escuminac et Pointe-du-Chêne, pour calculer les moyennes annuelles en remplacement des données manquantes (figures 16 et 17). À Escuminac, ces corrections allaient de +0,26 cm en 1974 (année pour laquelle il manquait 16,4 % des données, toutes en juillet et août) à –0,40 cm en 1993 (année pour laquelle il manquait 17,6 % des données, surtout en hiver), avec une valeur absolue moyenne de 0,09 cm. À Pointe-du-Chêne, les corrections allaient de +0,74 cm en 1976 (25,3 % de données manquantes, dont décembre et environ un tiers de novembre) à –0,34 cm en 1973 (7,8 % de données manquantes, surtout en février), avec une valeur absolue moyenne de 0,20 cm.

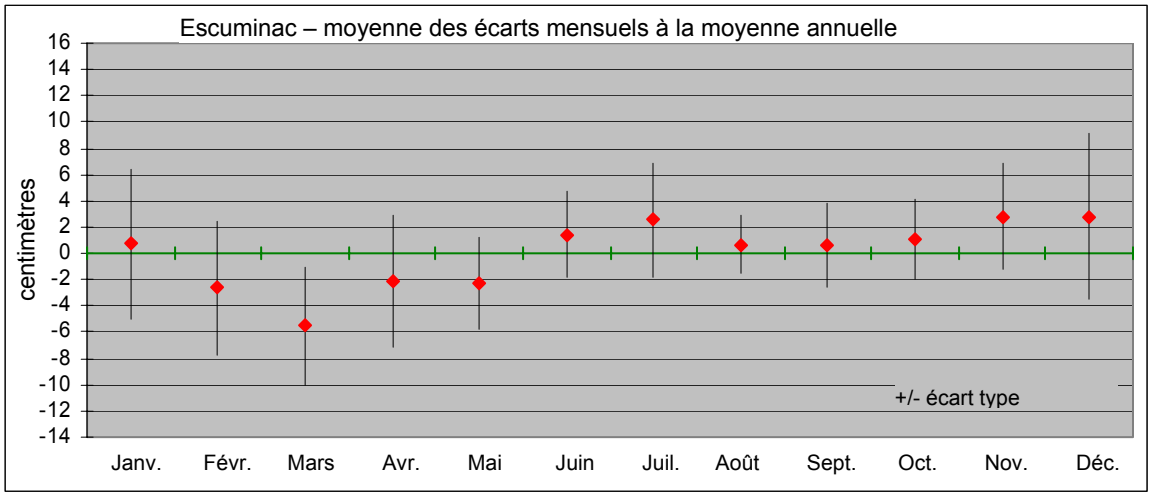


Figure 14. Moyennes des différences mensuelles avec la moyenne annuelle des données du niveau de l'eau à Escuminac.

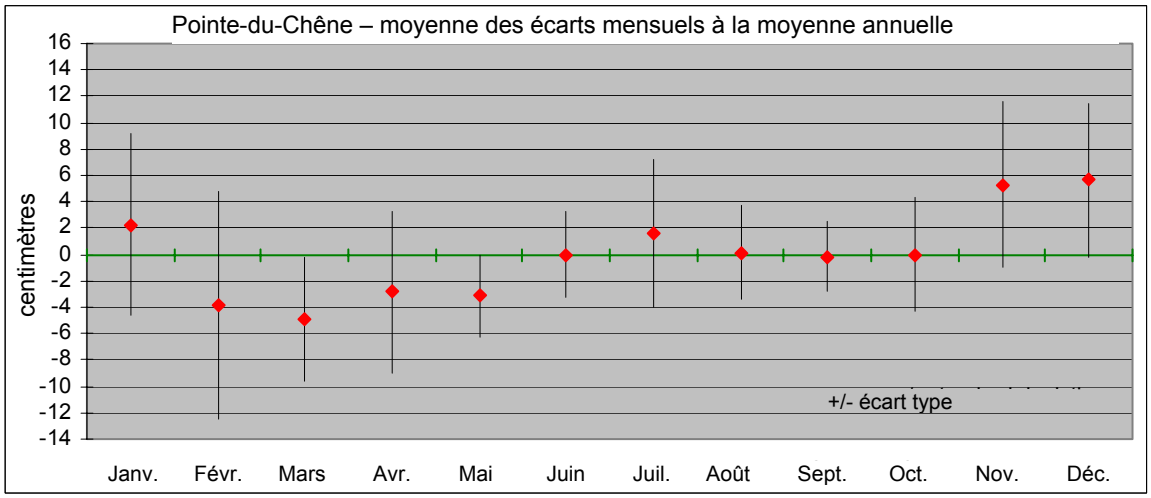


Figure 15. Moyennes des différences mensuelles avec la moyenne annuelle des données du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne.

Les niveaux d'eau moyens mensuels ont été calculés pour Escuminac et Pointe-du-Chêne; ils sont présentés ci-dessous aux figures 18 et 19, avec les lignes de tendance linéaire et les moyennes mobiles sur 1 an (en fait 13 mois) et 3 ans (en fait 37 mois). Là encore, pour faciliter la comparaison, les axes des x et des y sont à la même échelle. Ces graphiques et les figures 11, 12 et 13 (pointages des niveaux d'eau annuels moyens) illustrent la difficulté de tenter de calculer des moyennes à long terme simplement à partir de valeurs ponctuelles d'enregistrements de courte durée. Cet aspect est étudié plus à fond dans des sections à venir.

Ces corrections accentuent légèrement la pente pour les deux sites, avec un changement négligeable des valeurs moyennes quadratiques.

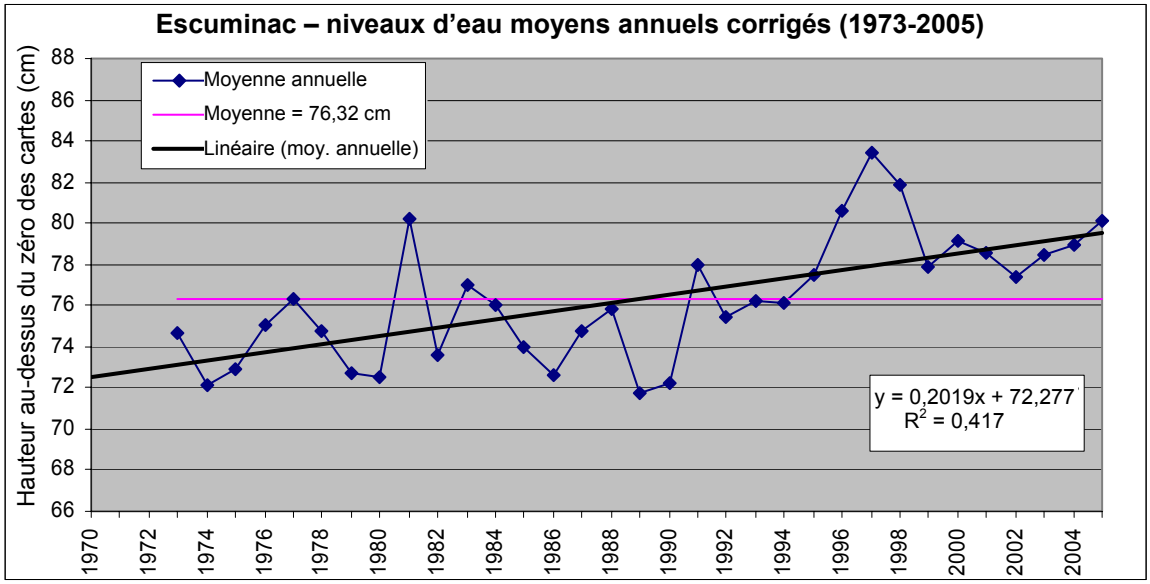


Figure 16. Niveau moyen annuel de la mer à Escuminac, corrigé pour tenir compte des données manquantes.

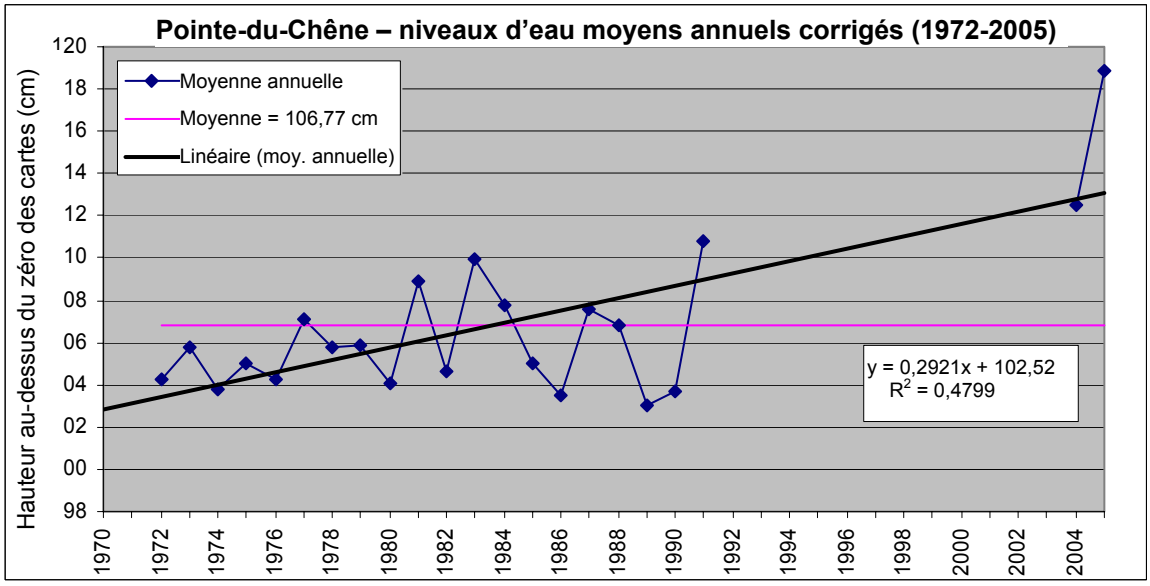


Figure 17. Niveau moyen annuel de la mer à Pointe-du-Chêne, corrigé pour tenir compte des données manquantes.

On dispose de données sur le niveau d'eau à Pointe-Sapin (près d'Escuminac; voir la figure 1) pour la période d'octobre 1963 à septembre 1975. Cet ensemble de données présente des problèmes, qui peuvent être corrigés jusqu'à un certain point. Ni les données elles-mêmes ni les données corrigées ne peuvent cependant être utilisées dans une analyse de moyennes, mais les données corrigées sont précieuses pour étudier les ondes de tempête et les inondations survenues au cours de la période en question.

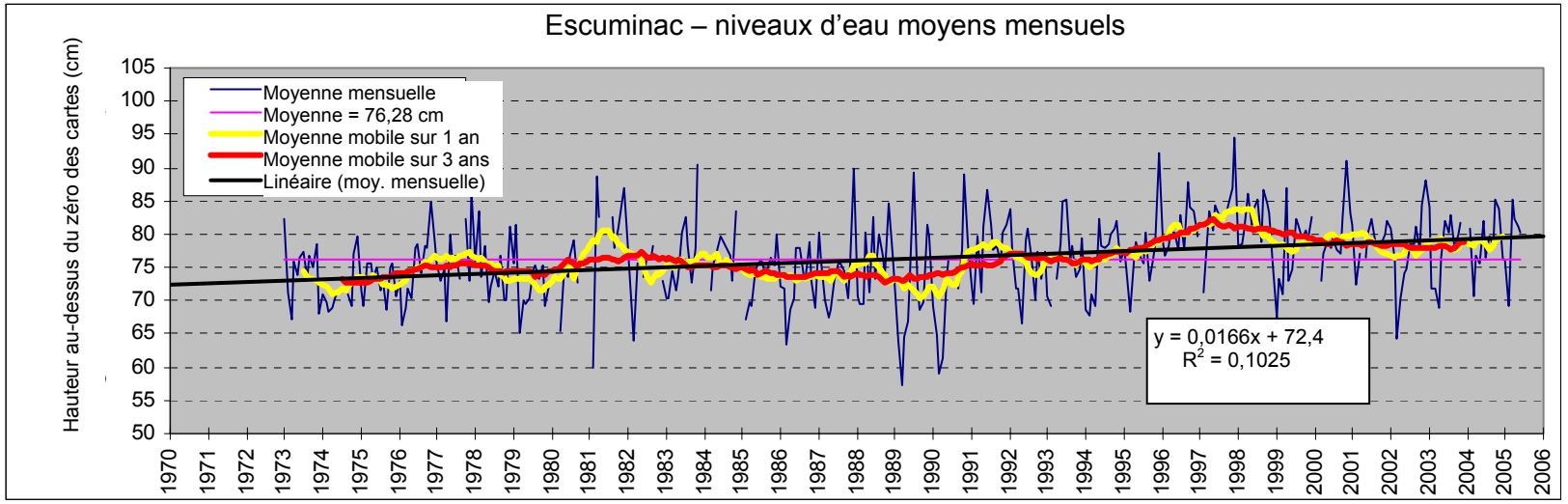


Figure 18. Moyennes mensuelles des données de niveau d'eau d'Escuminac (1972-2005), avec moyennes mobiles sur 1 et 3 ans.

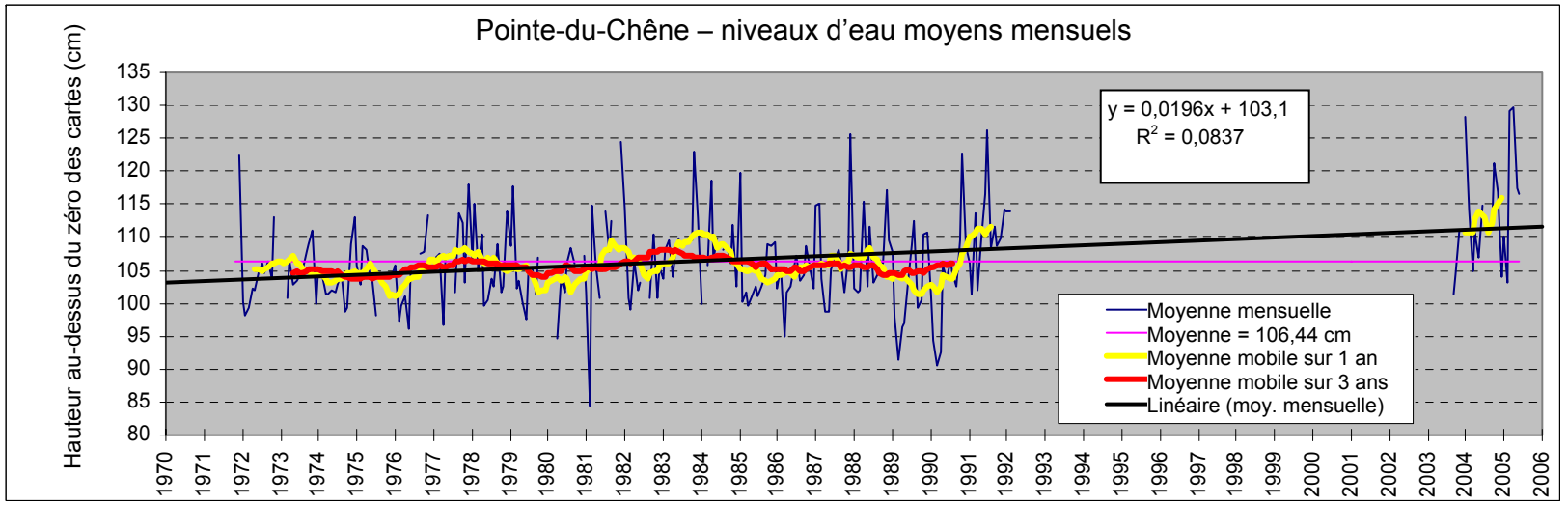


Figure 19. Moyennes mensuelles des données de niveau de Pointe-du-Chêne (1971-2005), avec moyennes mobiles sur 1 et 3 ans.

4.1.3 Normalisation des niveaux d'eau en fonction de la pression atmosphérique

4.1.3.1 Pression atmosphérique

Nous avons compilé les moyennes mensuelles des données de pression atmosphérique pour Charlottetown (1900-2005), Chatham (1900-2005) et Halifax (1900-2005). Les pressions au niveau moyen de la mer (NMM) ont été dérivées des pressions mesurées à la station.

La pression NMM moyenne mensuelle présentait une variation considérable sur l'enregistrement 1900-2005, allant de 997,0 hPa (février 1901) à 1023,4 hPa (mars 1903). La moyenne des pressions NMM moyennes mensuelles sur cette période est de 1013,64 hPa, ce qui est proche des moyennes mobiles et de la pression atmosphérique standard de 1013,25 hPa (ou millibars). Au cours de la période couverte par les données de niveau d'eau pour Charlottetown (1911-2005), la pression NMM moyenne mensuelle (figure 20) à Charlottetown a varié de 999,8 hPa (janvier 1985) à 1023,2 hPa (décembre 1936 et janvier 1937), soit une différence de 23,4 hPa. Il est généralement entendu que la surface de l'océan réagit aux changements de la pression atmosphérique un peu comme un baromètre renversé. Si on présume qu'il y a eu une réaction isostatique au changement de la pression, cette variation de 23,4 hPa de la pression NMM moyenne mensuelle induit une variation de 23,4 cm de la moyenne mensuelle du niveau de la mer.

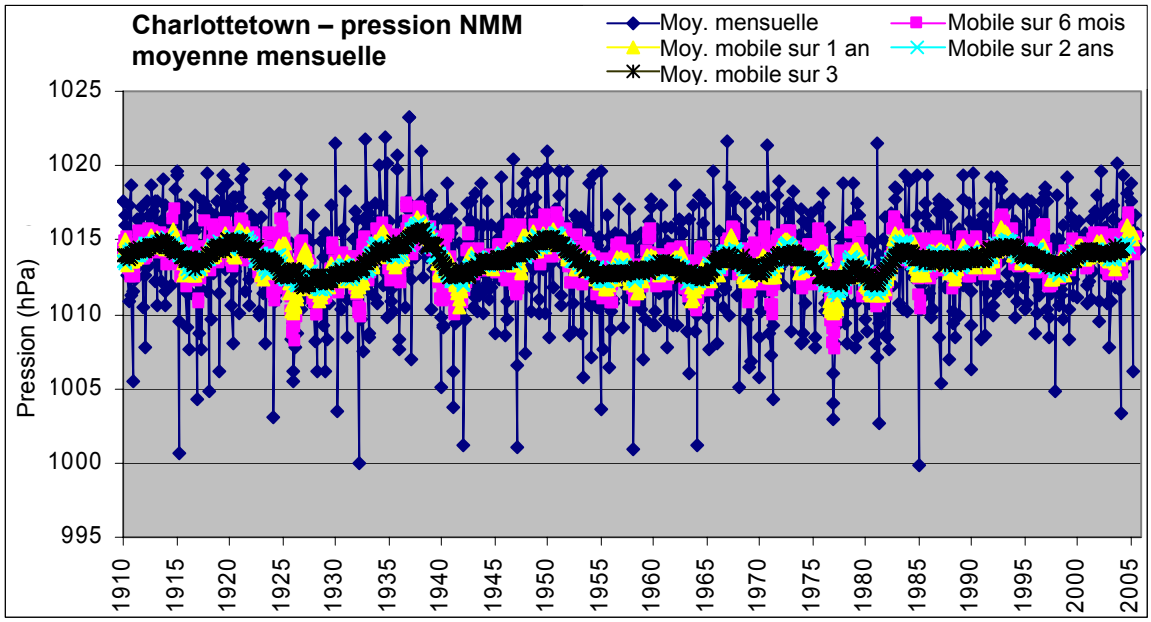


Figure 20. Pression NMM moyenne mensuelle à Charlottetown (1910-2005), avec moyennes mobiles.

La figure 21 montre l'anomalie mensuelle de la pression NMM calculée pour Charlottetown en tant que différence entre la moyenne mensuelle de chaque mois et la moyenne globale. À noter que la pression a tendance à être relativement basse en hiver, et relativement élevée à la fin de l'été et au début de l'automne. La variance de la pression NMM moyenne mensuelle est aussi plus importante en hiver, du fait de la variabilité de la pression atmosphérique qui accompagne les tempêtes d'hiver.

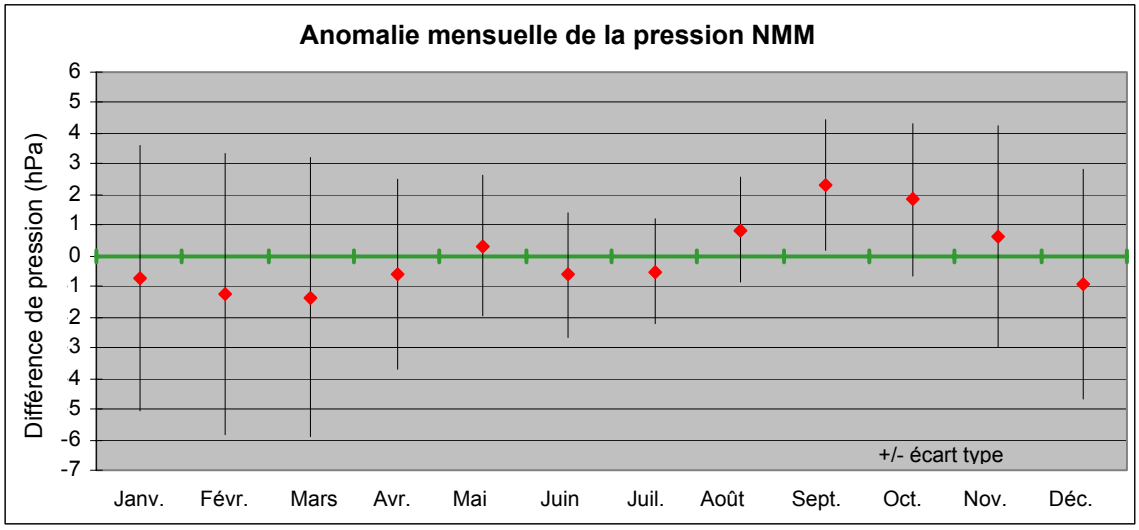


Figure 21. Anomalie mensuelle de la pression NMM à Charlottetown (données de 1900-2002).

4.1.3.2 Correction des données de niveau d'eau à Charlottetown en fonction des variations de la pression

La figure 22 montre les moyennes mensuelles du niveau de l'eau à Charlottetown (déjà présentées à la figure 5), avec les mêmes données corrigées en fonction de la pression NMM moyenne mensuelle à Charlottetown, en supposant un ajustement isostatique de 1,0 cm par hPa ou millibar (0,1 m/kPa) par rapport à la moyenne globale (1013,6 hPa). Cette correction est pondérée selon le pourcentage de données manquantes, c'est-à-dire que, s'il manque un tiers des données, on n'apporte que les deux tiers de la correction. Huit de ces valeurs mensuelles sont corrigées à l'aide des pressions NMM de Chatham (Miramichi). On constate que cette correction représente une fraction significative de la variabilité observée dans les moyennes mensuelles du niveau de la mer.

La valeur aberrante pour avril 1989 se distingue comme anormalement basse : 37 % des données du mois manquaient; une comparaison avec Pictou (marégraphe le plus proche de Charlottetown) montre que ces données manquantes auraient fait monter la moyenne mensuelle.

La figure 23 présente les moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown, corrigées pour tenir compte de la variation de la pression NMM moyenne mensuelle à Charlottetown, avec une ligne de tendance linéaire dans les données et des moyennes mobiles sur 1 et 3 ans. La valeur aberrante (avril 1989) a été enlevée. La ligne de tendance montre que le niveau de la mer monte à raison de 31,8 cm/siècle.

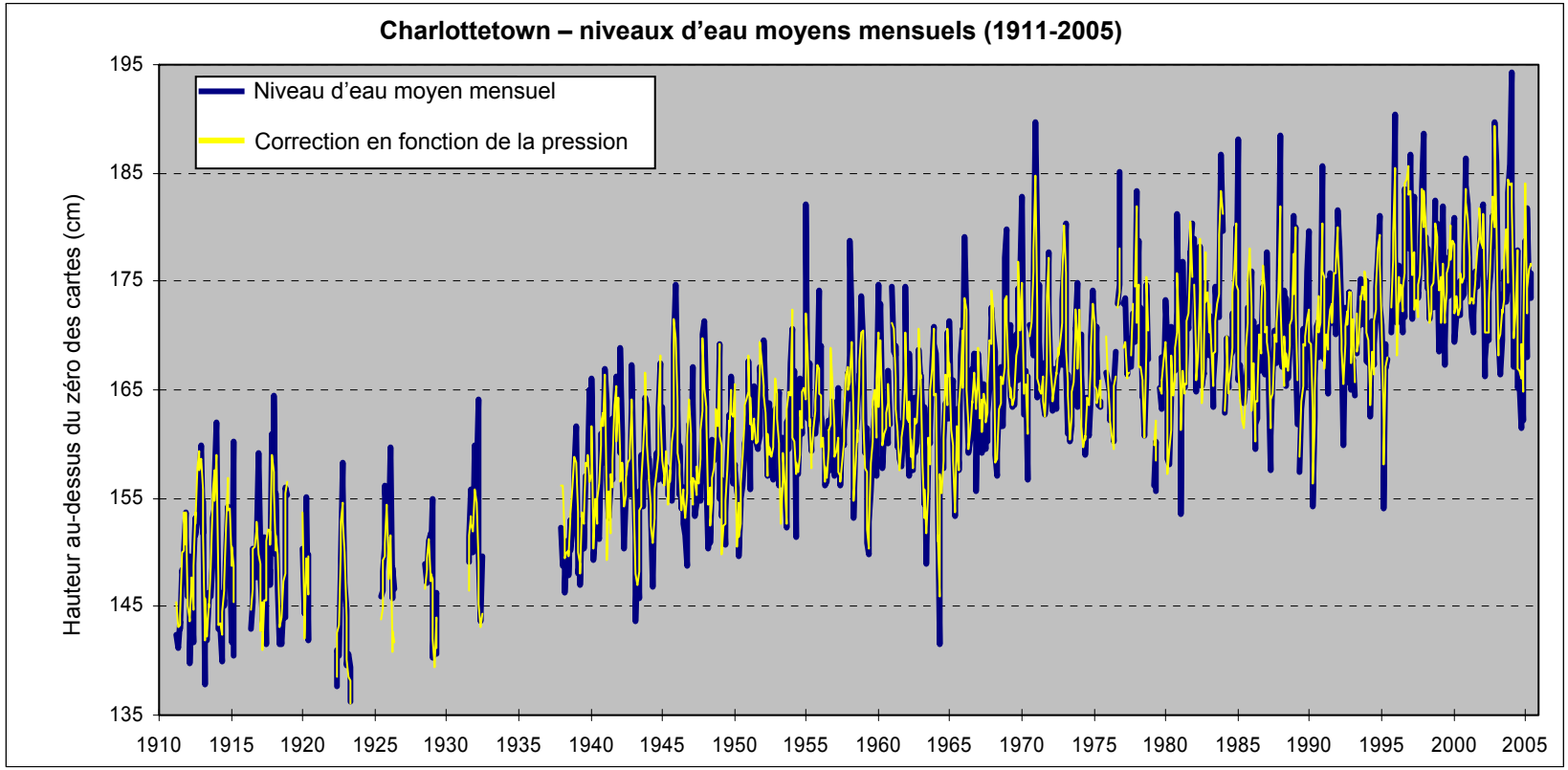


Figure 22. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown, et mêmes valeurs corrigées pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique.

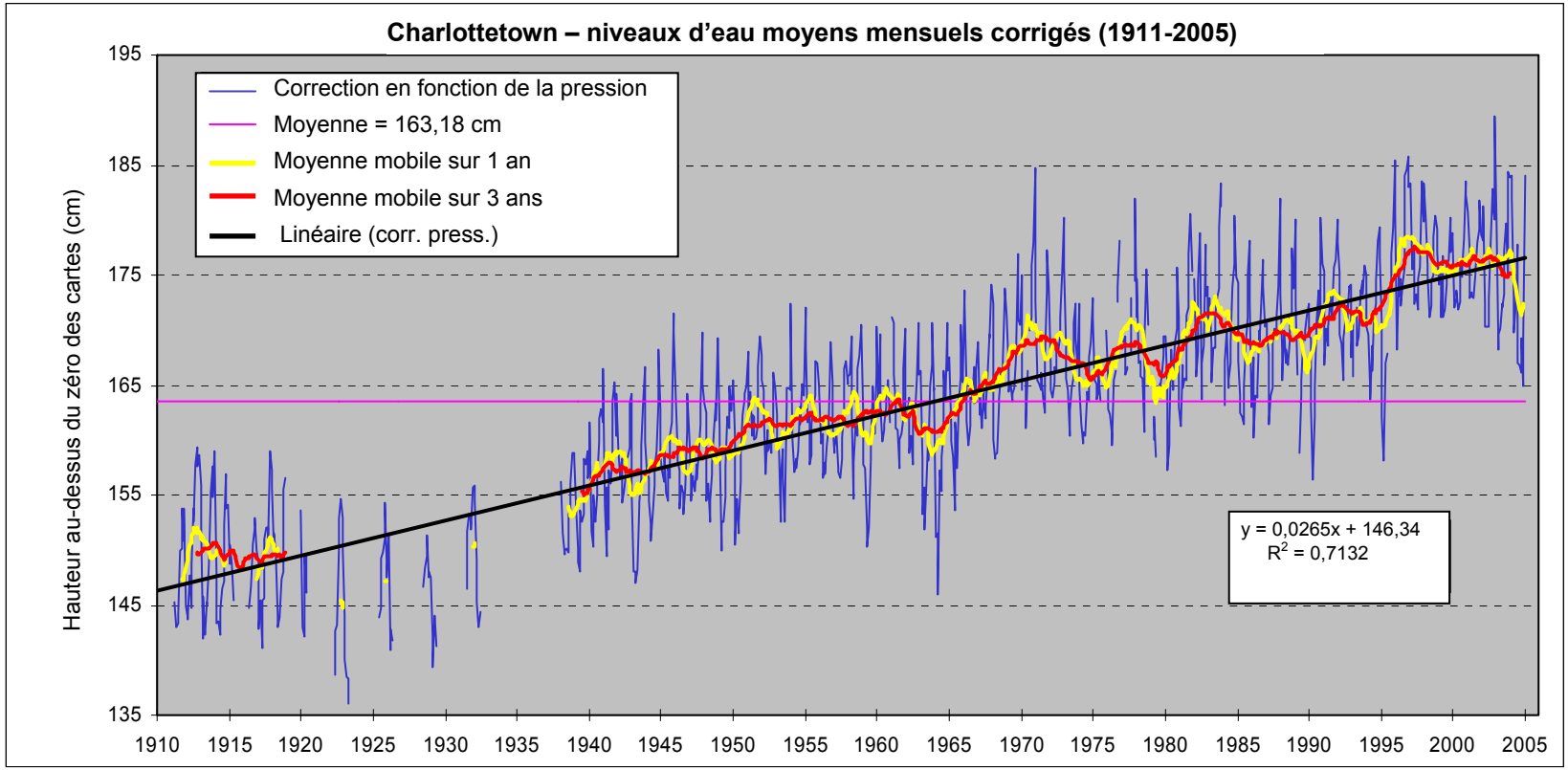


Figure 23. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown corrigées pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique, avec moyennes mobiles.

La figure 24 montre la moyenne annuelle corrigée du niveau de la mer à Charlottetown (déjà présentée à la figure 10), corrigée une autre fois en supposant une réaction isostatique aux variations de la pression, et pondérée en fonction du nombre de données disponibles pour chaque mois de l'année. Ce facteur de correction annuel (P_{annuel}) n'est pas équivalent à l'écart entre la pression moyenne annuelle et la moyenne annuelle globale de la pression (1013,6 hPa). P_{annuel} est défini comme la somme du nombre d'observations présentes chaque mois de l'année, multipliée par l'anomalie de la pression NMM mensuelle du mois en question, divisée par le nombre total d'observations sur l'année. Donc, si la plupart des observations sont manquantes, surtout pendant un mois de pression atmosphérique moyenne mensuelle inhabituellement élevée ou basse, les quelques observations restantes auront moins d'impact sur le facteur de correction annuel que si l'on disposait de toutes les observations.

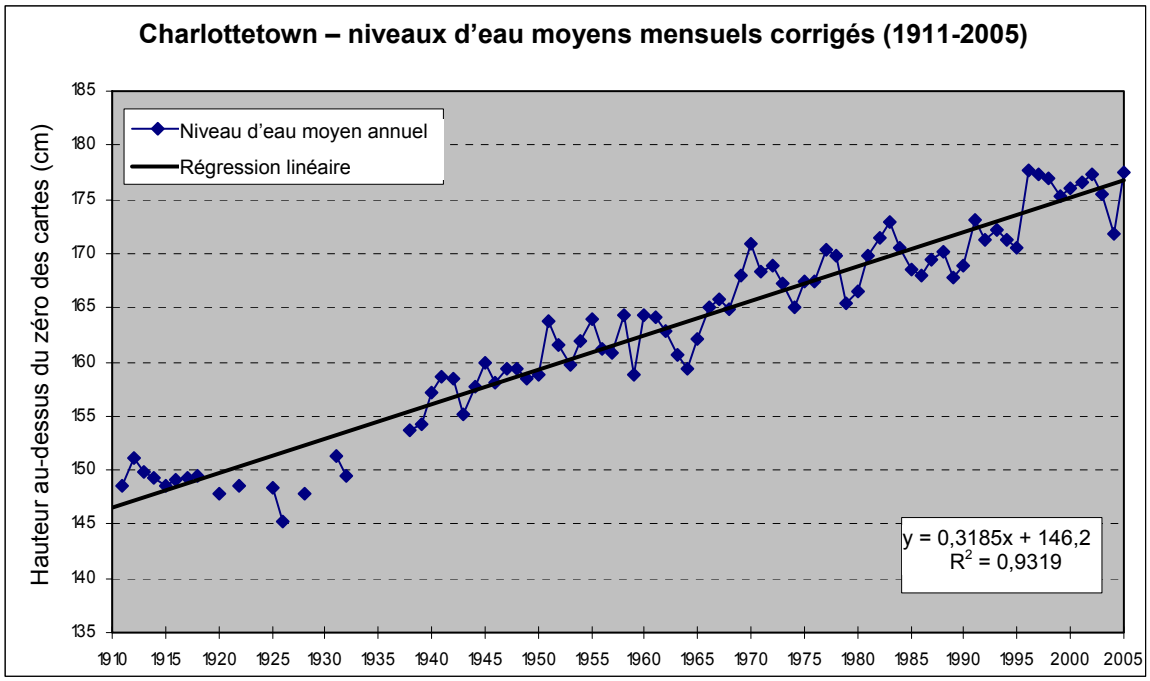


Figure 24. Données de niveau d'eau pour Charlottetown, moyennes annuelles sur 1911-2005 (corrigées en fonction des données manquantes et de la variation de la pression atmosphérique; les valeurs aberrantes de 1923 et 1929 sont enlevées).

La pente de la régression reste sensiblement la même, avec 32 cm/siècle. La valeur moyenne quadratique s'améliore un peu.

La figure 25 (panneau du haut) montre les moyennes mobiles sur 1 an (en fait 13 mois) des niveaux d'eau mensuels à Charlottetown, avec les moyennes mobiles sur 1 an des données mensuelles corrigées pour tenir compte de la variation mensuelle de la pression atmosphérique. On peut considérer les moyennes annuelles du niveau de l'eau comme un sous-sous-ensemble de ces données. Nous avons retiré les moyennes mensuelles du niveau de l'eau pour les mois où il manquait plus de 50 % des données. Les points de données ont été enlevés du pointage lorsque plus de 10 des 13 enregistrements consécutifs de moyennes mensuelles nécessaires n'étaient pas disponibles.

La figure 25 (panneau du bas) montre les moyennes mobiles sur 3 ans (en fait 37 mois) des niveaux d'eau mensuels à Charlottetown, avec les moyennes mobiles sur 3 ans des données mensuelles corrigées pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique. Cet enregistrement du niveau de la mer est un peu plus lisse que les pointages des moyennes annuelles du niveau de la mer (on remarquera que les valeurs moyennes quadratiques sont plus élevées). On n'a pas apporté ici de correction pour les données manquantes, à l'exception du fait que les points de données ont été enlevés du pointage lorsque plus de 30 des 37 enregistrements consécutifs de moyennes mensuelles nécessaires n'étaient pas disponibles.

La pente de la régression linéaire du graphique des moyennes mobiles sur 1 an donne une valeur d'élévation du niveau de la mer de 30,12 cm/siècle. Pour les moyennes mobiles sur 3 ans, la tendance linéaire donne un taux moyen d'élévation du niveau de la mer de 30,36 cm/siècle (données non corrigées) et 30,12 cm/siècle (données corrigées en fonction de la variation mensuelle de la pression atmosphérique). Ces valeurs sont un peu inférieures à celles calculées à partir des moyennes annuelles du niveau d'eau (figures 3, 9, 10 et 23), parce que les données de niveau d'eau des années 1920 y interviennent moins.

La figure 26 présente les mêmes données que la figure 25, mais cette fois avec une ligne de tendance polynomiale d'ordre 4. Les valeurs moyennes quadratiques s'améliorent un peu par rapport à la correction linéaire, mais il demeure un danger avec ce genre d'analyse. L'inflexion de la ligne vers le haut dans les dernières années donne à penser que le niveau de la mer s'est élevé plus vite depuis une vingtaine d'années (disons depuis 1985) que dans la période antérieure à disons 1960. Cependant, la ligne de tendance montre aussi les premières variations (dont une ligne horizontale ou légèrement descendante au début de l'enregistrement de données, qui, détail intéressant, se manifeste dans le pointage des moyennes mobiles sur 3 ans malgré l'absence des basses valeurs des années 1920 due à leur rareté). On ne peut pas tirer de conclusions fiables sur le taux d'accélération, s'il y en a un, de l'élévation relative du niveau de la mer à Charlottetown.

Il faut noter qu'il existe des données plus vieilles des niveaux d'eau à Charlottetown (1907-1911) dans la documentation (Dawson, 1917), mais pas dans le format numérique des archives du SDMM.

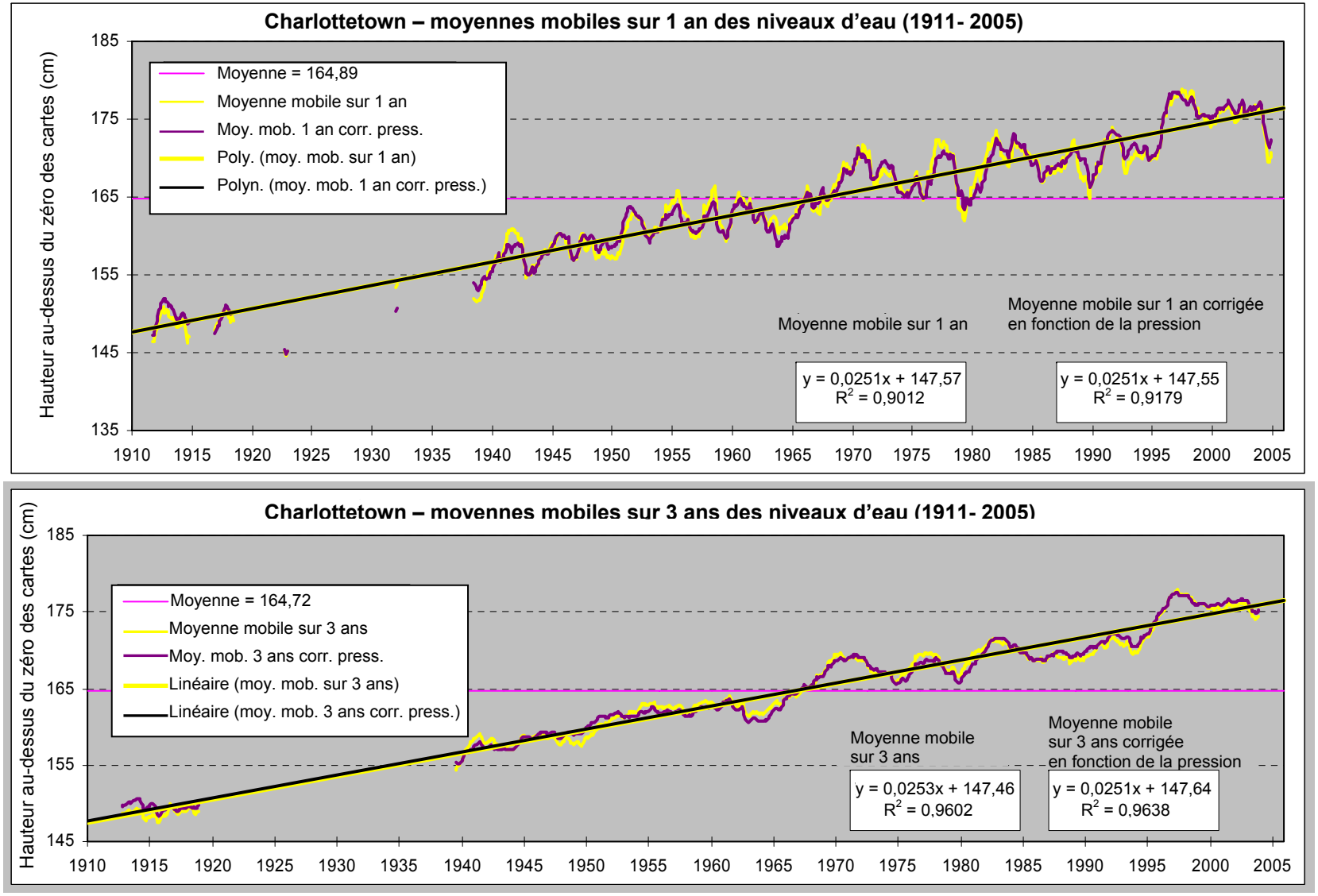


Figure 25. Moyennes mobiles sur 1 an (en haut) et sur 3 ans (en bas) des données de niveau d'eau à Charlottetown et données mensuelles corrigées (1911-2005).

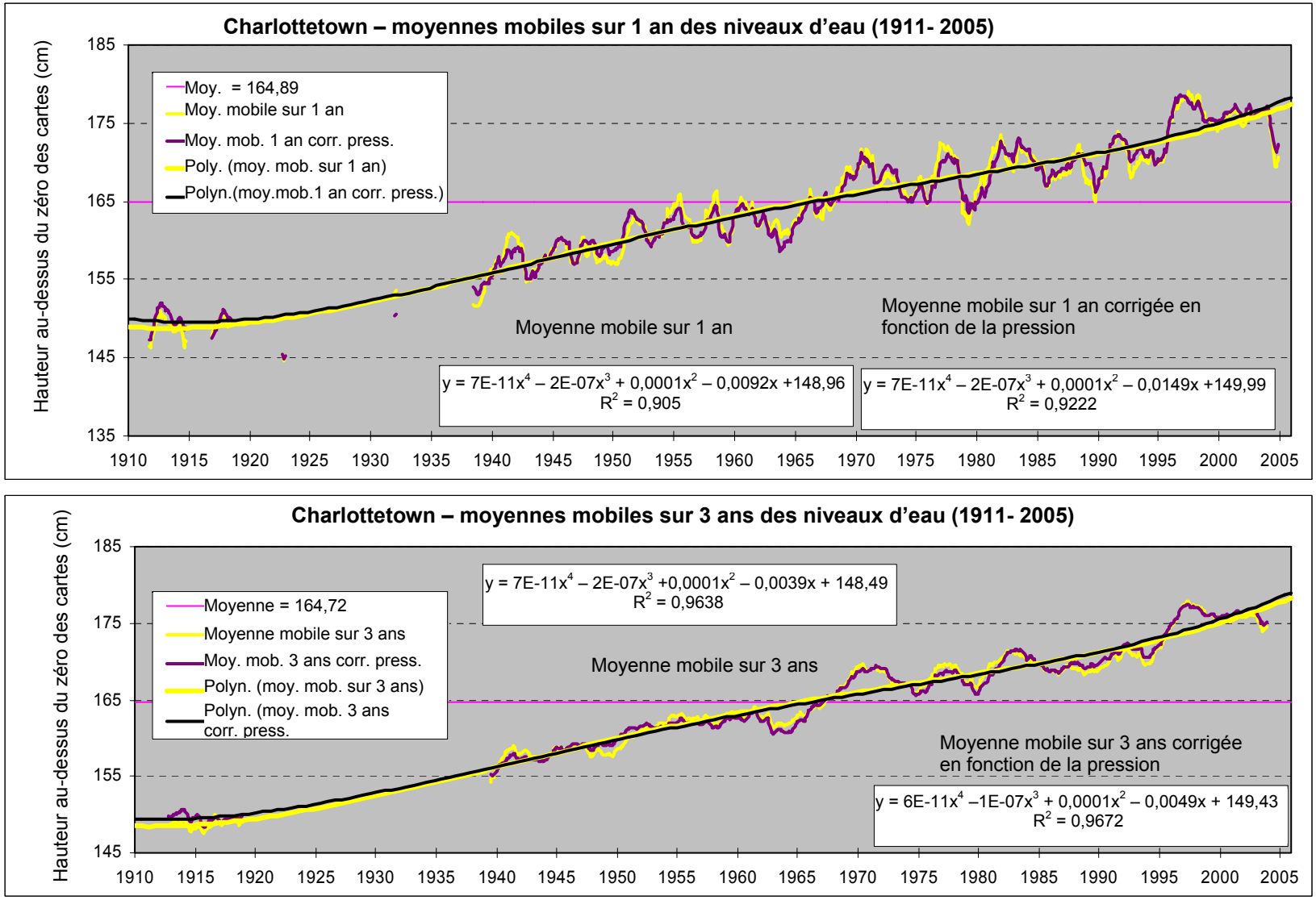


Figure 26. Moyennes mobiles sur 1 an (en haut) et sur 3 ans (en bas) des données de niveau d'eau à Charlottetown et données mensuelles non corrigées (1911-2005).

4.1.3.3 Correction des données d'Escuminac et de Pointe-du-Chêne pour tenir compte des variations de la pression

La figure 27 montre les moyennes mensuelles du niveau d'eau à Escuminac (déjà présentées à la figure 18), avec les mêmes données corrigées en fonction de la variation de la pression NMM mensuelle moyenne. Les données sur la pression NMM mensuelle moyenne proviennent surtout de Chatham, Nouveau-Brunswick. Lorsque la pression à Chatham n'était pas disponible (octobre 1991 à janvier 1994 et décembre 1997 à mai 1999), elle a été remplacée par la pression à Pointe Escuminac. Les exceptions à cette méthode concernaient décembre 1997 et janvier 1998, pour lesquels les données de Chatham et d'Escuminac manquaient; on a donc pris les pressions à Charlottetown. Les corrections supposent un ajustement isostatique de un centimètre par hPa ou millibar (0,1 m/kPa) par rapport à la moyenne globale (1973-2005) de 1013,54 hPa à Escuminac et à Chatham. On constate que cette correction contribue pour beaucoup à la variabilité observée dans les moyennes mensuelles du niveau de la mer.

On voit à la figure 28 la moyenne mensuelle du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne (déjà présentée à la figure 19), avec les mêmes données corrigées en fonction de la variation de la pression NMM mensuelle moyenne. Les données sur la pression NMM mensuelle moyenne proviennent de Moncton. Les corrections supposent un ajustement isostatique de un centimètre par hPa par rapport à la moyenne globale de 1013,78 hPa à Moncton sur la période de l'enregistrement des niveaux d'eau.

Les figures 29 et 30 montrent les moyennes mensuelles du niveau de l'eau à Escuminac et à Pointe-du-Chêne, corrigées en fonction de la variation de la pression NMM mensuelle moyenne, telle que décrite plus haut, avec une tendance linéaire et des moyennes mobiles sur 1 et 3 ans. Pour faciliter la comparaison, les axes des x et des y sont à la même échelle. Les lignes de tendance indiquent que l'élévation du niveau de la mer est de 23,28 cm/siècle à Escuminac et de 27,12 cm/siècle à Pointe-du-Chêne.

Les figures 31 et 32 montrent les moyennes annuelles corrigées du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne (déjà présentées aux figures 16 et 17), puis corrigées ici une autre fois, en supposant l'existence d'un ajustement isostatique, pour tenir compte des effets des variations de la pression pondérées en fonction de la quantité de données disponibles pour chaque mois de l'année. À Escuminac, ces corrections vont d'un abaissement du niveau annuel moyen de la mer de 2,22 cm en 1976 à une hausse de 1,39 cm en 1996. À Pointe-du-Chêne, elles vont d'un abaissement du niveau annuel moyen de la mer de 2,34 cm en 1981 à une hausse de 1,17 cm en 1984. Les tendances linéaires augmentent légèrement aux deux endroits et les valeurs moyennes quadratiques s'améliorent.

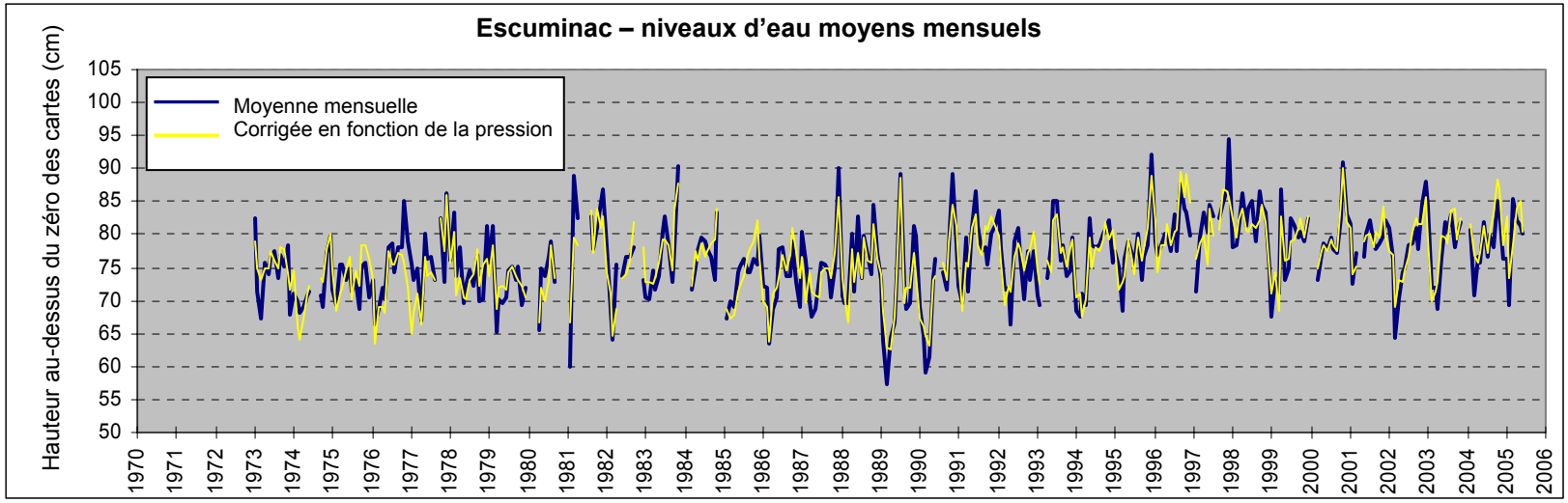


Figure 27. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Escuminac et moyennes mensuelles corrigées pour tenir compte des variations de la pression atmosphérique.

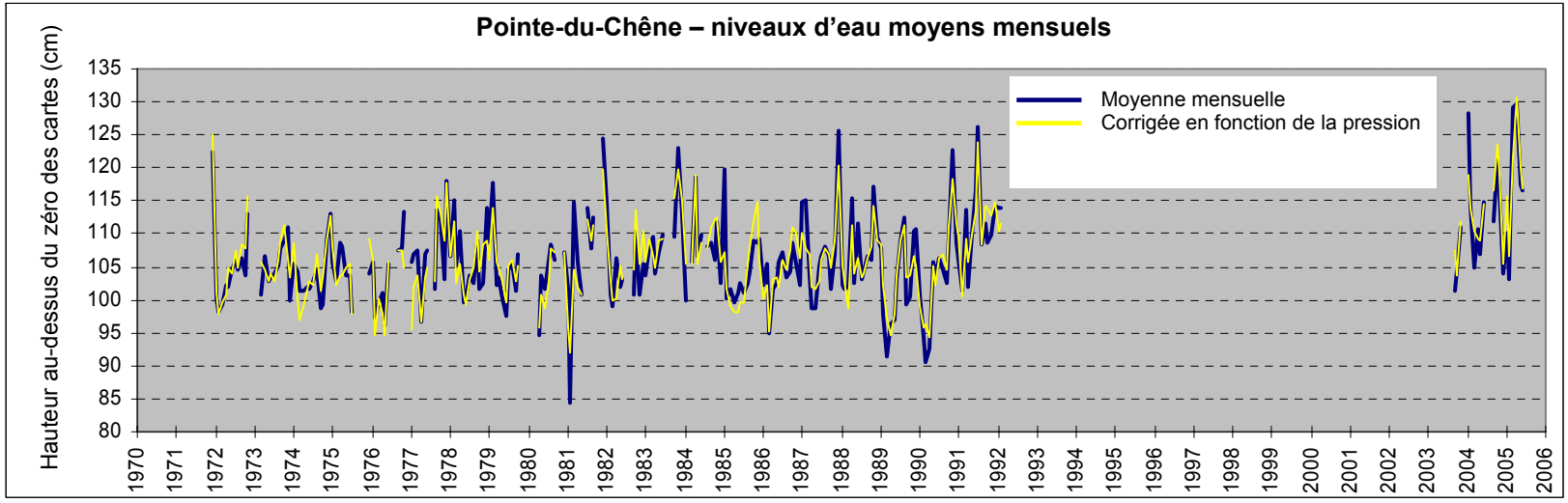


Figure 28. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne et moyennes mensuelles corrigées pour tenir compte des variations de la pression atmosphérique.

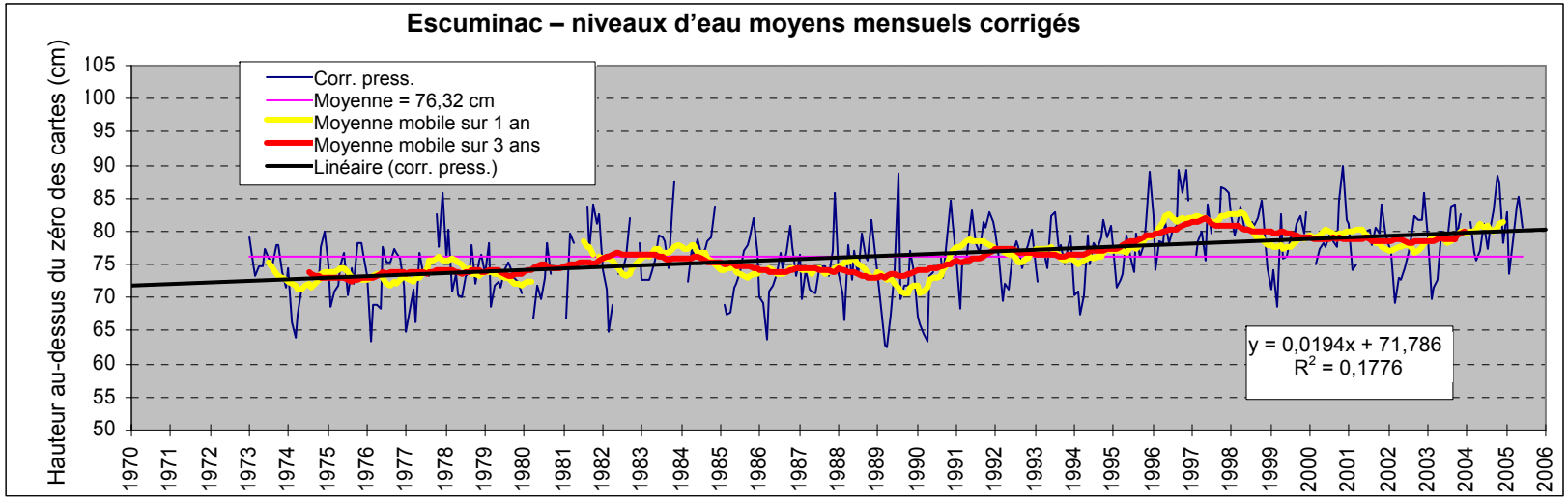


Figure 29. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Escuminac corrigées pour tenir compte des variations de la pression atmosphérique, avec moyennes mobiles.

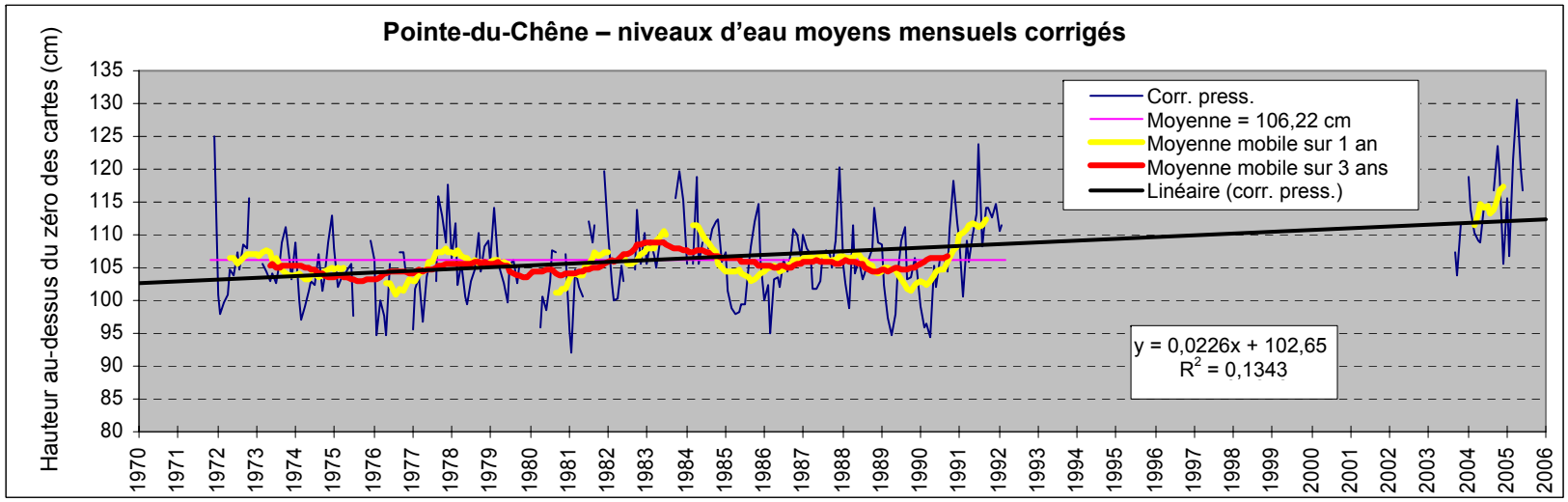


Figure 30. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne corrigées pour tenir compte des variations de la pression atmosphérique, avec moyennes mobiles.

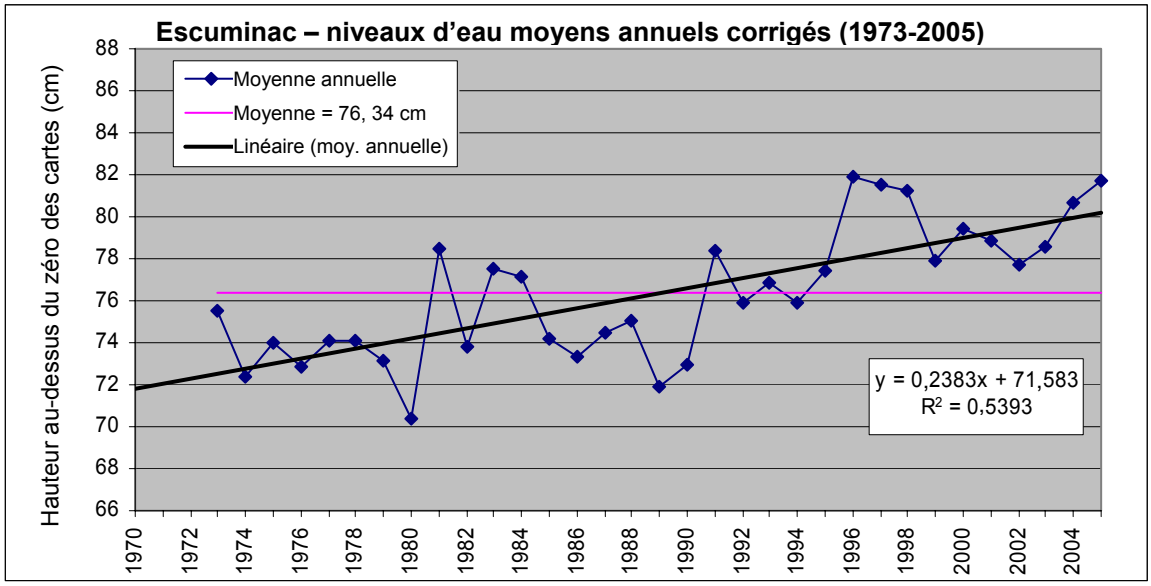


Figure 31. Moyennes annuelles du niveau de l'eau à Escuminac, 1973 à 2005, corrigées pour tenir compte des données manquantes et des variations de la pression atmosphérique.

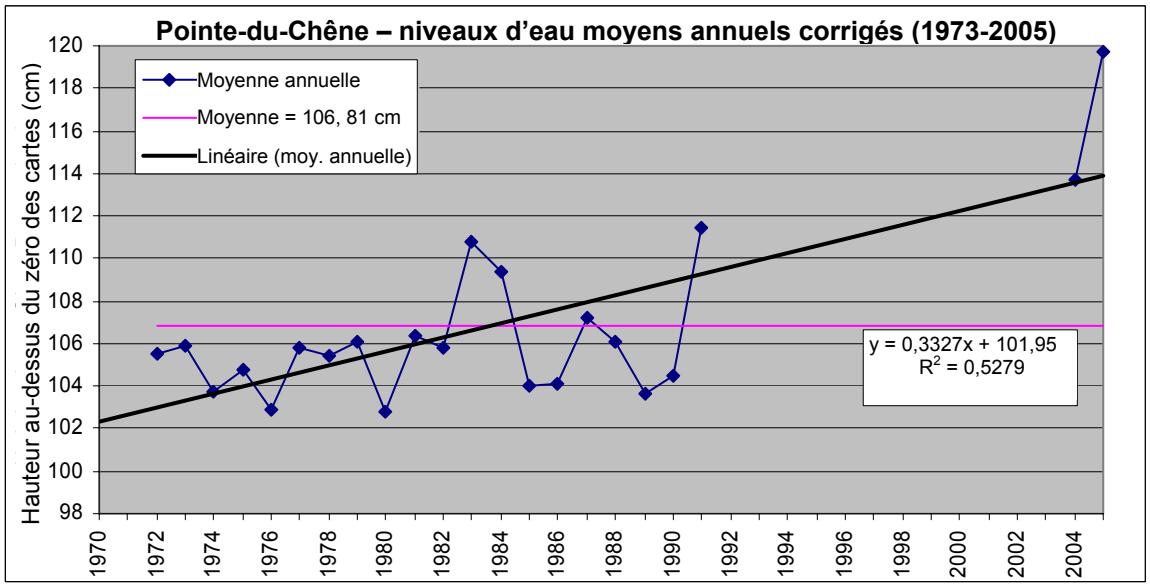


Figure 32. Moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne, 1972 à 2005, corrigées pour tenir compte des données manquantes et des variations de la pression atmosphérique.

4.1.4 Estimation des tendances à plus long terme du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne à l'aide de méthodes de propagation des différences

Carrera *et al.* (1991a) préviennent des difficultés qu'il y a à calculer des tendances linéaires à partir d'ensembles courts de données (moins de 40 ans) et du fait que ces résultats peuvent être contaminés par des signaux océaniques de basse fréquence. Ils font remarquer qu'on peut obtenir des tendances linéaires basées sur de courts enregistrements qui soient plus fiables en utilisant des méthodes de propagation des différences. Dans cette section, nous commençons par propager les différences des tendances linéaires entre les données de niveau d'eau de Charlottetown, d'Escuminac et de Pointe-du-Chêne, pendant les périodes où ces données se chevauchent, à la tendance à long terme du niveau de la mer à Charlottetown (~32 cm/siècle) pour estimer les taux à long terme d'élévation du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne. Nous adoptons ensuite une approche légèrement différente et propageons la tendance des différences des moyennes mensuelles du niveau de la mer entre Escuminac et Charlottetown et entre Pointe-du-Chêne et Charlottetown à la tendance à long terme de Charlottetown.

4.1.4.1 Propagation des différences dans les tendances linéaires

4.1.4.1.1 Escuminac et Charlottetown

La figure 33 montre les moyennes annuelles du niveau de l'eau à Escuminac pour les 33 ans de l'enregistrement 1973-2005 (voir plus haut à la figure 11), avec les valeurs correspondantes à Charlottetown. Les niveaux d'eau de Charlottetown ont été décalés (aux fins de l'affichage) de la différence entre les moyennes des niveaux d'eau annuels moyens aux deux stations (c.-à-d. qu'on a soustrait 95,01 cm des données de Charlottetown). Sur la période considérée, le niveau de la mer a monté à raison d'environ 20,1 cm/siècle à Escuminac, et de 28,3 cm/siècle en moyenne à Charlottetown. La différence entre les deux tendances est donc de 8,2 cm/siècle. Sur l'enregistrement plus long de 1911-2002, le niveau de l'eau à Charlottetown s'est élevé à un taux moyen d'environ 32 cm/siècle (voir les figures 3, 9 et 10), ce qui donne à penser que la vitesse moyenne à long terme de l'élévation du niveau de la mer à Escuminac devrait être plus proche d'environ 23,8 cm/siècle.

La figure 34 montre les moyennes annuelles du niveau de l'eau à Escuminac pour les 33 ans de l'enregistrement 1973-2003, corrigées pour tenir compte des données manquantes et des variations de la pression atmosphérique (comme plus haut à la figure 30), avec les valeurs correspondantes à Charlottetown, corrigées de la même façon et également ramenées (aux fins de l'affichage) à un zéro commun du niveau de la mer (en soustrayant 95,16 cm des données de Charlottetown). Comme le montraient les figures 22 et 23, ces corrections ont tendance à faire baisser la variabilité à court terme (les moyennes mensuelles en particulier, mais aussi les moyennes annuelles) avec une incidence moindre à moyen terme (moyenne mobile sur 3 ans du niveau de la mer) et minimale sur les pentes des droites de régression à l'échelle du siècle (figure 24). À la figure 34, les valeurs moyennes quadratiques ont augmenté, et on peut dire que les pointages du niveau moyen de la mer sont plus cohérents. Les taux d'élévation du niveau de la mer ont augmenté aux deux stations. À Charlottetown, la tendance est proche de

32 cm/siècle, ce qui indique que la tendance à long terme à Escuminac est d'environ 23,6 cm/siècle.

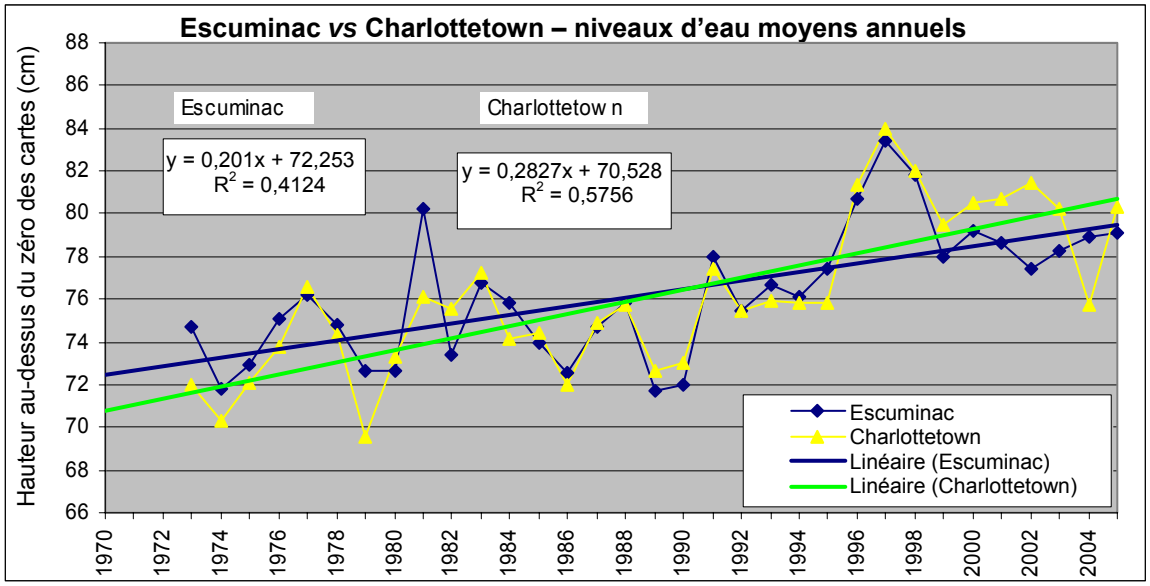


Figure 33. Moyennes annuelles du niveau de l'eau à Escuminac et à Charlottetown (ramenées à la même échelle par soustraction de 95,01 cm), pour la période 1973-2005.

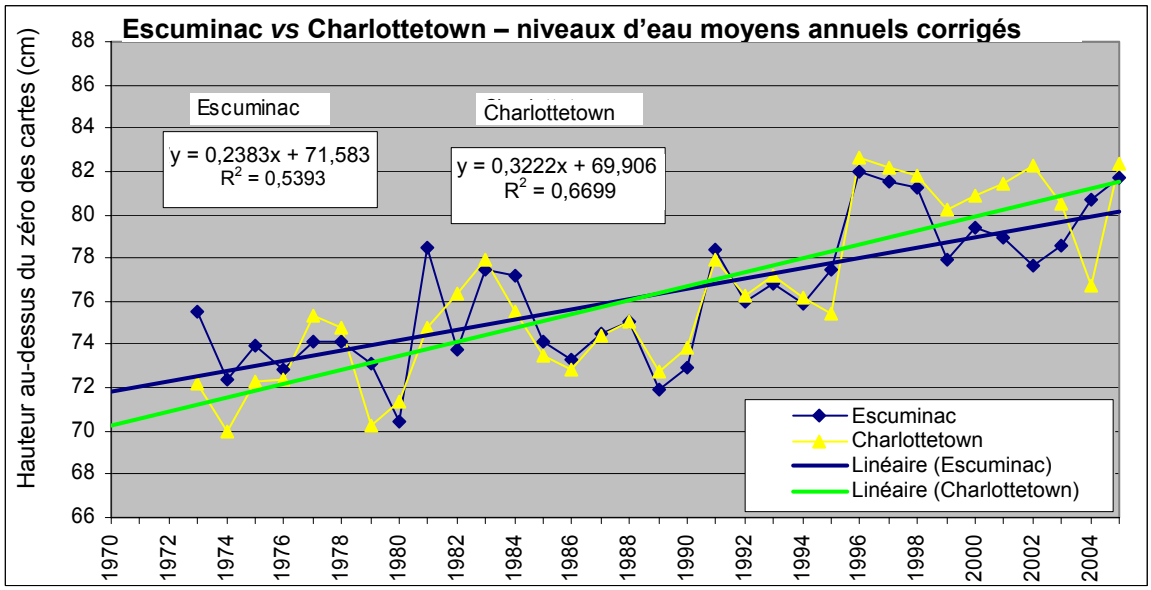


Figure 34. Moyennes annuelles du niveau de l'eau à Escuminac et à Charlottetown (ramenées à la même échelle par soustraction de 95,16 cm), corrigées pour tenir compte des données manquantes et normalisées en fonction des variations de la pression atmosphérique, pour la période 1973-2005.

4.1.4.1.2 Pointe-du-Chêne, Charlottetown et Escuminac

On voit à la figure 35 les moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne sur les 20 années de son enregistrement 1972-1991 (déjà présentées à la figure 12), avec les valeurs correspondantes à Charlottetown. Les niveaux d'eau de Charlottetown ont été décalés (aux fins de l'affichage) de la différence entre les moyennes des niveaux d'eau annuels moyens aux deux stations (c.-à-d. qu'on a soustrait 63,29 cm des données de Charlottetown). Sur la période considérée, le niveau de la mer a monté à raison d'environ 11 cm/siècle à Pointe-du-Chêne, et de 15,16 cm/siècle à Charlottetown. Autrement dit, le niveau relatif de la mer à Pointe-du-Chêne montait plus lentement qu'à Charlottetown, de 4,16 cm/siècle. Soustraite de la tendance à long terme à Charlottetown, cette valeur donne à penser que le taux moyen à long terme de l'élévation du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne est de 27,1 cm/siècle.

La figure 36 présente les moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne sur les 20 ans de l'enregistrement 1972-1991, corrigées pour tenir compte des données manquantes et des variations de la pression atmosphérique (voir plus haut la figure 31). La figure 36 présente aussi les valeurs correspondantes à Charlottetown, corrigées de la même manière et ramenées (aux fins de l'affichage) à un zéro commun du niveau de la mer (en soustrayant 63,08 cm des données de Charlottetown). Tant les valeurs moyennes quadratiques que les pentes de la régression ont augmenté légèrement. Sur ce graphique, le niveau relatif de la mer montait à raison de 16,65 cm/siècle à Charlottetown, et de 12,45 cm/siècle à Pointe-du-Chêne, soit une différence de 4,2 cm/siècle, ce qui suggère une tendance à long terme de 27,8 cm/siècle dans la région de Pointe-du-Chêne.

La figure 37 montre les moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne pour 19 des 20 années de son enregistrement 1973-1991, avec les valeurs correspondantes corrigées à Escuminac. Les niveaux d'eau d'Escuminac ont été décalés (aux fins de l'affichage) de la différence entre les moyennes des niveaux d'eau annuels moyens aux deux stations (c.-à-d. qu'on a ajouté 31,36 cm aux données d'Escuminac). Sur la période considérée, le niveau de la mer a monté à raison d'environ 9,59 cm/siècle à Pointe-du-Chêne, et de 3,17 cm/siècle à Escuminac, soit une différence de 6,42 cm/siècle. Si on pose l'hypothèse que les niveaux d'eau à Escuminac montent de 23 cm/siècle, on peut penser que le taux à long terme d'élévation relative du niveau de la mer dans la région de Pointe-du-Chêne est de 29,4 cm/siècle.

La figure 38 présente les moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne et à Escuminac pour les 19 mêmes années communes de l'enregistrement 1973-1991, corrigées pour tenir compte des données manquantes et des variations de la pression atmosphérique, les niveaux à Escuminac étant ramenés (aux fins de l'affichage) à un zéro commun du niveau de la mer (en ajoutant 31,57 cm). Tant les valeurs moyennes quadratiques que les pentes de la régression ont légèrement augmenté, mais les valeurs de R^2 restent très basses. Dans cette analyse, le niveau relatif de la mer monte de 13,95 cm/siècle à Pointe-du-Chêne, et de 7,75 cm/siècle à Escuminac, soit une différence de 6,20 cm/siècle. En posant un taux à long terme à Escuminac de 23 cm/siècle, on obtient une tendance à long terme de 29,2 cm/siècle à Pointe-du-Chêne.

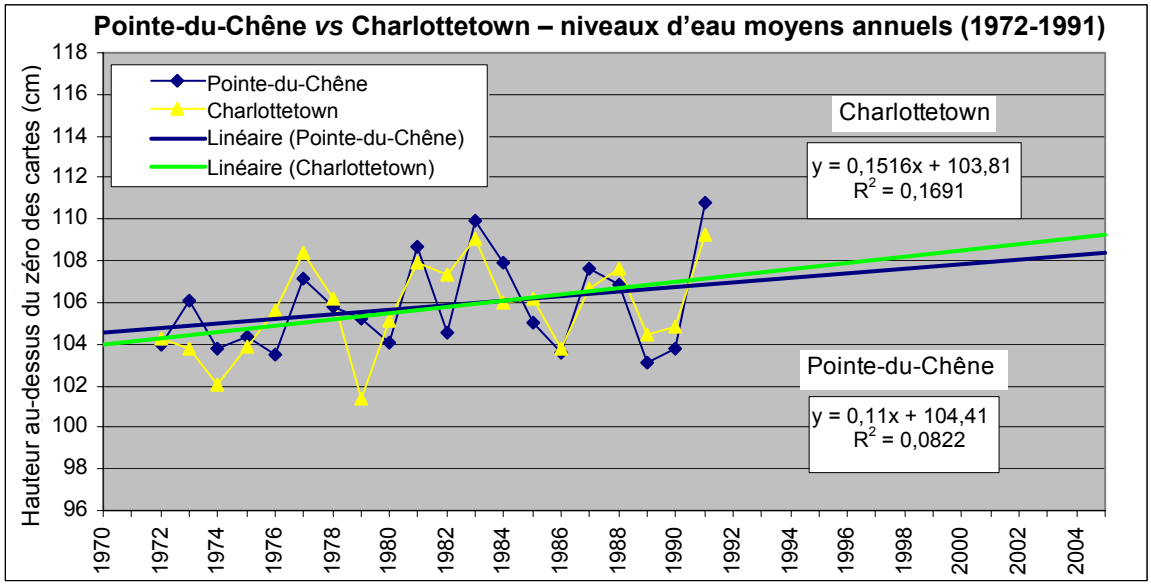


Figure 35. Moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne et à Charlottetown (ramenées à la même échelle par soustraction de 63,29 cm), pour la période 1972-1991.

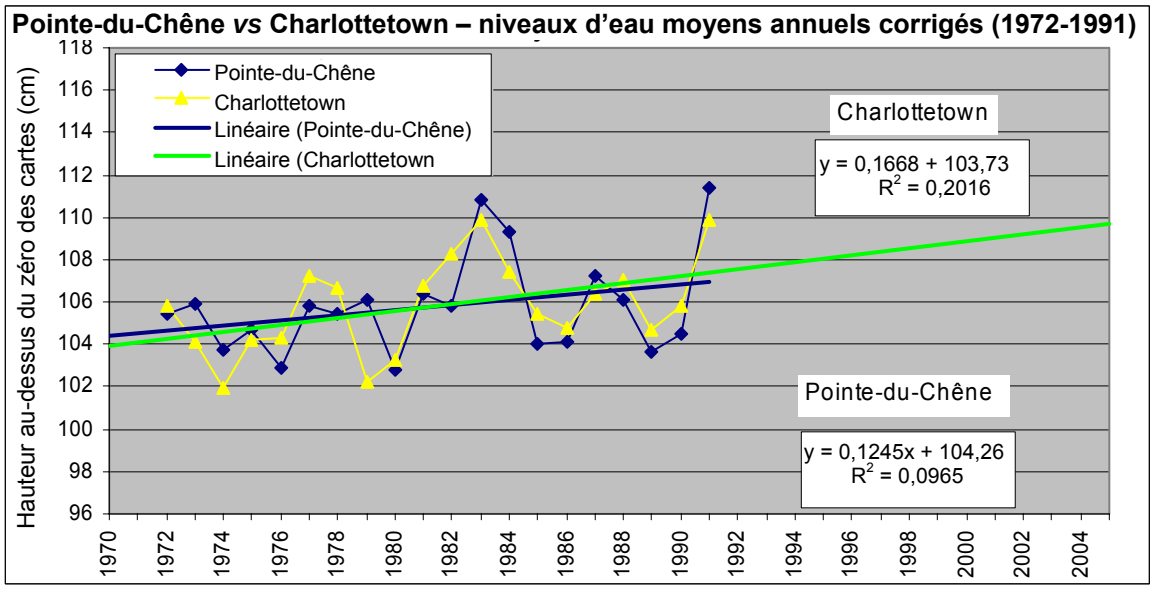


Figure 36. Moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne et à Charlottetown (ramenées à la même échelle par soustraction de 63,08 cm), corrigées pour tenir compte des données manquantes et normalisées en fonction des variations de la pression atmosphérique, pour la période 1972-1991.

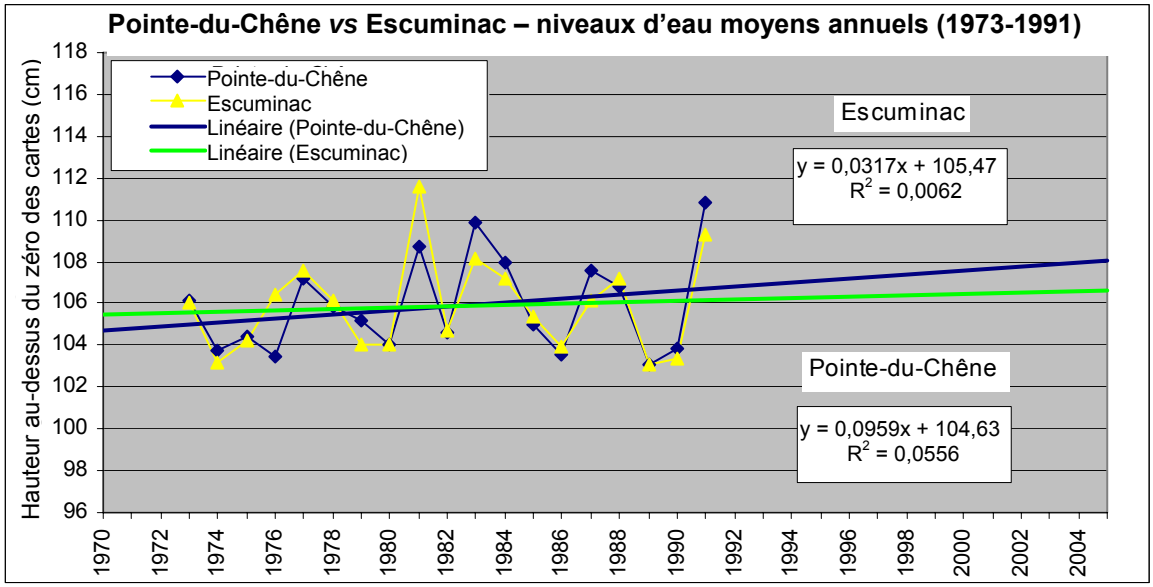


Figure 37. Moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne et moyennes corrigées à Escuminac (ramenées à la même échelle par addition de 31,36 cm), pour la période 1973-1991.

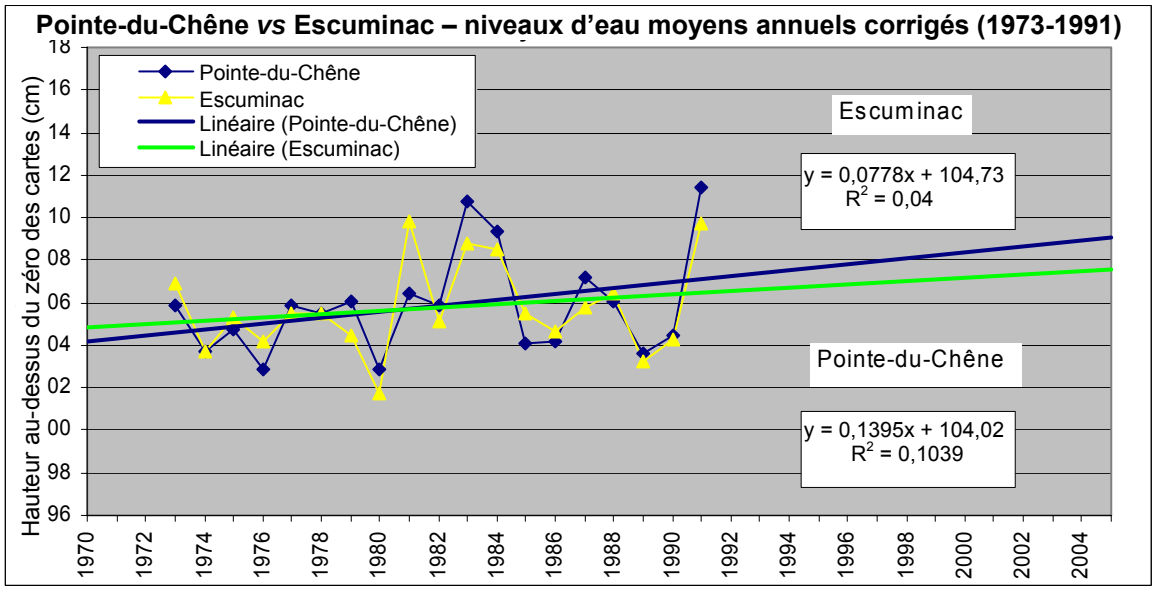


Figure 38. Moyennes annuelles du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne et à Escuminac (ramenées à la même échelle par addition de 31,57 cm), corrigées pour tenir compte des données manquantes et normalisées en fonction des variations de la pression atmosphérique, pour la période 1972-1991.

4.1.4.2 Propagation des tendances linéaires à partir des différences des moyennes mensuelles

Carrera *et al.* (1991a, 1991b) ont réalisé une carte des mouvements verticaux de la croûte terrestre au Canada à partir d'une analyse détaillée des données de niveau de l'eau alors disponibles au Canada et aux États-Unis. Les auteurs prennent en considération les différences entre les niveaux d'eau à des sites marégraphiques adjacents pour tenter d'annuler le bruit océanique, puis génèrent des tendances linéaires dans les différences, et les propagent à des tendances à long terme de sites marégraphiques de la région pour obtenir des estimations réalistes de l'élévation du niveau de la mer.

C'est la technique qui est utilisée ci-dessous aux figures 39-48 et qui analyse les moyennes mensuelles du niveau de la mer à divers sites marégraphiques pour des enregistrements chevauchants. Les niveaux mensuels moyens de la mer des deux sites sont exclus du graphique s'il manque plus de 50 % des données à l'un ou à l'autre. Il est important de se rappeler que l'unité des axes des x est le mois. Les tendances linéaires calculées doivent donc être multipliées par 1200 pour donner les taux d'élévation du niveau de la mer en cm/siècle.

La figure 39 présente les moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown et à Escuminac pour la période commune de l'enregistrement, avec les différences (soit Charlottetown moins Escuminac) et leurs tendances linéaires. Cette dernière est de 28,70 cm/siècle à Charlottetown et de 20,88 cm/siècle à Escuminac. La tendance linéaire des différences est de 7,80 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Charlottetown et Escuminac est donc de 7,82 cm/siècle. Lorsqu'on la soustrait de la tendance à long terme du niveau de la mer de 32 cm/siècle à Charlottetown, on peut conclure qu'Escuminac présente une tendance à long terme de 24,2 cm/siècle. Si nous propageons la tendance linéaire des différences à la tendance à long terme du niveau de la mer à Charlottetown, nous obtenons aussi une valeur estimative de 24,2 cm/siècle pour le taux moyen d'élévation relative du niveau de la mer à Escuminac.

Les mêmes données, corrigées pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique mensuelle moyenne, sont présentées à la figure 40. Charlottetown montre alors une tendance linéaire de 33,48 cm/siècle, Escuminac une tendance linéaire de 24,00 cm/siècle, et la différence (Charlottetown moins Escuminac) une tendance linéaire de 9,60 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Charlottetown et Escuminac est donc de 9,48 cm/siècle, ce qui donne à penser qu'Escuminac a une tendance à long terme de 23,5 cm/siècle. Si nous propageons la tendance linéaire des différences à partir de la tendance à long terme du niveau de la mer à Charlottetown (32 cm/siècle), nous obtenons une valeur estimative de 23,4 cm/siècle pour l'élévation du niveau de la mer dans la région d'Escuminac.

La figure 41 montre les moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown et à Pointe-du-Chêne pour le début de l'enregistrement de Pointe-du-Chêne, de 1972 à 1992, avec les différences du niveau d'eau (Charlottetown moins Pointe-du-Chêne) et leurs tendances linéaires. Cette dernière est de 20,40 cm/siècle à Charlottetown et de 12,36 cm/siècle à Pointe-du-Chêne; la différence entre les deux ensembles de données présente une tendance linéaire de 8,04 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Charlottetown et Pointe-du-Chêne est aussi de 8,04 cm/siècle. Lorsqu'on soustrait

cette valeur de la tendance à long terme du niveau de la mer à Charlottetown, soit 32 cm/siècle, on peut conclure que Pointe-du-Chêne présente une tendance à long terme de 24,0 cm/siècle, soit le résultat que nous avions obtenu en propageant la tendance linéaire des différences à partir de Charlottetown.

Les mêmes données, corrigées pour tenir compte de la pression atmosphérique mensuelle moyenne, sont présentées à la figure 42. Ici, la tendance linéaire est de 22,20 cm/siècle pour Charlottetown et de 13,68 cm/siècle pour Pointe-du-Chêne, et la différence entre les deux ensembles de données a une tendance linéaire de 8,52 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Charlottetown et Pointe-du-Chêne est elle aussi de 8,52 cm/siècle. Quand on la soustrait de la tendance à long terme du niveau de la mer à Charlottetown, 32 cm/siècle, on arrive à la conclusion que Pointe-du-Chêne a une tendance à long terme de 23,5 cm/siècle.

La figure 43 montre les moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown et à Pointe-du-Chêne pour la totalité de l'enregistrement de Pointe-du-Chêne, soit 1971 à 2005, avec les différences de niveau d'eau (Charlottetown moins Pointe-du-Chêne) et leurs tendances linéaires. La tendance linéaire est de 21,48 cm/siècle à Charlottetown et de 24,60 cm/siècle à Pointe-du-Chêne, et les différences présentent une tendance linéaire de –3,00 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Charlottetown et Pointe-du-Chêne est donc de 3,12 cm/siècle (Pointe-du-Chêne montant plus vite). Quand on ajoute cette valeur à la tendance à long terme du niveau de la mer à Charlottetown (32 cm/siècle), on peut penser que Pointe-du-Chêne a une tendance à long terme de 35,1 cm/siècle. Si nous propageons la tendance linéaire des différences à partir de la tendance à long terme à Charlottetown, nous obtenons une valeur estimative de l'élévation du niveau de la mer dans la région de Pointe-du-Chêne de 35,0 cm/siècle.

Les mêmes données, corrigées pour tenir compte de la pression atmosphérique mensuelle moyenne, sont présentées à la figure 44. Ici, la tendance linéaire est de 25,44 cm/siècle pour Charlottetown et de 27,6 cm/siècle pour Pointe-du-Chêne, et les différences entre les deux ensembles de données ont une tendance linéaire de -2,16 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Charlottetown et Pointe-du-Chêne est également de 2,16 cm/siècle. En ajoutant la différence à la tendance à long terme de Charlottetown, soit 32 cm/siècle, on obtient une valeur estimative de 34,2 cm/siècle pour l'élévation relative du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne.

On voit à la figure 45 les moyennes mensuelles du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne pour la période de chevauchement de données dans l'enregistrement original de Pointe-du-Chêne (1972-1991), avec les différences dans les niveaux d'eau (Pointe-du-Chêne moins Escuminac) et leurs tendances linéaires. La tendance linéaire est de 11,88 cm/siècle à Pointe-du-Chêne et de 6,48 cm/siècle à Escuminac, et les différences entre les deux ensembles de données présentent une tendance linéaire de 5,40 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Pointe-du-Chêne et Escuminac est aussi de 5,40 cm/siècle. Si on postule que le taux d'élévation relative du niveau de la mer à Escuminac est de 23 cm/siècle, sa valeur estimative dans la région de Pointe-du-Chêne est de 28,4 cm/siècle.

Les mêmes données, corrigées pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique mensuelle moyenne, sont présentées à la figure 46. Ici, la tendance

linéaire est de 17,80 cm/siècle à Pointe-du-Chêne et de 11,16 cm/siècle à Escuminac, et les différences entre les ensembles de données présentent une tendance linéaire de 6,72 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Escuminac et Pointe-du-Chêne est de 6,64 cm/siècle. Si on postule que le taux d'élévation du niveau de la mer à Escuminac est de 23 cm/siècle, on obtient des valeurs estimatives du taux moyen à long terme d'élévation relative du niveau de la mer de 29,6 et de 29,7 cm/siècle pour la région de Pointe-du-Chêne.

La figure 47 présente les moyennes mensuelles du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne pour la totalité de la période de chevauchement des données à Pointe-du-Chêne (1972 à 2005), avec les différences dans les niveaux d'eau (Pointe-du-Chêne moins Escuminac) et leurs tendances linéaires. La tendance linéaire est de 23,16 cm/siècle à Pointe-du-Chêne et de 14,76 cm/siècle à Escuminac, et les différences présentent une tendance linéaire de 8,40 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Pointe-du-Chêne et Escuminac est aussi de 8,40 cm/siècle. En supposant que le taux d'élévation du niveau de la mer à Escuminac soit de 23 cm/siècle, on obtient une valeur estimative de 31,4 cm/siècle pour l'élévation du niveau de la mer dans la région de Pointe-du-Chêne.

Les mêmes données, corrigées pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique mensuelle moyenne, sont présentées à la figure 48. Ici, la tendance linéaire est de 30,24 cm/siècle à Pointe-du-Chêne et de 22,20 cm/siècle à Escuminac, et les différences présentent une tendance linéaire de 8,04 cm/siècle. La différence des tendances linéaires entre Pointe-du-Chêne et Escuminac est également de 8,04 cm/siècle. Quand on l'ajoute au taux de 23 cm/siècle à Escuminac, on obtient une valeur estimative de l'élévation du niveau de la mer dans la région de Pointe-du-Chêne de 31,0 cm/siècle

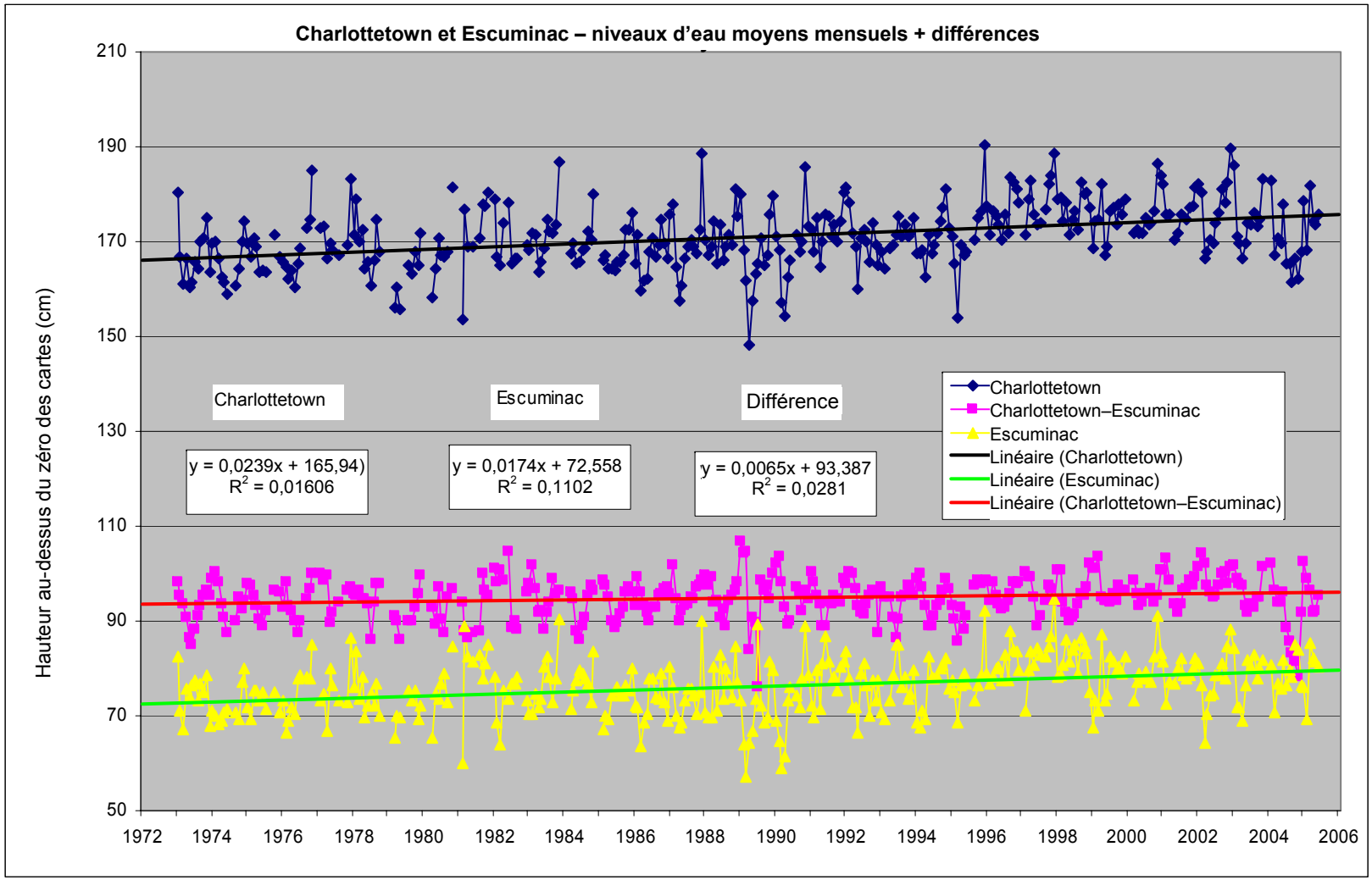


Figure 39. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown et à Escuminac (1973-2005) et leurs différences.

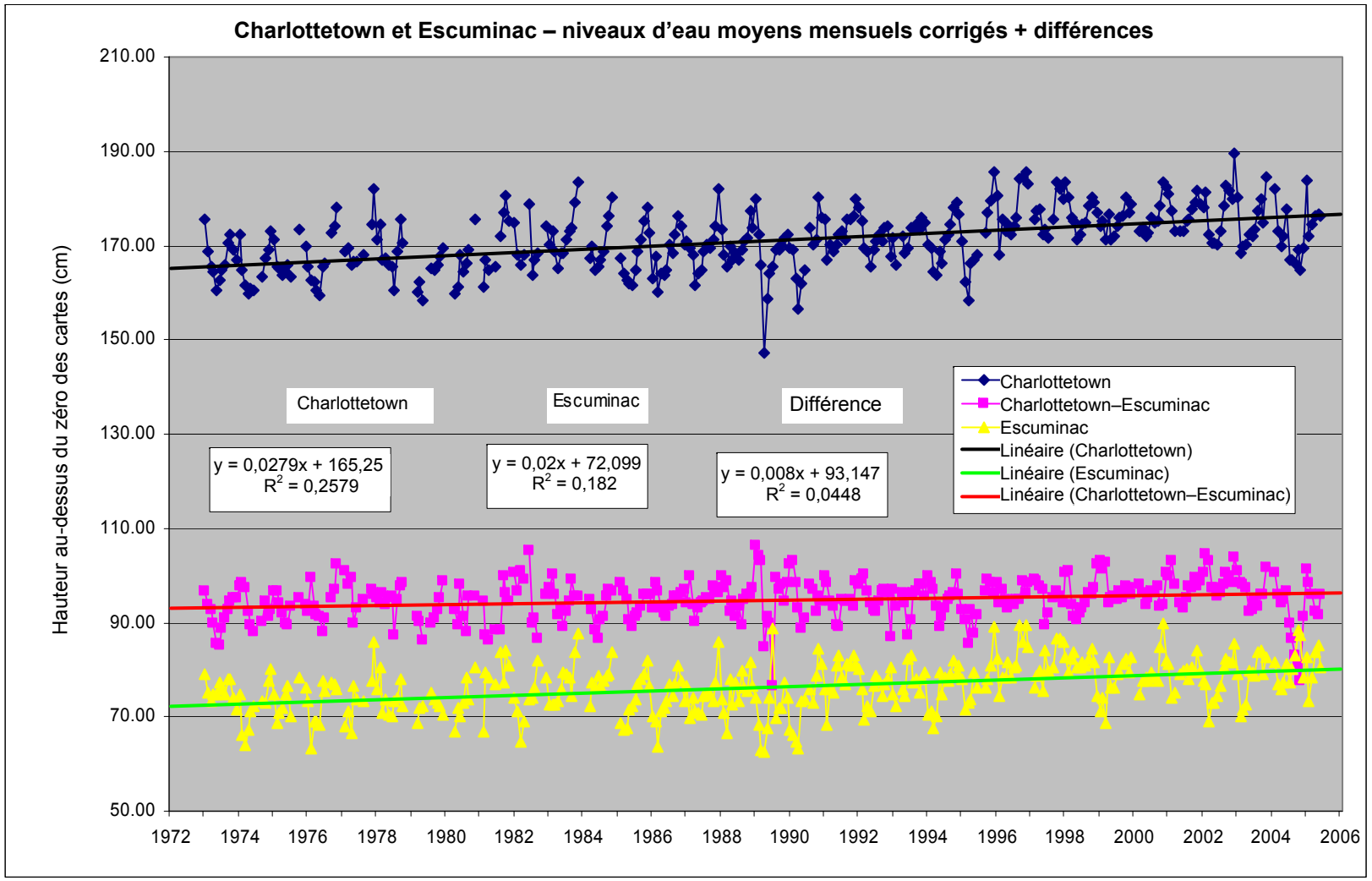


Figure 40. Moyennes mensuelles corrigées du niveau de la mer à Charlottetown et à Escuminac (1973-2005) et leurs différences.

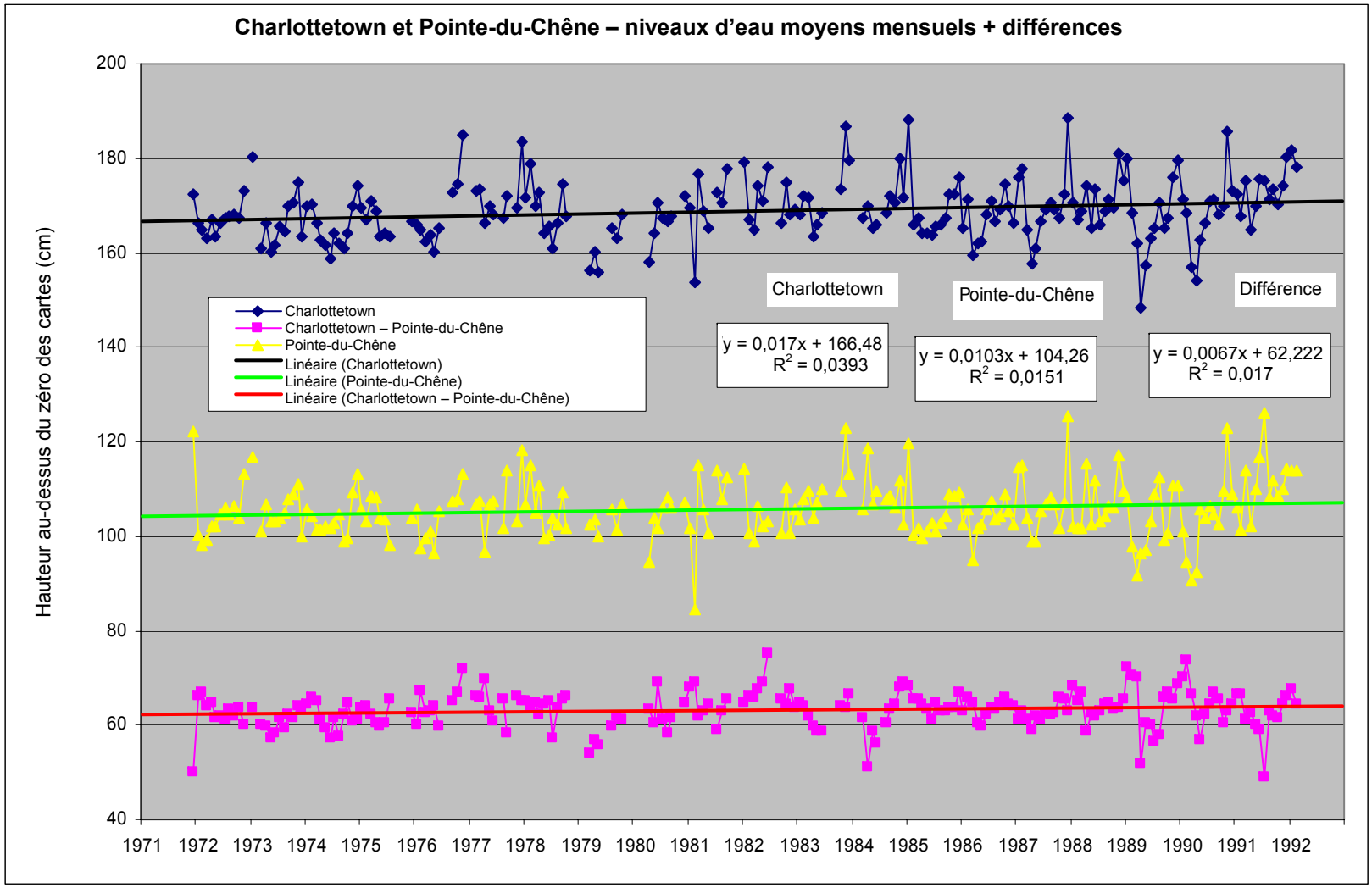


Figure 41. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown et à Pointe-du-Chêne (1972-1992) et leurs différences.

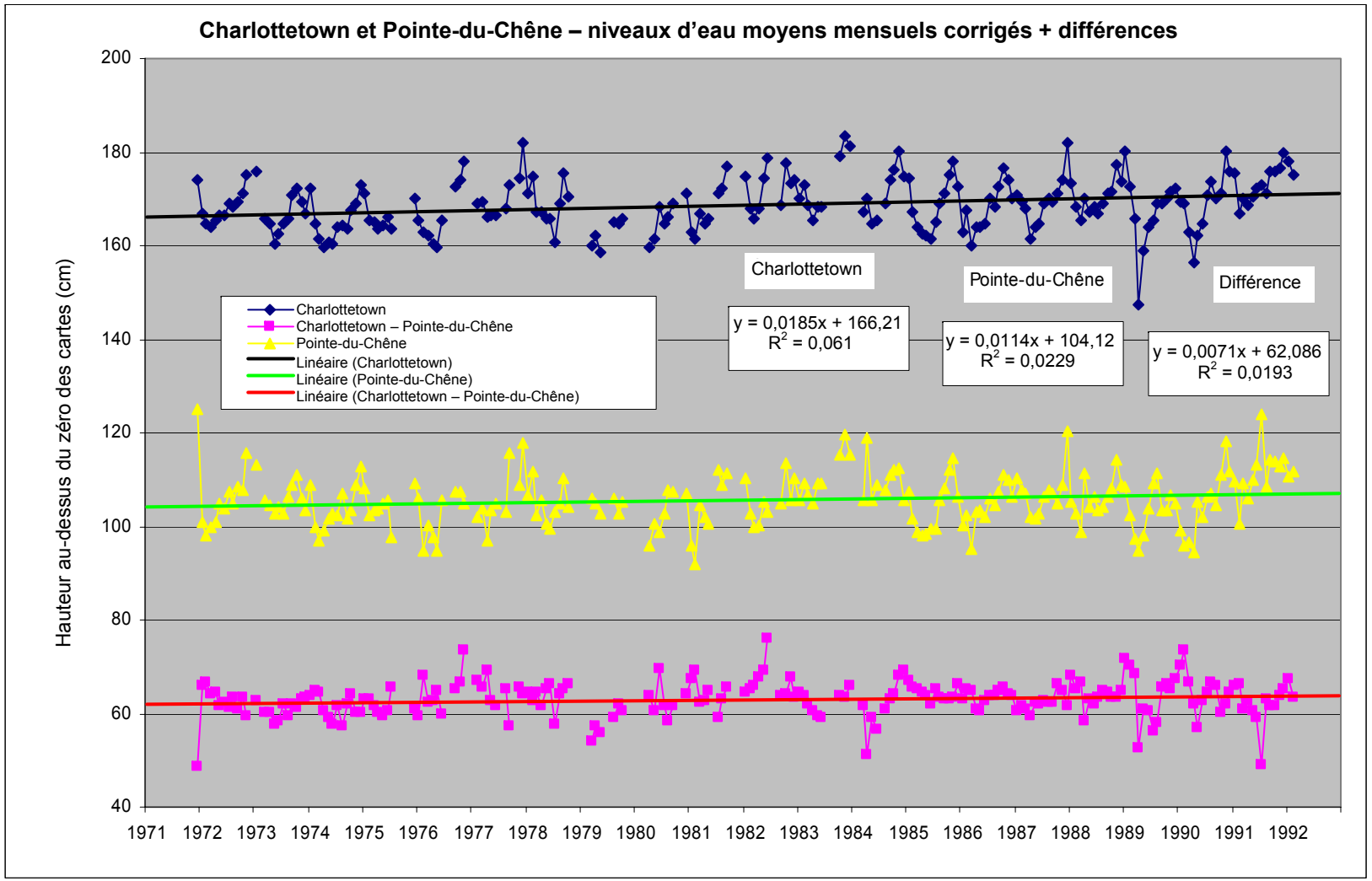


Figure 42. Moyennes mensuelles corrigées du niveau de la mer à Charlottetown et à Pointe-du-Chêne (1972-1992) et leurs différences.

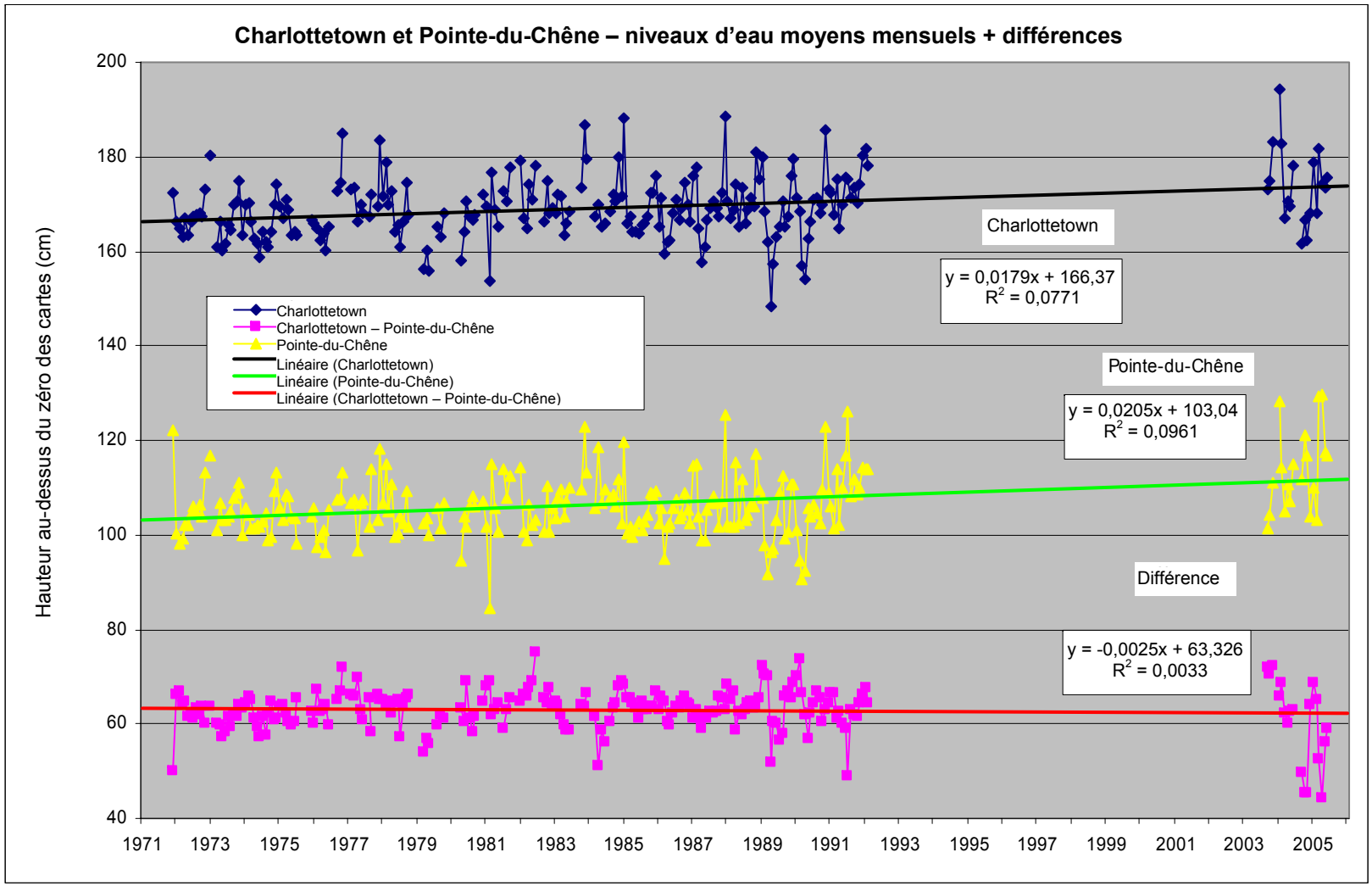


Figure 43. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Charlottetown et à Pointe-du-Chêne (1972-2005) et leurs différences.

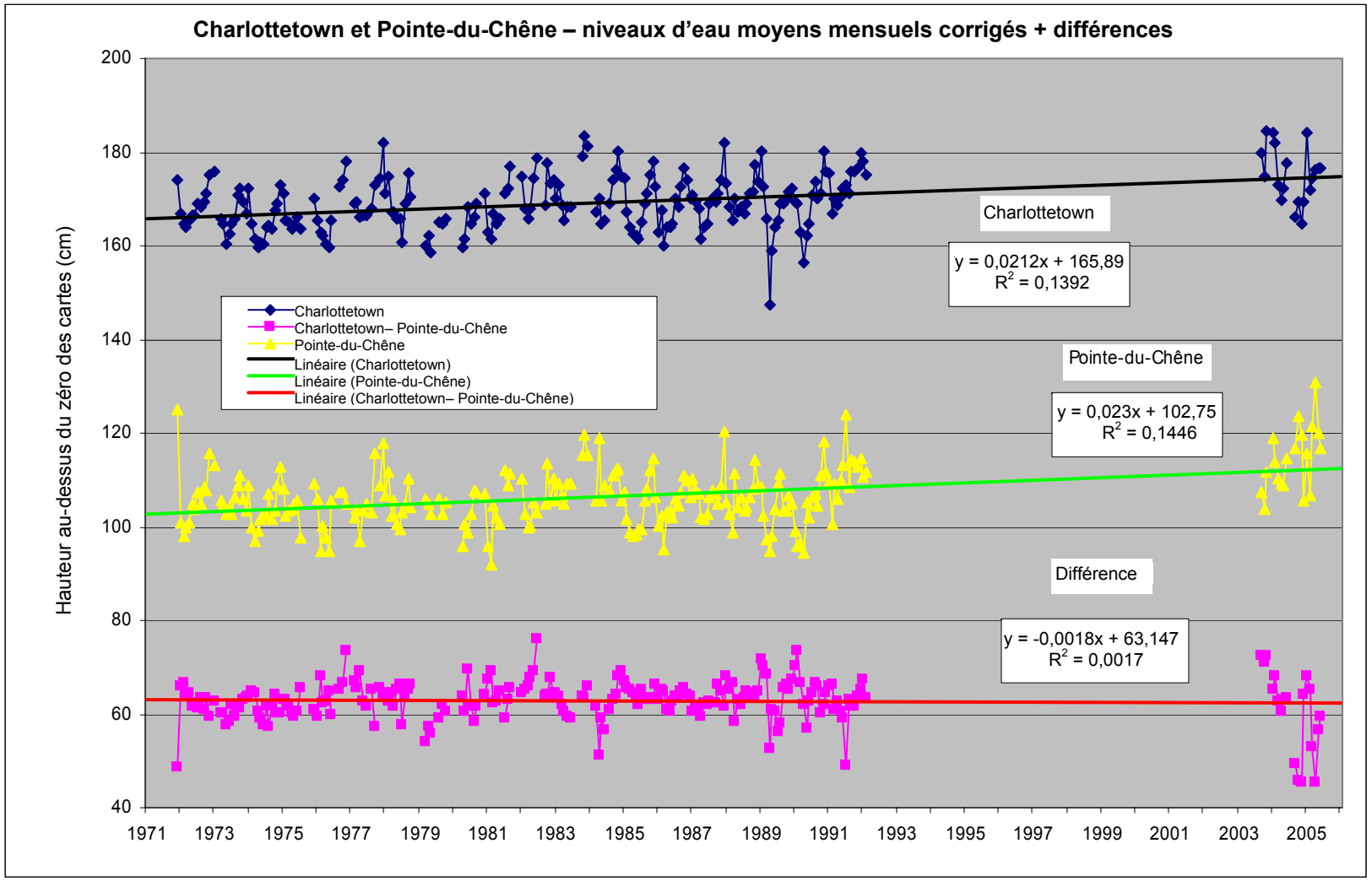


Figure 44. Moyennes mensuelles corrigées du niveau de la mer à Charlottetown et à Pointe-du-Chêne (1972-2005) et leurs différences.

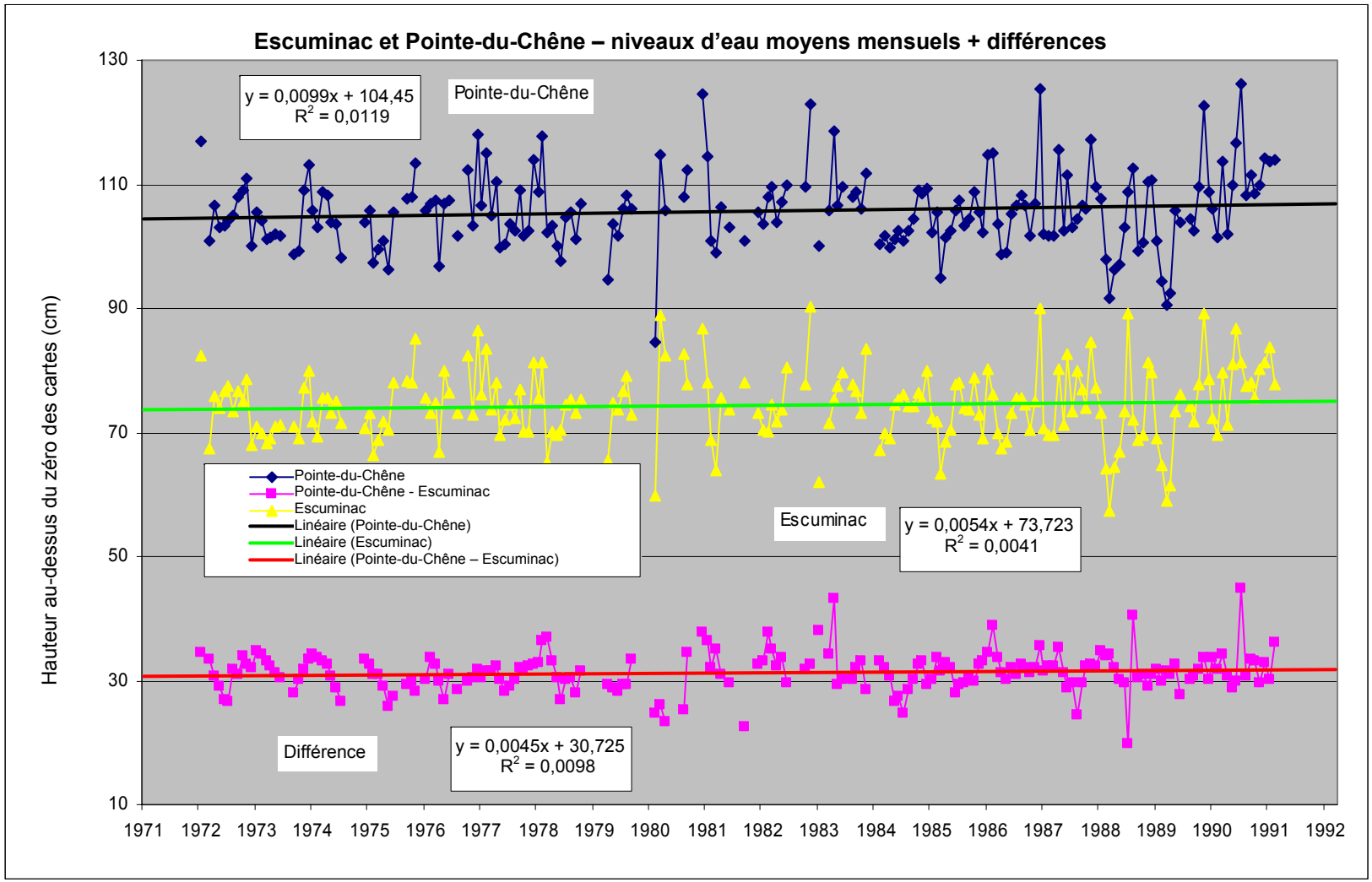


Figure 45. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne (1972-1991) et leurs différences.

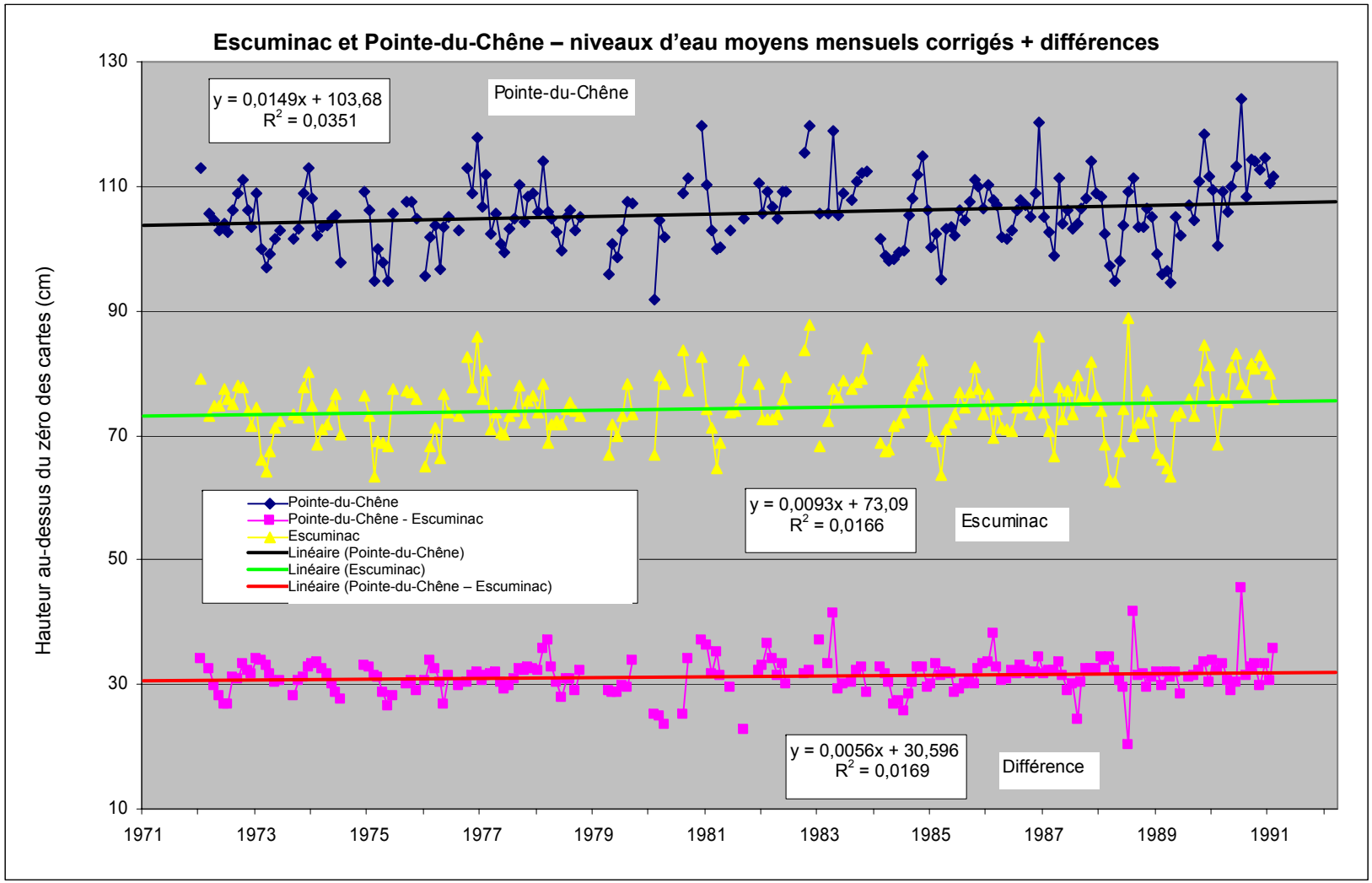


Figure 46. Moyennes mensuelles corrigées à Escuminac et à Pointe-du-Chêne (1972-1991) et leurs différences.

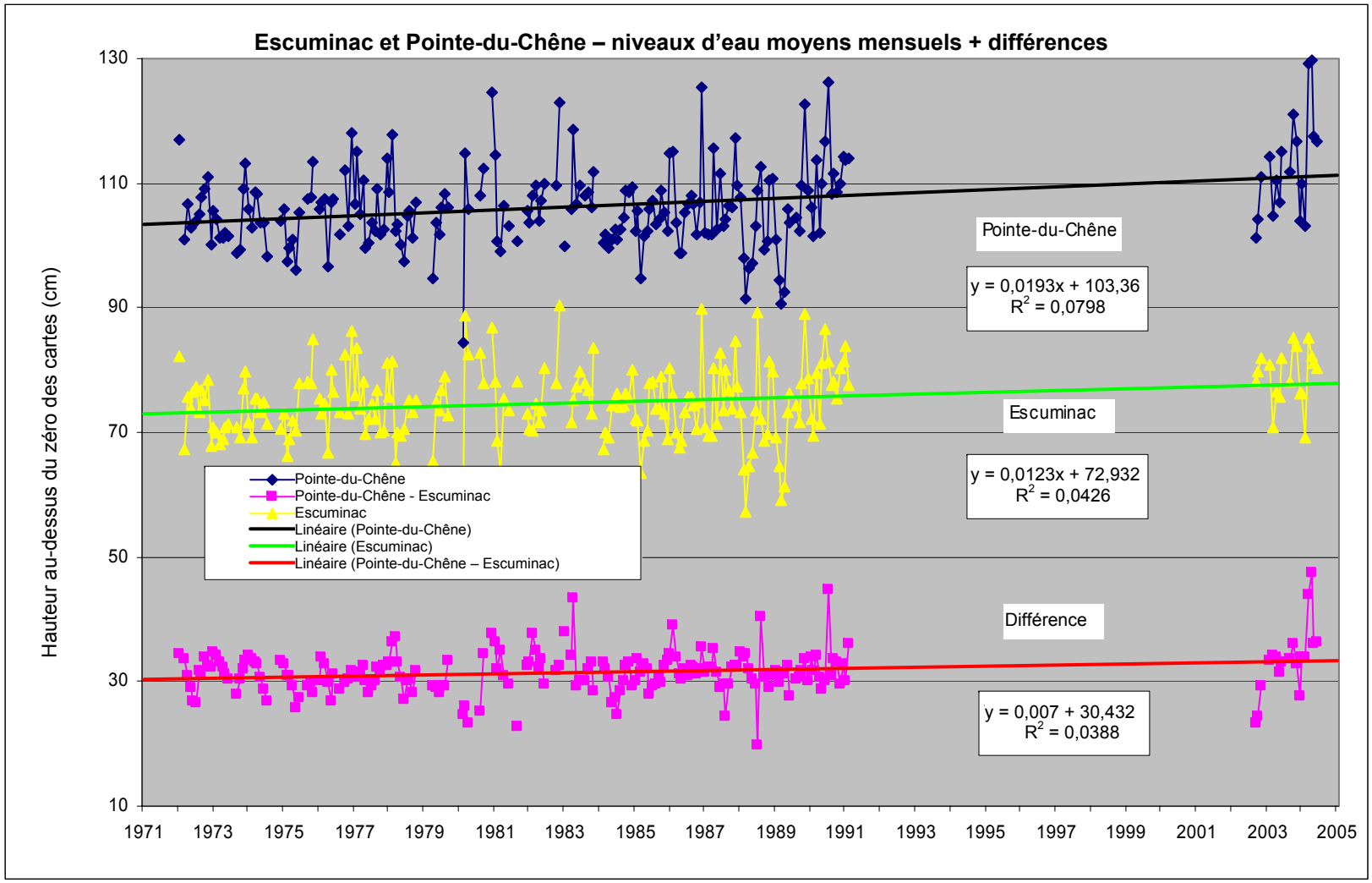


Figure 47. Moyennes mensuelles du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne (1972-2005) et leurs différences.

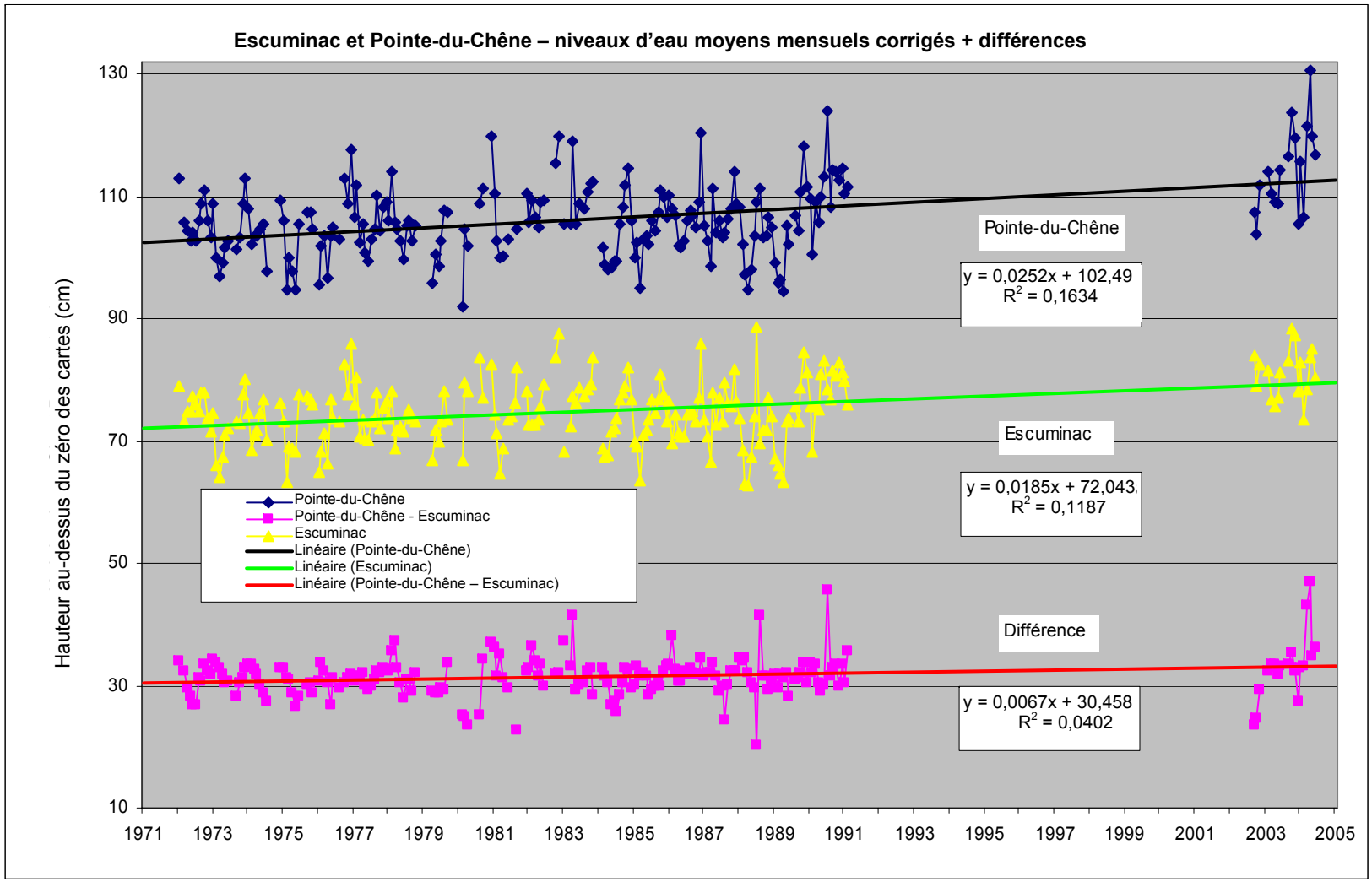


Figure 48. Moyennes mensuelles corrigées du niveau de la mer à Escuminac et à Pointe-du-Chêne (1972-2005) et leurs différences.

4.1.5 Sommaire de l'analyse des niveaux d'eau et comparaison avec des travaux antérieurs

4.1.5.1 Tendances linéaires dégagées des enregistrements individuels des stations

Dans les sections précédentes, nous avons estimé les tendances des données sur les niveaux d'eau à Charlottetown (1911-2005), à Escuminac (1973-2005) et à Pointe-du-Chêne (1971-1992 et 2003-2005) à l'aide de diverses méthodes.

Pour dresser le tableau 1, nous avons calculé les tendances de l'élévation relative du niveau de la mer pour Charlottetown et Escuminac par régression linéaire des niveaux annuels moyens (A), des niveaux annuels moyens corrigés pour tenir compte des données manquantes (B) et des niveaux annuels moyens corrigés de nouveau pour tenir compte des variations annuelles de la pression atmosphérique (C), comme nous l'avons décrit plus haut. L'élévation relative du niveau de la mer a aussi été calculée à partir des niveaux d'eau mensuels moyens (D) et des moyennes mensuelles normalisées en fonction de la variation intermensuelle de la pression atmosphérique (E). Les résultats pour Charlottetown et Escuminac sont résumés au tableau ci-dessous (tendances en cm/siècle).

Tableau 1. Tendances de l'élévation relative du niveau de la mer (cm/siècle) à Charlottetown (Île-du-Prince-Éouard) et à Escuminac (Nouveau-Brunswick) calculées à partir des données non corrigées et corrigées, tel que décrit plus haut. Dans les colonnes B et C, les valeurs pour Charlottetown sont corrigées et les valeurs aberrantes (1923 et 1929) éliminées.

site	A^{annuel}	B^{annuel}	C^{annuel}	$D^{mensuel}$	$E^{mensuel}$
Charlottetown (1911-2005)	32,5[1]	31,5[2]	31,9[3]	31,4[4]	31,8[5]
Escuminac (1973-2005)	20,1[6]	20,2[7]	23,8[8]	19,9[9]	23,2[10]

Sources : [1]Figure 3, [2]Figure 10, [3]Figure 24, [4]Figure 4, [5]Figure 23,
[6]Figure 11, [7]Figure 16, [8]Figure 31, [9]Figure 18, [10]Figure 29.
Note : les tendances de régression mensuelles sont multipliées par 1200 pour donner des cm/siècle.

Avec 95 ans, l'enregistrement de données du niveau de l'eau à Charlottetown est un des plus longs du Canada atlantique. Sur cette période, le signal de l'élévation du niveau de la mer est si fort que la prise en compte de la variance liée aux données manquantes et à la pression atmosphérique a peu d'incidence sur la tendance (31-32 cm/siècle). Le graphique des niveaux d'eau mensuels moyens normalisés en fonction des variations intermensuelles de la pression atmosphérique fournit la meilleure série chronologique disponible pour cette importante station et montre une tendance à long terme de l'élévation relative du niveau de la mer à Charlottetown de 32 cm/siècle (figure 23).

Les 33 ans de données du niveau de l'eau à Escuminac donnent des résultats similaires, bien que moins constants, dans cette analyse des moyennes, et indiquent des tendances de 20-24 cm/siècle. Une normalisation en fonction de la variabilité interannuelle et intermensuelle de la pression atmosphérique donne des valeurs maximales d'environ 24 cm/siècle (annuelles) et d'environ 23 cm/siècle (mensuelles).

Au tableau 2, nous analysons les données de Pointe-du-Chêne sur deux longueurs d'enregistrement. L'ensemble de données original comportant 22 années d'enregistrement (1971-1992) est analysé en premier. Ce premier enregistrement est ensuite combiné avec les données plus récentes, pour 2003-2005, sous l'appellation Pointe-du-Chêne (71-05).

Tableau 2. Tendances de l'élévation relative du niveau de la mer (cm/siècle) à Pointe-du-Chêne (Nouveau-Brunswick) pour deux longueurs d'enregistrement, 1971-1992 et 1971-2005 (sans données pour les années 1993-2002), calculées à partir de données corrigées et non corrigées, tel que décrit plus haut.

site	A^{annuel}	B^{annuel}	C^{annuel}	$D^{mensuel}$	$E^{mensuel}$
Pointe-du-Chêne (1971-1992)	11,0[1]	9,32	12,45	11,04	13,3
Pointe-du-Chêne (1971-2005)	28,5[2]	29,2[3]	33,3[4]	23,5[5]	27,1[6]

Sources : [1]Figure 12, [2]Figure 13, [3]Figure 17, [4]Figure 32, [5]Figure 19,[6]Figure 30.
Note : les tendances de régression mensuelles sont multipliées par 1200 pour donner des cm/siècle.

La tendance estimative à Pointe-du-Chêne change spectaculairement quand on prend en compte les nouvelles données de 2003-2005. De plus, dans les estimations pour la totalité de l'enregistrement, il existe une importante différence entre les tendances estimées à partir des données annuelles et celles estimées à partir des moyennes mensuelles. Cet état de choses est peut-être dû aux données manquantes et à la brièveté de l'enregistrement 2003-2005. Comme le nouveau marégraphe a été installé à l'automne 2003, 70 % des données de cette année sont manquantes, ce qui ne laisse que deux points de données annuels (2004 et 2005) pour la série chronologique annuelle 1971-2005. Pour la même longueur totale d'enregistrement, l'analyse des moyennes mensuelles normalisées en fonction de la variation de la pression atmosphérique indique une tendance d'environ 27 cm/siècle (tableau 2 et figure 30).

4.1.5.2 Tendances linéaires dégagées de la propagation des différences

Comme on l'a mentionné plus haut, Carrera *et al.* (1991a) et d'autres ont rappelé que de grandes erreurs d'échantillonnage peuvent entacher les estimations des tendances linéaires issues d'ensembles courts de données (moins de 40 ans). Le biais de l'échantillonnage peut résulter d'effets atmosphériques et océaniques basse fréquence, ce qui cause une variation lente des tendances du niveau relatif de la mer aux échelles pluriannuelles à décennales. Le cas est manifeste dans l'enregistrement de Charlottetown, comme le montre la série chronologique à filtrage passe-bas des figures 23 et 25. Les niveaux d'eau issus des enregistrements courts peuvent constituer une base pour des estimations plus fiables des tendances linéaires lorsqu'on utilise des méthodes de propagation des différences (p. ex. Carrera *et al.*, 1991a; Mainville et Craymer, 2005).

Comme dans la section 4.1.4, nous avons adopté cette approche et propagé la tendance à long terme du niveau de la mer à Charlottetown aux deux stations du Nouveau-Brunswick (Escuminac et Pointe-du-Chêne) en analysant les différences des tendances linéaires sur les périodes de chevauchement des enregistrements et les tendances des différences de niveau de l'eau. On obtient ainsi des estimations de l'élévation relative du niveau de la mer pour Escuminac et Pointe-du-Chêne sans l'intermédiaire des

enregistrements plus courts dus à la variabilité à plus long terme des niveaux dans le sud du golfe du Saint-Laurent. Dans la présentation qui suit, nous avons pris une valeur moyenne de 32 cm/siècle comme tendance de référence à Charlottetown.

4.1.5.2.1 Élévation relative à long terme du niveau de la mer à Escuminac

Nous présentons au tableau 3 les résultats pour les niveaux d'eau annuels moyens (F), les niveaux d'eau annuels moyens corrigés en fonction de la variation annuelle de la pression atmosphérique (G), les niveaux d'eau mensuels moyens (H) et les niveaux d'eau mensuels moyens corrigés en fonction de la variation de la pression atmosphérique (I).

Tableau 3. Estimations révisées des tendances linéaires de l'élévation relative du niveau de la mer (cm/siècle) à Escuminac, obtenues par propagation des différences à partir de Charlottetown pour les années et mois de l'enregistrement commun.

site	F^{annuel}	G^{annuel}	$H^{mensuel}$	$I^{mensuel}$
Escuminac	23,8[1]	23,6[2]	24,2[3]	22,4[4]

Sources : [1]Figure 33, [2]Figure 34, [3]Figure 39, [4]Figure 40.
Note : les tendances de régression mensuelles sont multipliées par 1200 pour donner des cm/siècle.

Sur les 33 années de l'enregistrement des niveaux d'eau à Escuminac, lorsque la tendance *annuelle* était de 20,1 cm/siècle (tableau 1), la valeur équivalente à Charlottetown était de 28,3 cm/siècle (figure 34), soit une différence de 8,2 cm/siècle entre les deux sites. Une fois corrigées pour tenir compte des données manquantes et de la pression atmosphérique, les tendances équivalentes à Escuminac et à Charlottetown étaient de 23,8 et de 32,2 cm/siècle, respectivement, soit une différence de 8,6 cm/siècle et une tendance à long terme corrigée à Escuminac de 23,6 cm/siècle.

Nous avons vu plus haut que l'analyse équivalente de la différence des niveaux d'eau *mensuels* moyens (figure 40) donnait une tendance de 24,0 cm/siècle à Escuminac (pour les moyennes mensuelles corrigées) et, pour les mêmes mois de l'enregistrement, une tendance à Charlottetown de 33,5 cm/siècle (soit une différence de 9,5 cm/siècle). Un autre calcul de la tendance linéaire des différences entre les moyennes mensuelles donne une tendance de 9,6 cm/siècle. En utilisant ce chiffre comme valeur préférentielle, nous obtenons une tendance corrigée de 22,4 cm/siècle à Escuminac sur le plus long terme (tableau 3). Les résultats de cette analyse des données corrigées du niveau de l'eau sont cohérents, ce qui indique que l'élévation relative à long terme du niveau de la mer dans la région d'Escuminac, telle qu'estimée à partir des données marégraphiques, se situe entre 22 et 24 cm/siècle. Ce résultat conforte la tendance déterminée indépendamment à partir des seules données d'Escuminac (tableau 1). C'est pourquoi, dans l'analyse qui suit, nous adoptons une valeur de 23 cm/siècle pour la tendance à long terme récente à Escuminac.

4.1.5.2.2 Élévation relative à long terme du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne

Les résultats obtenus par propagation des différences à Pointe-du-Chêne sont moins concluants (tableau 4). Le début de l'enregistrement (1971-1992) montre maintenant des taux d'élévation du niveau de la mer (23-28 cm/siècle) beaucoup plus forts que l'analyse directe des tendances (tableau 2 A-E). Ces valeurs se rapprochent, tout en leur restant

inférieures, des résultats originaux (27-33 cm/siècle) pour l'enregistrement plus long (1971-2005) au tableau 2 (A-E). Cependant, la propagation des différences à partir de Charlottetown pour l'enregistrement long (1971-2005) donne des résultats trop élevés pour être réalistes (34-44 cm/siècle). Ces résultats dépendent beaucoup de l'exactitude des données récentes, tant à Pointe-du-Chêne qu'à Charlottetown. De plus, s'il y avait un problème de calage du marégraphe à Pointe-du-Chêne (soit l'actuel, soit le précédent), les résultats faisant intervenir l'ensemble combiné de données seraient sujets à caution. Enfin, nous constatons que la moyenne annuelle à Charlottetown pour 2004, qui couvre plus de 40 % de l'horizon temporel des données récentes (50 % pour les données annuelles), est anormalement basse comparativement aux autres années récentes. Par contraste, à Escuminac, les niveaux d'eau de 2004 ne sont pas anormalement bas. C'est pourquoi nous rejetons les tendances de Pointe-du-Chêne calculées à partir de l'enregistrement 1971-2005 par propagation à partir de Charlottetown.

Tableau 4. Estimations révisées des tendances linéaires de l'élévation relative du niveau de la mer (cm/siècle) à Pointe-du-Chêne, obtenues par propagation des différences à partir de Charlottetown pour les années et mois de l'enregistrement commun.

site	F^{annuel}	G^{annuel}	$H^{mensuel}$	$I^{mensuel}$
Pointe-du-Chêne (1971-1992)	27,8[1]	27,8[2]	24,0[3]	23,5[4]
Pointe-du-Chêne (1971-2005)	43,4	43,7	35,0[5]	34,2[6]

Sources : [1]Figure 35, [2]Figure 36, [3]Figure 41, [4]Figure 42,
[5]Figure 43, [6]Figure 44.
Note : les tendances de régression mensuelles sont multipliées par 1200 pour donner des cm/siècle.

Finalement, nous propageons les différences entre Escuminac et Pointe-du-Chêne à partir de la tendance à plus long terme estimée pour Escuminac (23 cm/siècle) à titre d'approche indépendante pour estimer l'élévation du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne. Les résultats sont présentés ci-dessous (tableau 5) pour les niveaux d'eau mensuels moyens (J) et les niveaux mensuels moyens corrigés en fonction de la variation de la pression atmosphérique (K).

Table 5. Estimations révisées des tendances linéaires de l'élévation relative du niveau de la mer (cm/siècle) à Pointe-du-Chêne, obtenues par propagation des différences à partir de Charlottetown pour les années et mois de l'enregistrement commun.

site	$J^{mensuel}$	$K^{mensuel}$
Pointe-du-Chêne (1972-1992)	28,4[1]	29,7[2]
Pointe-du-Chêne (1972-2005)	31,4[3]	31,0[4]

Sources : [1]Figure 45, [2]Figure 46, [3]Figure 47, [4]Figure 48. Note : les tendances de régression mensuelles sont multipliées par 1200 pour donner des cm/siècle.

Nous constatons que la propagation des différences pour la totalité de l'ensemble de données de Pointe-du-Chêne, y compris les données de 2003-2005 (71-05), conduit à des résultats assez variables et peu concluants, qui semblent généralement trop élevés (surtout les moyennes annuelles). En utilisant seulement le premier ensemble de données (1971-1992), on obtient des résultats plus cohérents, une fois les différences propagées par rapport aux tendances à long terme de Charlottetown et à Escuminac. Si nous éliminons également les résultats obtenus en propageant les différences récentes

des moyennes mensuelles par rapport à la tendance à long terme de Charlottetown (où l'influence de 2004 pourrait ne pas être souhaitable), il nous reste les résultats sommaires suivants (tableau 6) :

Tableau 6. Sommaire des estimations conservées pour la tendance récente de l'élévation relative du niveau de la mer (cm/siècle) à Pointe-du-Chêne (à partir des tableaux 2, 4 et 5 ci-dessus).

site	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
P-d-C (1971-1992)						28	28	24	24	28	30
P-d-C (1971-2005)	29	29	33	24	27					31	31

Nous concluons donc que la tendance à long terme de l'élévation relative du niveau de la mer dans la région de Pointe-du-Chêne, calculée à partir des seules données marégraphiques, est quelque peu entachée d'incertitude, mais se situe probablement dans la plage de 25 à 30 cm/siècle (tableau 6). Nous sommes conscients qu'il y a ici une grande marge d'erreur due à la brièveté de l'enregistrement et à la forte réponse des niveaux d'eau de cette région au forçage atmosphérique. Il est tout indiqué de recueillir d'autres données sur les niveaux d'eau à ce site dans les années à venir pour clarifier les résultats et appuyer la co-implantation avec une station GPS continue (voir plus loin).

Dans leur analyse des données d'Escuminac pour 1973-1988, Carrera *et al.* (1991a) estiment une tendance linéaire de 3 cm/siècle à partir de valeurs ponctuelles, mais une tendance corrigée de 21 cm/siècle par propagation de l'élévation moyenne du niveau de la mer à Halifax (35 cm/siècle) à la tendance linéaire des différences des données d'Escuminac et de Charlottetown. Ce résultat impressionnant est semblable à celui que nous avons obtenu ici par analyse de deux fois plus de données. Pour Pointe-du-Chêne, présumément en utilisant les données de 1972-1988 (la plus grande partie de l'enregistrement dont nous disposons), Carrera *et al.* (1991a) calculent une tendance linéaire de 12,6 cm/siècle (cf. figure 13 et tableau 2A) à partir de valeurs ponctuelles seulement, mais portent la valeur à 30 cm/siècle en propageant le taux d'élévation moyenne du niveau de la mer de Halifax à la tendance linéaire des différences dans les données de Pointe-du-Chêne et de Charlottetown. Nos estimations se situent bien sur la carte de l'élévation relative du niveau de la mer dressée par Carrera *et al* (figure 49).

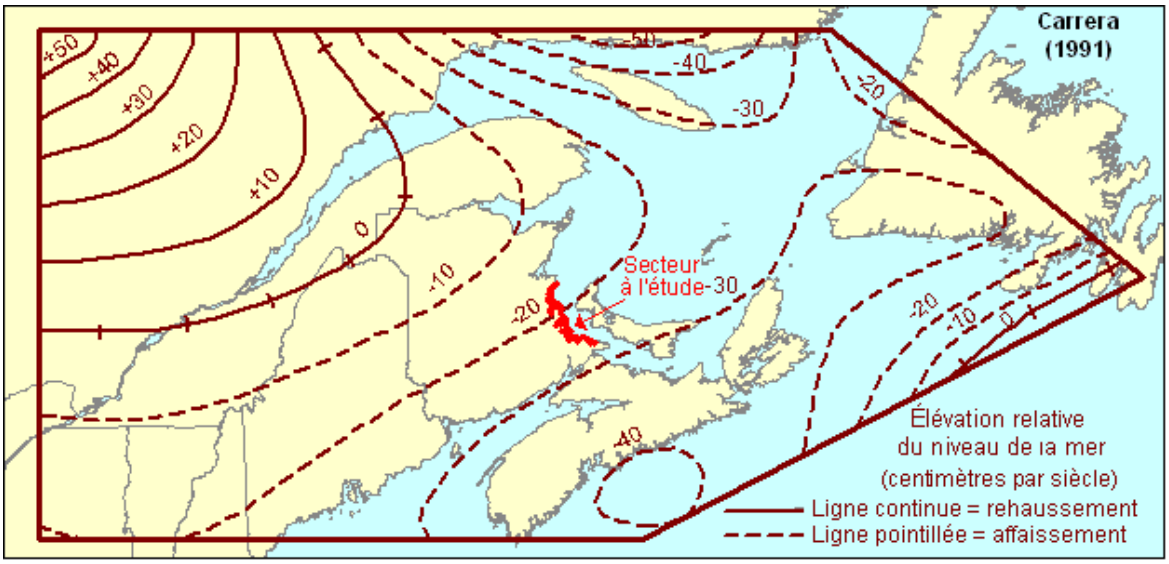


Figure 49. Carte de l'élévation relative du niveau de la mer dans la région des Maritimes (d'après Carrera *et al.*, 1991a).

4.1.6 Composantes de l'élévation du niveau de la mer dans le sud-est du Nouveau-Brunswick

L'élévation observée du niveau de la mer à un endroit donné, que l'on a décrite plus haut, est le changement apparent du niveau de la mer par rapport à des points fixes sur les terres (élévation relative du niveau de la mer). Ce n'est pas la mesure directe d'une élévation du niveau de la mer, mais une combinaison de changements du niveau de la mer et du mouvement vertical de la surface des terres. Aux grandes échelles de temps, ce dernier facteur peut jouer un rôle très significatif, comme le montrent l'historique à long terme du niveau de la mer et la paléogéographie résultante pour la région (Shaw *et al.*, 2002).

Le niveau planétaire moyen de la mer (ou surface équipotentielle) est une fonction de la masse totale de l'océan (Chambers *et al.*, 2000), de la bathymétrie des bassins océaniques, des variations de densité de l'eau de mer, des variations géographiques du champ gravitationnel de la Terre et de la rétroaction liée à des perturbations de la vitesse de rotation de la Terre causées par des changements de la répartition de la charge des glaciers et des océans sur la planète (Wu et Peltier, 1984). Les effets gravitationnels du Soleil et de la Lune donnent naissance à des marées périodiques allant d'environ 12 heures au cycle de 18,6 ans, mais n'ont pas d'incidence significative sur le niveau moyen de la mer. D'autres effets gravitationnels peuvent agir de façon significative sur le niveau de la mer à l'échelle régionale.

Woodward (1888) a démontré que l'autogravitation de la charge de surface due à l'ajout d'eau de fonte glaciaire dans l'océan induirait un changement irrégulier du niveau de la mer, celui-ci baissant sur une grande superficie à proximité de la source de la fonte (Farrell et Clark, 1976). L'attraction gravitationnelle de grandes masses de glace telles que les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique est suffisante pour faire

monter le niveau de la mer dans leur voisinage. Mitrovica *et al.* (2001) ont fait la preuve de la grande variation géographique et des régimes contrastants du changement du niveau de la mer dû à la fonte des calottes du Groenland et de l'Antarctique, ainsi qu'à celle des glaciers alpins et des inlandsis. Si l'on définit le changement eustatique du niveau de la mer comme le changement du niveau planétaire moyen de la mer imputable à un changement du volume total de l'océan (changement net de la masse de glace glaciaire divisé par la densité moyenne de l'eau de mer dans un volume de mélange adéquatement défini), le changement du niveau de la mer régional au Canada atlantique serait attribuable pour moins de 20 % à la contribution eustatique globale de la fonte de la glace du Groenland, pour environ 110 % à celle de l'Antarctique, et pour environ 90 % à celle de glaciers alpins. Mitrovica *et al.* (2001) citent ces régimes comme explication au moins partielle des taux historiques anormalement bas de l'élévation relative du niveau de la mer dans le nord-ouest de l'Europe, soit environ 0,11 m au cours du dernier siècle (Lambeck *et al.*, 1998; Woodworth *et al.*, 1999), comparativement aux estimations de 0,15 à 0,19 m pour la même période sur la côte est de l'Amérique du Nord (Gornitz, 1995; Mitrovica et Davis, 1995; Peltier, 1996). Cependant, on peut aussi attribuer les différences géographiques du changement relatif du niveau de la mer à des différences de l'expansion thermique et de la circulation de l'océan (Church *et al.*, 2004).

Il a été estimé que l'expansion thermique des dernières décennies se situait dans la plage de 0,7 à 1,1 mm/an (7-11 cm/siècle), selon les modèles de circulation générale couplés atmosphère-océan, et à environ 1 mm/an (10 cm/siècle), selon les observations; les changements de la masse d'eau totale dus à la variation du bilan massique des glaciers seraient quant à eux attribuables pour –0,2 à 0,0 mm/an à la fonte dans l'Antarctique et pour 0,0 à 0,1 mm/an à la fonte au Groenland (Church *et al.*, 2001). Bien que les incidences régionales des contributions de l'eau de fonte glaciaire puissent être représentées correctement dans les modèles récents (Milne *et al.*, 1999; Mitrovica *et al.*, 2001), la distribution géographique de l'expansion thermique est moins bien comprise. Les scientifiques estiment aussi que l'ajustement à long terme à des changements climatiques passés des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique pourrait avoir contribué pour 0,0 à 0,5 mm/an à l'élévation du niveau de la mer planétaire au cours du dernier siècle (Church *et al.*, 2001).

La composante du changement relatif du niveau de la mer attribuable à des mouvements verticaux de la croûte terrestre peut varier significativement sur des distances relativement courtes, dont l'échelle dépend de la viscosité du manteau et de sa réponse élastique aux changements de la charge en surface. Des mouvements tectoniques tant rapides qu'à long terme peuvent aussi intervenir. Dans l'est du Nouveau-Brunswick, la composante dominante du mouvement vertical est la réponse isostatique postglaciaire à la disparition de la charge de glace sur la région, il y a environ 12 000 ans, et à son remplacement subséquent par l'eau qui a remonté graduellement dans le sud du golfe du Saint-Laurent depuis environ 9000 ans (Shaw *et al.*, 2002). Le relèvement isostatique peut être complexe dans le temps, puisqu'il est en partie lié à une hypothétique migration d'un bourrelet marginal dans la région à mesure que l'inlandsis Laurentidien reculait vers des centres situés sur le Labrador et la baie d'Hudson (Walcott, 1972; Gehrels *et al.*, 2004).

4.1.6.1 Mouvement vertical dans l'est du Nouveau-Brunswick

Nous suivons trois séries d'indications pour estimer le mouvement vertical dans l'est du Nouveau-Brunswick. Les estimations de l'élévation planétaire du niveau de la mer sur les 135 dernières années est de l'ordre de 1,7 ± 0,3 mm/an (17 ± 3 cm/siècle), avec une accélération de 0,013 ± 0,006 mm/an^2 (Church et White, 2006). Bien que ces vitesses varient significativement dans l'espace (Church *et al.*, 2004), si nous présumons qu'elles s'appliquent régionalement dans le sud du golfe du Saint-Laurent, les soustraire des enregistrements observationnels du niveau de l'eau donne une estimation du mouvement vertical. Le taux de subsidence ainsi calculé est de 15 ± 3 cm/siècle pour Charlottetown, et de 6 ± 3 cm/siècle pour Escuminac.

D'autres indications sont fournies par le nivellement géodésique (Vaníček et Nagy, 1980) et les mesures de la gravité (Forbes *et al.*, 2001). Ces dernières sont entachées d'une forte incertitude, étant donné la relativement courte durée des observations, et ne peuvent pas encore fournir une estimation fiable de la subsidence pour Charlottetown (A. Mainville, Division des levés géodésique, comm. pers., 2000). Les estimations du mouvement vertical de la croûte effectuées par Vaníček et Nagy (1980) et par Koohzare *et al.* (2005) font appel à une combinaison d'analyse des marées et de données de nivellement géodésique. Comme les données de nivellement le long de la voie ferrée Halifax-Québec montrent un maximum de subsidence aux alentours de l'isthme reliant la Nouvelle-Écosse au Nouveau-Brunswick (Grant, 1970), il est raisonnable de penser que la subsidence soit plus élevée dans la région de Moncton-Shediac que plus au nord sur la côte est du Nouveau-Brunswick. La reconstruction du mouvement vertical récemment effectuée par Koohzare *et al.* (2005) montre que le taux de subsidence passe de 15 cm/siècle à Charlottetown à environ 8 cm/siècle à Shediac/ Pointe-du-Chêne à 0 cm/siècle dans les alentours de Cap-Lumière (figure 50). Cette interprétation suggère un taux de soulèvement d'environ 10 cm/siècle à Escuminac, ce qui ne concorde pas avec l'analyse du niveau de l'eau présentée plus haut. Bien que le mouvement général d'inclinaison de la zone à l'étude soit conforté par nos données, nous pensons qu'il est moins extrême que ne le montre la figure 50 et qu'il demeure un petit élément de subsidence à Escuminac. Par ailleurs, le taux de subsidence indiqué pour Charlottetown est la valeur (15 cm/siècle) obtenue par soustraction de l'élévation estimative du niveau de la mer. À noter qu'il est inférieur de 5 cm/siècle à la valeur utilisée dans la première étude des impacts sur l'Île-du-Prince-Édouard (McCulloch *et al.*, 2002; Parkes *et al.*, 2002).

Pour Pointe-du-Chêne, si nous additionnons le mouvement vertical de 8 cm/siècle (figure 50) et l'élévation du niveau de la mer de 17 cm/siècle utilisée plus haut, nous obtenons une élévation relative dans la région de Shediac de 25 cm/siècle, soit l'extrémité basse de la plage calculée à la section 4.1.5.2 (tableau 6). À la lumière de notre révision pour Escuminac et des indications d'une élévation relative du niveau de la mer légèrement plus prononcée à Pointe-du-Chêne, nous adoptons une valeur de 10 cm pour la région de Shediac. Un autre point à remarquer à la figure 50 est qu'il existe un fort gradient le long de la côte, entre Shediac (10 cm/siècle) et le cap Jourimain (15 cm/siècle), ce dernier présentant la même valeur que Charlottetown selon cette interprétation.

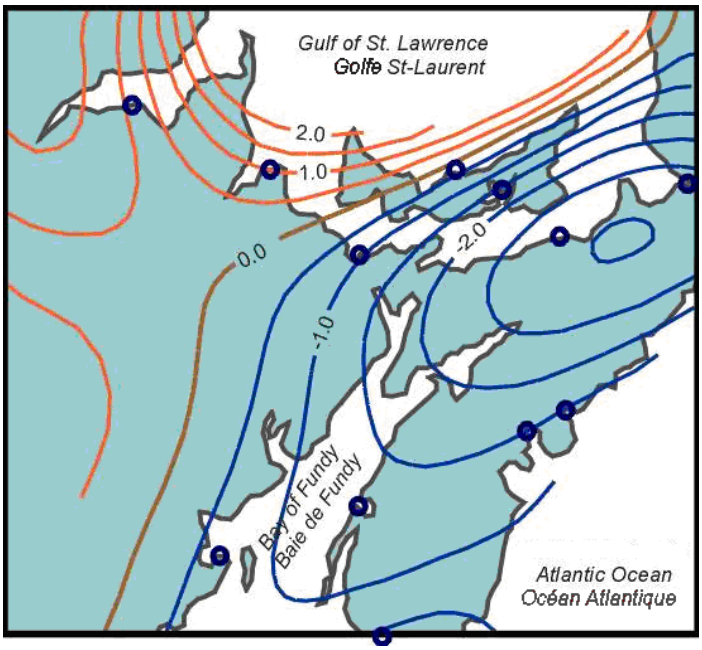


Figure 50. Mouvement vertical de la croûte terrestre dans les provinces maritimes, tirée des données marégraphiques et du nivellement géodésique en utilisant des polynômes de fonction spline cubique (d'après Koohzare *et al.*, 2005). Les cercles vides montrent l'emplacement des marégraphes utilisés pour l'analyse. Les isolignes bleues indiquent de la subsidence et les lignes orange un soulèvement (dans les deux cas en mm/an).

Enfin, nous examinons les données disponibles sur le mouvement vertical provenant de mesures directes à l'aide de récepteurs de système de positionnement global (GPS). Un certain nombre de sites de campagnes d'observation ont été établis dans la région au cours de la dernière décennie. Il s'agit de repères stables réoccupés à intervalles allant des mois aux années pour des observations par GPS, généralement d'une durée de 1 à 5 jours. Les résultats préliminaires de deux stations, une située à Bathurst et l'autre à Moncton, sont présentés aux figures 51 et 52. Les valeurs issues de ces mesures sur 10 ans, de 1994 à la fin de 2003, montrent une subsidence de 3,44 mm/an et 3,82 mm/an à Bathurst et à Moncton, respectivement, par rapport à une station de référence du parc Algonquin (Ontario). Si on prend une valeur de soulèvement de 2,9 ± 0,6 mm/an à Algonquin, selon Henton *et al.* (2004), ces mesures indiquent une subsidence d'environ 5 mm/an (5 cm/siècle) à Bathurst et d'environ 9 mm/an (9 cm/siècle) à Moncton, ce qui concorde avec les valeurs estimées plus haut.

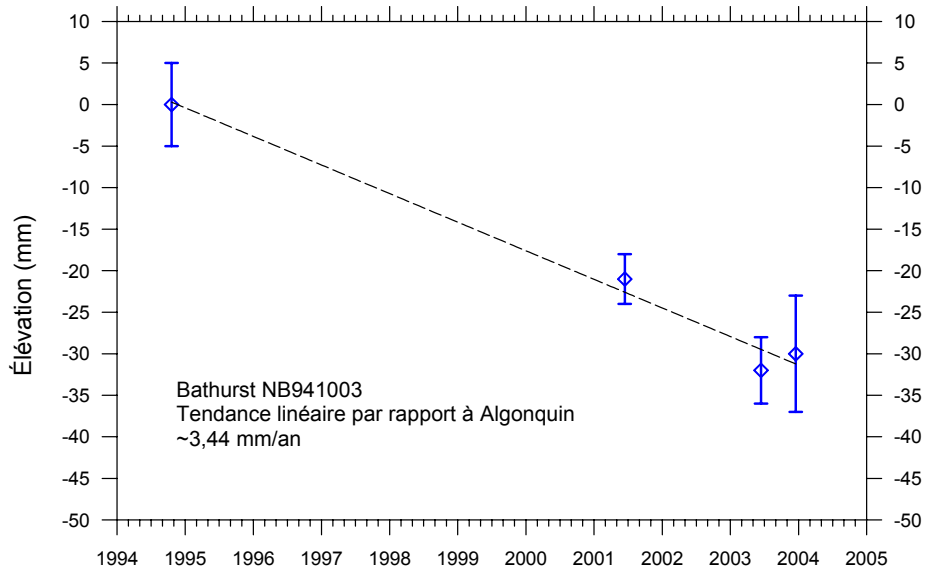


Figure 51. Mouvement vertical déterminé par des campagnes de mesure par GPS au site RBC NB941003, à Bathurst, Nouveau-Brunswick. Mouvement par rapport à Algonquin, Ontario (données aimablement fournies par M. Craymer et J. Henton, Division des levés géodésiques, Ressources naturelles Canada, Ottawa).

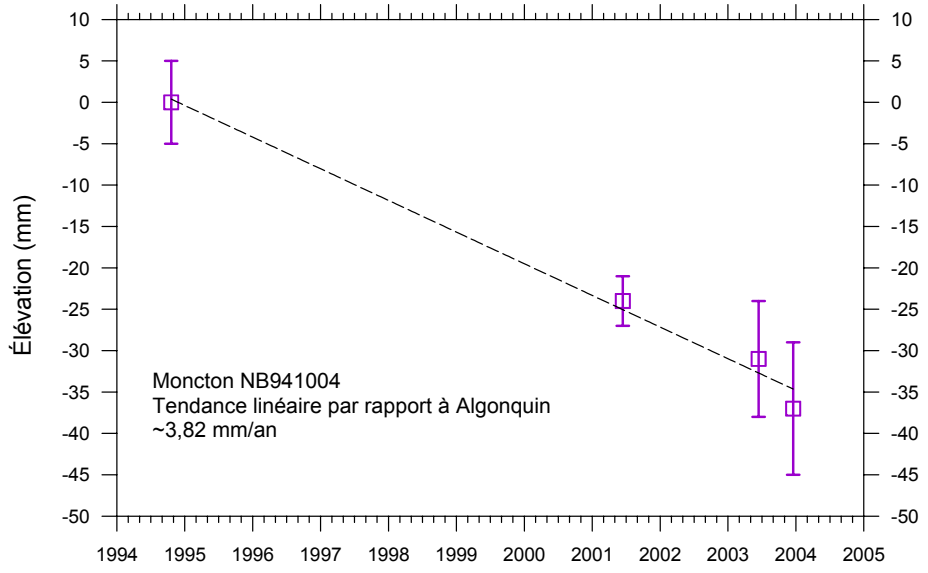


Figure 52. Mouvement vertical déterminé par des campagnes de mesure par GPS au site RBC NB941004, Moncton, Nouveau-Brunswick. Mouvement par rapport à Algonquin, Ontario (données aimablement fournies par M. Craymer et J. Henton, Division des levés géodésiques, Ressources naturelles Canada, Ottawa).

Aux fins du présent projet, des stations de surveillance GPS continue ont été implantées à proximité des marégraphes de la zone à l'étude, à Escuminac et à Shediac/Pointe-du-Chêne. Les mesures GPS continues ont été démarrées à chaque site au début de l'été (échantillonnage de 30 s, téléchargé chaque jour aux bureaux de Levés géodésiques du Canada à Ottawa, positions calculées chaque semaine). Chacune des bornes a été liée aux repères marégraphiques de référence par nivellement géodésique de premier ordre à l'été 2005. La station d'Escuminac fonctionne encore, mais la borne et l'antenne GPS installée près de la mairie à Shediac ont été endommagées à l'automne 2005, et il a été impossible de les réparer. Une nouvelle borne a été installée permettant le site de Shediac d'être réoccupé à compter de novembre 2006. Les données de ces stations, combinées aux mesures de niveau d'eau effectuées à proximité, devraient permettre, d'ici une dizaine d'années, de déterminer avec exactitude le mouvement vertical et l'élévation du niveau de la mer.

4.1.6.2 Élévation du niveau de la mer dans la zone à l'étude

L'élévation du niveau mondial des mers, un des impacts du réchauffement planétaire que l'on prédit avec le plus de confiance, s'accompagne de conséquences majeures pour les collectivités côtières du monde entier (GIEC – GT II, 2001; McLean *et al*., 2001). La plus récente analyse publiée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC – GT I, 2001; Church *et al*., 2001) prévoit que l'élévation du niveau mondial des mers, de 1990 à 2100 (soit 110 ans), se situera entre 0,09 et 0,88 m, avec une valeur médiane de 0,48 m, à la lumière des résultats des 35 scénarios d'émissions SRES décrits dans GIEC – GT I (2001). Normalisée sur 100 ans, cette valeur est plus de 2,5 fois plus élevée que le taux moyen d'élévation du niveau de la mer mondial au cours du XX^{e} siècle, tel que déduit des données marégraphiques (Church et White, 2006).

Pour le sud-est du Nouveau-Brunswick, les implications régionales de ces prévisions mondiales du GIEC sont moins claires. Les plus récentes prévisions du GIEC de l'élévation du niveau de la mer mondial, basées sur le scénario IS92a, utilisé dans son deuxième Rapport d'évaluation (GIEC – GT I, 1996), font intervenir les composantes suivantes (Church *et al*., 2001):

- expansion thermique de 0,11 à 0,43 m, s'accélérant au cours du XXI^{e} siècle;
- contribution des glaciers de 0,01 à 0,23 m;
- contribution du Groenland de –0,02 à 0,09 m;
- contribution de l'Antarctique de –0,17 à 0,02 m.

Considérant les résultats de Mitrovica *et al*. (2001), qui suggèrent que la contribution du Groenland pourrait être de moins de 20 % de son total global dans la région de l'Atlantique Nord, alors que celle de l'Antarctique pourrait augmenter légèrement, il semble raisonnable de conclure que ces composantes eustatiques sont encore mal prévues, et pourraient se compenser mutuellement (Gregory et Lowe, 2000). Il convient de remarquer que la contribution des glaciers alpins et des petits inlandsis est substantielle, et se situera probablement près de la moyenne planétaire dans l'Atlantique Nord.

La contribution de l'expansion thermique des océans, qui pourrait être la composante la plus importante de l'élévation à venir du niveau de la mer, est elle aussi difficile à évaluer sur une base régionale (Forbes *et al*., 2001). Les sorties de neuf expériences faisant

appel à divers modèles (figure 11.13 *in* Church *et al*., 2001) donnent une large plage de distribution planétaire de l'expansion thermique. L'élévation résultante du niveau de la mer sur 100 ans au Canada atlantique va de moins de 0,1 m avec un modèle à plus de 0,6 m avec un autre; la plupart des résultats sont toutefois compris entre 0,2 et 0,4 m. Nous pouvons donc conclure qu'il n'y a pas encore de consensus sur la fraction de l'expansion thermique mondiale à laquelle on peut s'attendre pour notre région.

La discussion ci-après montre que nous n'avons pas de raison valide d'opter pour des projections régionales de l'élévation à venir du niveau de la mer dans un nouveau climat qui soient significativement différentes des projections planétaires de Church *et al*. (2001). Nous faisons aussi remarquer que les modèles présentent une accélération de l'élévation du niveau de la mer, les taux étant beaucoup moins élevés au début du XX!^{e} siècle que par la suite.

4.1.6.3 Taux projetés d'élévation relative du niveau de la mer (2000-2100)

Sur la base des conclusions de la section 4.1.6.2, nous avons adopté la valeur médiane d'élévation du niveau de la mer du GIEC, soit 48 cm, qui équivaut à 44 cm sur 100 ans (2000-2100), avec une incertitude estimative de ± 30 cm. Quand nous combinons cette estimation avec celles du mouvement vertical déterminées à la section 4.6.1, nous arrivons aux projections suivantes pour les divers sites de la zone à l'étude :

Tableau 7. Projections du mouvement vertical et de l'élévation relative du niveau de la mer pour divers sites de la zone à l'étude dans le sud-est du Nouveau-Brunswick (détails dans le texte).

site	Mouvement vertical (cm – 2000-2100)	ÉRNM (cm – 2000-2100)
Cap-Jourimain	15 ± 5	59 ± 35
Shemogue	13 ± 5	57 ± 35
Cap-Pelé	12 ± 5	56 ± 35
Shediac	10 ± 5	54 ± 35
Bouctouche	9 ± 5	53 ± 35
Kouchibouguac	7 ± 5	51 ± 35
Escuminac	6 ± 5	50 ± 35

4.1.7 Sommaire et conclusions

Sur la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, le niveau de la mer monte depuis plusieurs milliers d'années; les eaux ont graduellement inondé le détroit de Northumberland et les tronçons les plus en aval des cours d'eau drainant la région à l'étude, ce qui a fait reculer le trait de côte et entraîné une croissance verticale et un mouvement vers l'intérieur des marais salés. Ces changements se poursuivent encore lentement, et deviennent visibles sur plusieurs décennies.

Le réchauffement du climat, par le biais de l'expansion thermique des océans et de la fonte de la glace sur les continents, menace de faire monter, à l'échelle planétaire, le niveau moyen des mers de quelques décimètres au cours du prochain siècle, ce qui

accélérera les taux historiques d'élévation relative du niveau de la mer au Canada atlantique.

L'élévation relative observée du niveau de la mer est due à la combinaison d'une subsidence régionale et d'une montée du niveau de la mer dans le nord-ouest de l'Atlantique. La subsidence découle de l'ajout et de la disparition du poids des glaces il y a plus de 10 000 ans, qui ont conduit à l'affaissement graduel et à la migration d'un bourrelet marginal qui se serait formé autour des bordures des inlandsis d'Amérique du Nord, et de l'ajout de charge par l'eau de mer qui a remonté sur toute la planète après les bas niveaux de l'époque glaciaire. Le niveau mondial de la mer a continué de monter, accélérant dans la seconde moitié du XX^{e} siècle jusqu'au taux actuel d'environ 17 cm par siècle. En raison d'un gradient de subsidence sur la région, l'élévation relative observée du niveau de la mer est moindre dans le nord-ouest, et plus marquée dans le sud-est du secteur à l'étude. Le long enregistrement marégraphique de Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard, qui date de plus de 95 ans, révèle une élévation relative de 32 cm sur le siècle. À l'autre extrémité de la zone à l'étude, l'élévation relative du niveau de la mer à Escuminac aurait été d'environ 23 cm sur la même période. Cette inclinaison régionale se poursuivra dans le futur. On peut donc conclure que les taux à venir d'élévation relative du niveau de la mer (autrement dit, la montée du niveau de la mer par rapport à des points fixes sur les terres) présenteront encore un gradient sur la région.

Notre analyse de la subsidence isostatique et de l'inclinaison présentée plus haut et celle de l'élévation régionale du niveau de la mer basée sur les travaux du GT I du GIEC (2001) nous conduisent à formuler les estimations suivantes de l'élévation relative du niveau de la mer pour le prochain siècle (2000-2100) sur la région à l'étude :

- Cap-Jourimain 59 ± 35 cm
- Shemogue 57 ± 35 cm
- Cap-Pelé 56 ± 35 cm
- Shediac 54 ± 35 cm
- Bouctouche 53 ± 35 cm
- Kouchibouguac 51 ± 35 cm
- Escuminac 50 ± 35 cm

Ces valeurs de l'élévation du niveau de la mer doivent être examinées dans le contexte des impacts des tempêtes et des dangers qui les accompagnent. Pendant les fortes tempêtes, les ondes de tempête causent des inondations côtières, les grosses vagues entraînent de l'érosion et des dommages aux infrastructures, et la glace de mer peut gagner les terres, avec des effets destructeurs. Comme le niveau d'eau et les vagues dus à la tempête se superposent au niveau moyen de la mer, l'élévation de ce dernier a un effet important sur le degré d'inondation et d'attaque par les vagues, assorti d'implications majeures pour les facteurs écologiques et socioéconomiques et pour les mesures d'adaptation qui doivent être prises pour réduire les pertes. Ces questions sont abordées plus loin dans le présent rapport.

4.1.8 Références

Carrera, G., P. Vaníček et M.R. Craymer. 1991a. *The compilation of a map of recent vertical crustal movements in Canada*. Département de géodésie, Université du Nouveau-Brunswick, Fredericton NB. Technical Report 153, 106 p.

Carrera, G., P. Vaníček et M.R. Craymer. 1991b. *The compilation of recent vertical crustal movements in Canada*. Ressources naturelles Canada, Ottawa. Division des levés géodésiques. Rapport de contrat 91-001, 100 p.

Chambers, D.P., J. Chen, R.S. Nerem et B.D. Tapley. 2000. Interannual mean sea level change and the Earth's water mass budget. *Geophysical Research Letters*, **27**, 3073-3076.

Church, J.A., et N.J. White. 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters*, **33**, L01602, doi: 10.1029/2005GL024826.

Church, J.A., J.M. Gregory, P. Huybrechts, M. Kuhn, K. Lambeck, M.T. Nhuan, D. Qin, P.L. Woodworth, avec la contribution de 28 auteurs contributeurs. 2001. Changes in sea level. *In* Climate change 2001: the scientific basis*.* Contribution du Groupe de travail I au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.I. Johnson, dir. de publ.). Cambridge University Press, Cambridge, R.-U., et New York, É.-U., 639-693.

Church, J.A., N.J. White, R. Coleman, K. Lambeck et J.X. Mitrovica. 2004. Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period. *Journal of Climate*, **17** (13), 2609-2625.

Dawson, W.B. 1917. *Tide levels and datum planes in eastern Canada from determinations by the Tidal and Current Survey up to the year 1917*. Publié par le ministère du Service naval, Ottawa, Canada.

Douglas, B.C., et W.R. Peltier. 2002. The puzzle of global sea-level rise. *Physics Today*, [March 2002], 35-40.

Dyke, A.S., et W.R. Peltier. 2000. Forms, response times and variability of relative sea-level curves, glaciated North America. *Geomorphology*, **32**, 315-333.

Farrell, W.E., et J.T. Clark. 1976. On postglacial sea level. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **46**, 647-667.

Forbes, D.L., D.J. Orford, R.B. Taylor et J. Shaw. 1997. Interdecadal variation in shoreline recession on the Atlantic coast of Nova Scotia. *Proceedings, Canadian Coastal Conference 1997*, Guelph. Canadian Coastal Science and Engineering Association, Ottawa, 360-374.

Forbes, D.L., K. Thompson, N. Bernier, G.S. Parkes, L.A. Ketch, A. Mainville et G.K. Manson. 2001. Preparing for climate change in coastal communities: How high will the water come? *Abstracts Volume 26*. Geological Association of Canada & Mineralogical Association of Canada, St-Jean de Terreneuve, A45 [http://gis.geosurv.gov.nf.ca/GAC_2001/seven/sub_program.asp?sess=98&form=10&abs_no=504].

Forbes, D.L., G.S. Parkes, G.K. Manson et L.A. Ketch. 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, **210**, 169-204.

Gehrels, W.R., D.F. Belknap, S. Black et R.M. Newnham. 2002. Rapid sea-level rise in the Gulf of Maine, USA, since AD 1800. *The Holocene*, **12** (4), 383-389.

Gehrels, W.R., G.A. Milne,J.R. Kirby, JR.T. Patterson et D.F. Belknap. 2004. Late Holocene sea-level changes and isostatic crustal movements in Atlantic Canada. *Quaternary International*, **120**, 79-89.

Gornitz, V. 1995. A comparison of differences between recent and late Holocene sea level trends from eastern North America and other selected regions. In *Holocene cycles: climate, sea levels and sedimentation* (Finkl, C.W., Jr., dir. de publ.). *Journal of Coastal Research*, Special Issue **17**, 287-297.

Grant, D.R. 1970. Recent crustal submergence of the Maritime Provinces, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **7**, 676-689.

Gregory, J.M. & Lowe, J.A. 2000. Predictions of global and regional sea-level rise using AOGMs with and without flux adjustment. *Geophysical Research Letters*, **27**, 3069-3072.

Henton, J.A., J.O. Liard, M.R. Craymer, T. James, C.G. Gagnon et E. Lapelle. 2004. Absolute Gravity and Global Positioning System Measurements of Glacial Isostatic Adjustment in Eastern Canada. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **85** (17), Joint Assembly Supplement, Abstract G41B-02.

GIEC – GT I. 1996. *Climate Change 1995: Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Contribution du Groupe de travail I au deuxième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg et K. Maskell, dir. de publ.). Cambridge University Press, Cambridge, R.-U., et New York, É.-U., 572 p.

GIEC – GT I. 2001. Résumé à l'intention des décideurs. *In* Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.I. Johnson, dir. de publ.). Cambridge University Press, Cambridge, R.-U., et New York, É.-U., sous presse.

GIEC – GT II. 2001. Résumé à l'intention des décideurs. *In* Bilan 2001 des changements climatiques : Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White, dir. de publ.). Cambridge University Press, Cambridge, R.-U., et New York, É.-U., sous presse.

Josenhans, H., et S. Lehman. 1999. Late glacial stratigraphy and history of the Gulf of St. Lawrence, Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences, **36**, 1327-1345.*

Kranck, K. 1972. Geomorphological development and post-Pleistocene sea level changes, Northumberland Strait, Maritime Provinces. *Canadian Journal of Earth Sciences, **9**, 835-844.*

Lambeck, K., C. Smither et M. Ekman. *1998.* Tests of glacial rebound models for Fenno-scandinavia based on instrumented sea- and lake-level records. *Geophysical Journal International, **135**, 375-387.*

Lane, P., & Associates Ltd. Environmental Consultants. 1986. *Étude préliminaire des effets éventuels d'une hausse d'un mètre du niveau de la mer à Charlottetown, dans l'Île-du-Prince-Édouard*. Contrat n^{o} 14SC.KM270-5-A122. Rédigé à contrat pour le Service de l'environnement atmosphérique, Canada. Résumé dans le *Sommaire des changements climatiques*, **88-02** (1988).

Mainville, A. et M.R. Craymer, M.R. 2005. Present-day tilting of the Great Lakes region based on water level gauges. *Geological Society of America Bulletin*, 117, 1070-1080.

Manson, G.K. 1999. *Recent and historical coastal change under rising sea level, McNab's Island area, Halifax, Nova Scotia*. Mémoire de maîtrise, Université Dalhousie, Halifax, Nouvelle-Écosse, septembre 1999, 230 p.

McCulloch, M.M., D.L. Forbes, R.W. Shaw et Équipe scientifique A041 du FACC. 2002. *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island* (Forbes, D.L., et R.W. Shaw, dir. de publ.). Commission géologique du Canada, dossier public 4261, xxxiv+62 p. et 11 documents d'appui (1 CD-ROM).

McLean, R.F., A. Tsyban, W. Burkett, J.O. Codignotto, D.L. Forbes, N. Mimura, R.J. Beamish et V. Ittekkot. 2001. Coastal zones and marine ecosystems. *In* Climate change 2001: impacts, adaptations and vulnerability. Contribution du Groupe de travail II au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White, dir. de publ.). Cambridge University Press, Cambridge, R.-U., et New York, É.-U., 343-379.

Milne, G.A., J.X. Mitrovica et J.L. Davis. 1999. Near-field hydro-isostasy: the implementation of a revised sea-level equation. *Geophysical Journal International*, **139**, 464-482.

Mitrovica, J.X., et J.L. Davis. 1995. Present-day post-glacial sea-level change far from the late Pleistocene ice sheets. *Geophysical Research Letters*, **22**, 2529-2532.

Mitrovica, J.X., M.E. Tamislea, J.L. Davis et G.A. Milne. 2001. Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change. *Nature*, **409**, 1026-1029.

Parkes, G.S., D.L. Forbes et L.A. Ketch. 2002. Sea-level rise. *In* Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island (Forbes, D.L. et R.W. Shaw, dir. de publ.). Commission géologique du Canada, dossier public 4261, document d'appui 1, 33 p. et 5 annexes (sur CD-ROM).

Peltier, W.R. 1996. Global sea level rise and glacial isostatic adjustment: an analysis of data from the east coast of North America. *Geophysical Research Letters*, **23**, 717-720.

Peltier, W.R. 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Reviews of Earth Science*, **32**, 111-149.

Prest, V.K. 1973. *Surficial deposits of Prince Edward Island*. Commission géologique du Canada, carte 1366A, avec texte et carte d'accompagnement.

Rampton, V.N., R.C. Gauthier, J. Thibault et A.A. Seaman. 1984. *Quaternary geology of New Brunswick*. Commission géologique du Canada, mémoire 416, 69 p. avec annexe et cartes en pochette.

Service hydrographique du Canada. 2001. *Tables des marées et courants du Canada*. Volume 2 : Golfe du Saint-Laurent. Pêches et Océans Canada, Ottawa (publication annuelle).

Shaw, J., et J. Ceman. 1999. Salt-marsh aggradation in response to late-Holocene sea-level rise at Amherst Point, Nova Scotia, Canada. *The Holocene*, **9** (4), 439-451.

Shaw, J., et D.L. Forbes. 1990. Short- and long-term relative sea-level trends in Atlantic Canada. Actes*, Canadian Coastal Conference 1990*, Kingston. Conseil national de recherches du Canada, Comité d'étude des littoraux, Ottawa, 291-305.

Shaw, J., R. Courtney et P. Gareau. 2004. Paleogeography of Atlantic Canada, 13-0 ka. *Quaternary Science Reviews*, **21**, 1861-1878.

Shaw, J., R.B. Taylor et D.L. Forbes. 1992. Impact of accelerated sea-level rise on the coast of Nova Scotia, Canada. Actes du symposium intitulé *The climate of Nova Scotia*, Halifax, 19 novembre 1991, parrainé par le Nova Scotia Climate Advisory Committee et publié par le Service de l'environnement atmosphérique, Canada.

Vaníček, P., et D. Nagy. 1980. *Report on the compilation of the map of vertical crustal movements in Canada*. Énergie, Mines et Ressources, Direction de la physique de la Terre, dossier public 80-2, 59 p.

Walcott, R.I. 1972. Late Quaternary vertical movements in eastern North America: quantitative evidence of glacio-isostatic rebound. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **10**, 849-884.

Woodward, R.S. 1888. On the form and position of mean sea level. *United States Geological Survey Bulletin*, **48**, 87-170.

Woodworth, P.L., M.N. Tsimplis, R.A. Flather et I. Shennan. 1999. A review of the trends observed in British Isles mean sea level data measured by tide gauges. *Geophysical Journal International*, **136**, 651-670.

Wu, P., et W.R. Peltier. 1984. Pleistocene deglaciation and the Earth's rotation: a new analysis. *Geophysical Journal*, **76**, 202-242.

Zhang, K., B.C. Douglas et S.P. Leatherman. 1997. East coast storm surges provide unique climate record. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **78**, 389 & 396-397.

4.2 Climatologie - Ondes de tempête, Vents, Vagues et Glace

George S. Parkes[1]* , G. K. Manson[2], Richard Chagnon[3] et Lorne A. Ketch[1]

[1] Centre de prévision des intempéries de l'Atlantique, Service météorologique du Canada (Atlantique), Environnement Canada, 45, promenade Alderney, 16e étage, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada B2Y 2N6
[2]Commission géologique du Canada (Atlantique), Ressources naturelles Canada, 1 prom. Challenger, (C.P. 1006), Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada B2Y 4A2
[3]Service canadien des glaces, 373, promenade Sussex, Bloc E, troisième étage, Ottawa, Ontario, Canada K1A 0H3

* contact avec l'auteur [courriel : george.parkes@ec.gc.ca]

4.2.1 Introduction

Les ondes de tempête sont une conséquence de l'action des conditions météorologiques sur le niveau de la mer; elles peuvent être définies sur la côte comme la différence entre le niveau d'eau observé et la marée astronomique prévue. Les ondes de tempête peuvent être positives (surcotes) ou négatives (décotes), et donc faire monter ou baisser le niveau de la mer par rapport à sa valeur prévue. Touchant la totalité de nos côtes, elles peuvent se produire à n'importe quel moment du cycle de la marée et même sur plusieurs cycles consécutifs. Ce sont les fortes ondes de tempête positives coïncidant avec une marée haute qui entraînent l'inondation des côtes. Si le niveau de la mer s'élève, l'énergie des vagues frappant les côtes et donc l'érosion de celles-ci vont augmenter; quand il y a de la glace, à plus forte raison sous pression, les morceaux pourront se chevaucher et s'empiler. Les évaluations des augmentations possibles du risque d'inondation des côtes doivent donc inclure une évaluation de la climatologie actuelle des ondes de tempête et l'historique d'inondation de la région concernée. C'est pourquoi nous réalisons dans cette section du rapport, des statistiques des épisodes d'ondes de tempête dépassant 60 cm et examinons les niveaux d'eau extrêmes et les inondations passées.

Une grande partie des travaux présentés dans cette section, et en particulier l'analyse des niveaux d'eau à Charlottetown (marégraphe à long enregistrement de la région), ont été développés par les auteurs dans une étude antérieure intitulée *Coastal Impacts of Climate Change and Sea-level Rise on Prince Edward Island*, *Appendix 1, Part 2: Storm-surge Climatology* (*in* McCullough *et al.*, 1992) et mis à jour pour la présente étude. Nous avons quelque peu révisé et réanalysé les données mais, comme cette analyse est en quelque sorte subjective, le processus a été gardé à un minimum. Certaines données qui n'ont pas été réanalysées sont aussi présentées ici pour des raisons d'exhaustivité, mais ne font pas l'objet d'un renvoi au précédent document.

4.2.2 Sources et prétraitement des données

4.2.2.1 Données de marégraphes

Pour examiner les épisodes d'ondes de tempête, nous avons demandé au Service des données sur le milieu marin (SDMM), à Ottawa, la totalité des données sur le niveau de

l'eau pour le sud du golfe du Saint-Laurent (les emplacements des marégraphes sont indiqués sur la figure 1).

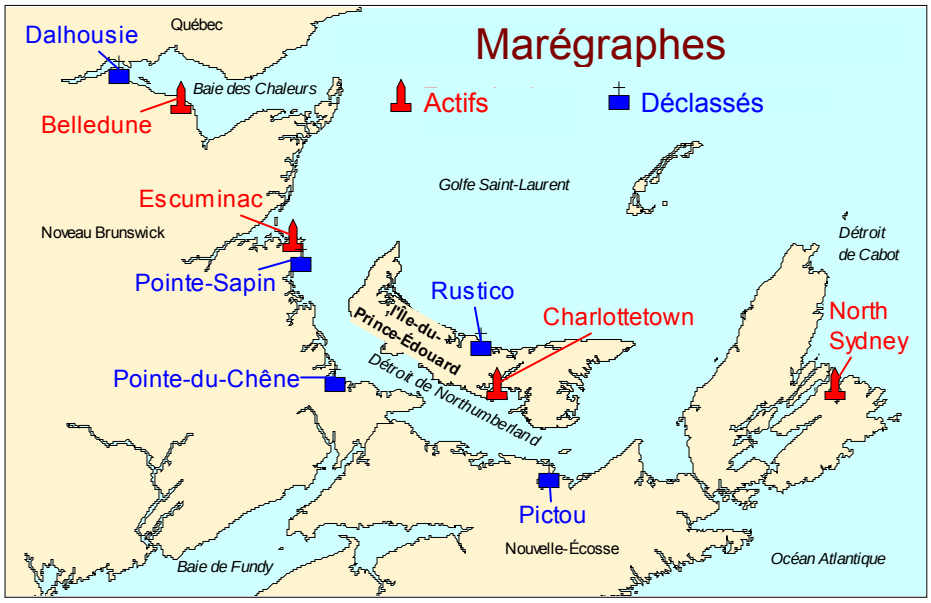


Figure 1. Emplacement des marégraphes en bordure du sud du golfe du Saint-Laurent. Les stations indiquées en rouge sont opérationnelles; les stations en bleu ont été déclassées.

Il s'agissait des fichiers de données suivants, qui constituent les principaux ensembles de données de l'analyse :

1. observations horaires 1973–2005 à Escuminac, Nouveau-Brunswick;
2. observations horaires 1971–1992 et 2003-2005 à Pointe-du-Chêne, Nouveau-Brunswick;
3. observations horaires 1911–2005 à Charlottetown, Île-du-Prince-Éouard;
4. observations horaires 1963–1975 à Pointe-Sapin, Nouveau-Brunswick;
5. observations horaires 1965–1996 à Pictou, Nouvelle-Écosse;
6. observations horaires 1999–2005 à Belledune, Nouveau-Brunswick;
7. observations horaires 1972–1996 à Rustico, Île-du-Prince-Éouard

Les niveaux d'eau sont donnés par rapport au zéro des cartes (ZC) local, qui est défini par le Service hydrographique du Canada (SHC) dans les *Tables des marées et courants du Canada* comme le plan des plus basses marées normales.

4.2.2.2 Marées astronomiques prévues

Les marées astronomiques prévues pour les divers sites marégraphiques nous ont été fournies par le SHC en Colombie-Britannique (SHC-Pacifique) pour les années 1900 à 2003 inclusivement. C'est en effet le SHC qui est chargé de produire les prévisions officielles de marée du Canada, telles qu'on les trouve dans les *Tables des marées et courants du Canada* du ministère des Pêches et des Océans (MPO). Ce sont les prévisions de marée qui avaient été obtenues pour le projet sur l'élévation du niveau de

la mer dans Île-du-Prince-Éouard; elles sont basées sur les analyses de marée de W.R. Crawford, à l'Institut des sciences de la mer (ISM) en juillet 1997. Les prévisions de marée pour 2004, obtenues du SHC à Dartmouth, Nouvelle-Écosse (SHC-Atlantique), sont basées sur de nouveaux composants et de nouvelles moyennes provenant d'une réanalyse de données sur le niveau de l'eau (lorsqu'elles étaient disponibles) pour l'année 2000 (Charles O'Reilly [SHC], comm. pers.).

4.2.2.3 Prétraitement des données SDMM

Les données marégraphiques de Pointe-du-Chêne, Escuminac, Rustico, Pictou, Belledune et Pointe-Sapin ont été soumises au processus de contrôle de la qualité du SDMM, tout comme les données de Charlottetown à partir de novembre 1961. Les données de Charlottetown allant de janvier 1911 à octobre 1961, qui n'ont pas fait l'objet d'un contrôle de la qualité, se sont révélées très incomplètes pour la période antérieure à 1938. Bien qu'un contrôle de la qualité ait été appliqué aux données de Charlottetown de novembre 1961 à décembre 1998, il est demeuré certains problèmes. Il a fallu effectuer un prétraitement des données de niveau d'eau pour structurer les fichiers de données (voir la section 4.1); ensuite, on a regroupé les ensembles de données du SDMM et les marées prévues du SHC pour calculer les différentiels (différence arithmétique entre les deux), et pour isoler et examiner les épisodes d'ondes de tempête, au cas par cas.

4.2.2.4 Erreurs dans l'ensemble de données

Nous avons procédé à un examen visuel des ensembles de données sur les niveaux d'eau, des marées astronomiques prévues et de leurs différentiels pour identifier les erreurs évidentes de données. De plus, un examen visuel simultané des données et des différentiels à des sites marégraphiques adjacents a permis de mieux repérer et référencer ces problèmes. Un certain nombre de problèmes ont effectivement été trouvés, dont :

1. données manquantes (de grandes sections de données observées manquaient dans les ensembles originels ou avaient été exclues par le processus de contrôle de la qualité);
2. pointes (positives et négatives) occasionnelles dans les données;
3. décalages de phase entre les prévisions et les observations dus à des erreurs de synchronisme des données et entraînant des différentiels périodiques d'intensités diverses;
4. dérives de l'étalonnage du marégraphe causant des périodes de moyennes et de différentiels trop importants ou trop faibles;
5. archivage de données avec la mauvaise date (causant des différentiels anormaux);
6. données interpolées (données non réelles pour de courtes périodes insérées par le SDMM);
7. à Pointe-du-Chêne (en octobre 1980), courte période pendant laquelle les données semblent inversées;
8. courtes périodes dans les données des années 1920 à Charlottetown pendant lesquelles les données manquantes ont été codées comme zéro (c.-à-d. zéro des cartes) au lieu du code classique 9999 pour les données manquantes;
9. courte période dans les données de Charlottetown (octobre 1954) pendant laquelle une excursion de marée particulière a été répétée plusieurs fois et le reste du mois placé à la mauvaise date-heure.

Nombre de ces erreurs ont été corrigées et enlevées pendant l'analyse des moyennes dans la section 4.1.

4.2.2.5 Examen des moyennes

Avant de colliger les épisodes d'ondes de tempête pour le rapport sur l'Île-du-Prince-Édouard, on avait évalué l'élévation relative du niveau de la mer sur la période correspondant aux ensembles de données pour normaliser les différentiels (Parkes *et al.*, 2002a). Les résultats finaux pour les données de niveau d'eau de Charlottetown (marégraphe à long enregistrement de la région), présentés à la figure 2, montrent un changement d'environ 32 cm/siècle sur la durée de l'enregistrement marégraphique. Le graphique a été mis à jour pour la présente étude (2005) et montre encore une tendance à long terme de 32 cm/siècle. À partir de cette tendance à long terme du niveau de la mer, et des données de niveau d'eau d'Escuminac et de Pointe-du-Chêne, nous estimons que le taux d'élévation relative du niveau de la mer est de 20 à 25 cm/siècle à Escuminac et de 25 à 30 cm/siècle à Pointe-du-Chêne (*section* 4.1.5).

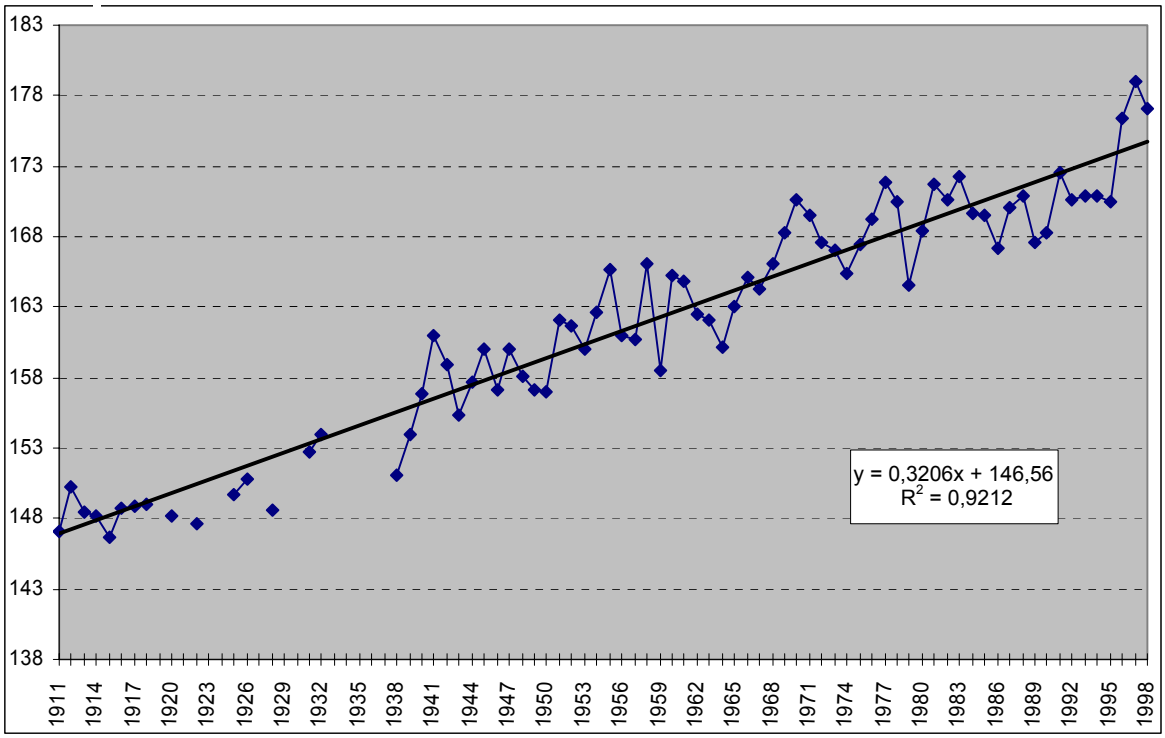


Figure 2. Niveaux d'eau annuels moyens à Charlottetown (1911-1998) en centimètres au-dessus du zéro des cartes, tirés de : Parkes *et al.*, 2002. *Sea-level rise*. La régression linéaire entre les données indique une élévation du niveau de la mer d'environ 32 cm/siècle.

4.2.3 Les ondes de tempête à Charlottetown

4.2.3.1 Ajustement de l'ensemble de données pour Charlottetown

Pour étudier les épisodes d'ondes de tempête, il faut soustraire les marées prévues des observations du niveau d'eau et colliger les différentiels résultants. Les observations du niveau de l'eau remontent jusqu'à 1911, et l'intensité apparente et le nombre (au-dessus d'un seuil donné) des ondes de tempête baissent à mesure qu'on remonte dans le

temps, parce que les prévisions de marée sont réalisées avec une seule valeur moyenne de niveau de la mer (moyenne de l'analyse de la marée = Z_0) et non avec une tendance du niveau moyen de la mer. Pour Charlottetown, Z_0 a été calculé par le SHC à partir d'une analyse de marée concernant une année de données centrée sur octobre 1980. Pour normaliser cet état de choses, il faut rajuster soit les marées astronomiques prévues, soit les données d'observation du niveau de l'eau.

Le Z_0 de Charlottetown (dans nos prévisions tirées de W.R. Crawford en 1997) est de 1,676 m au-dessus du zéro des cartes (ZC). À la figure 2, la droite de régression des moyennes annuelles coupe 1,676 m à l'année décimale 1976,60 (voir l'équation de régression). On a donc pris l'année 1977 comme année la plus proche de Z_0 et, pour les fins de notre analyse, les données d'observation du niveau de la mer ont été augmentées pour les années précédentes à raison de 32 cm/siècle et diminuées de la même manière pour les années subséquentes.

4.2.3.2 Ondes de tempête à Charlottetown – 1960-2005

Les marées astronomiques prévues pour Charlottetown ont été soustraites des données ajustées d'observation du niveau de la mer pour la période allant de 1960 à octobre 2005 (45 ans en tout – l'ensemble de données à contrôle de la qualité du SDMM, plus les données de 1960 et du début de 1961 [pour compléter les années 1960]). Les différentiels positifs supérieurs à 60 cm ont été retenus comme épisodes d'ondes de tempête. Pour 2004 et 2005, on a retenu les différentiels supérieurs à 0,52 m (en raison d'un changement de Z_0 dans les prévisions de la marée). Parfois, la série chronologique des différentiels coupe le seuil à plusieurs reprises; le nombre d'« épisodes » est donc quelque peu subjectif. Il a été décidé que, pour être considérés comme distincts aux fins de la présente analyse, les épisodes doivent présenter des pointes séparées d'au moins 12 heures et passer par un creux inférieur à 40 cm. De plus, ces « paires » doivent aussi se manifester comme des épisodes distincts à un marégraphe adjacent (pour Charlottetown, le site le plus proche et le plus approprié à cet égard est celui de Pictou).

En plus de la hauteur de l'onde de tempête, nous avons également noté le niveau d'eau maximum atteint pendant l'épisode. Nous avons pris pour cela le niveau observé le plus élevé associé à l'épisode d'onde de tempête pendant la période où l'onde dépassait 40 cm. Cette valeur était généralement différente du niveau de l'eau au moment de la pointe de l'onde.

Nous avons répertorié sur la période 1960-2005 un total de 350 épisodes, qui sont, avec le niveau d'eau maximum atteint pendant l'épisode (en hauteur au-dessus du ZC), pointés par ordre chronologique à la figure 3, par hauteur croissante de l'onde à la figure 4, et par niveau d'eau maximum croissant à la figure 5. On devra se souvenir que les niveaux d'eau ont été ajustés pour tenir compte de l'élévation du niveau de la mer. Le niveau d'eau maximum atteint pendant l'épisode n'est pas le niveau d'eau observé réel, mais peut être considéré comme le niveau qu'aurait atteint l'épisode s'il était survenu en 1977.

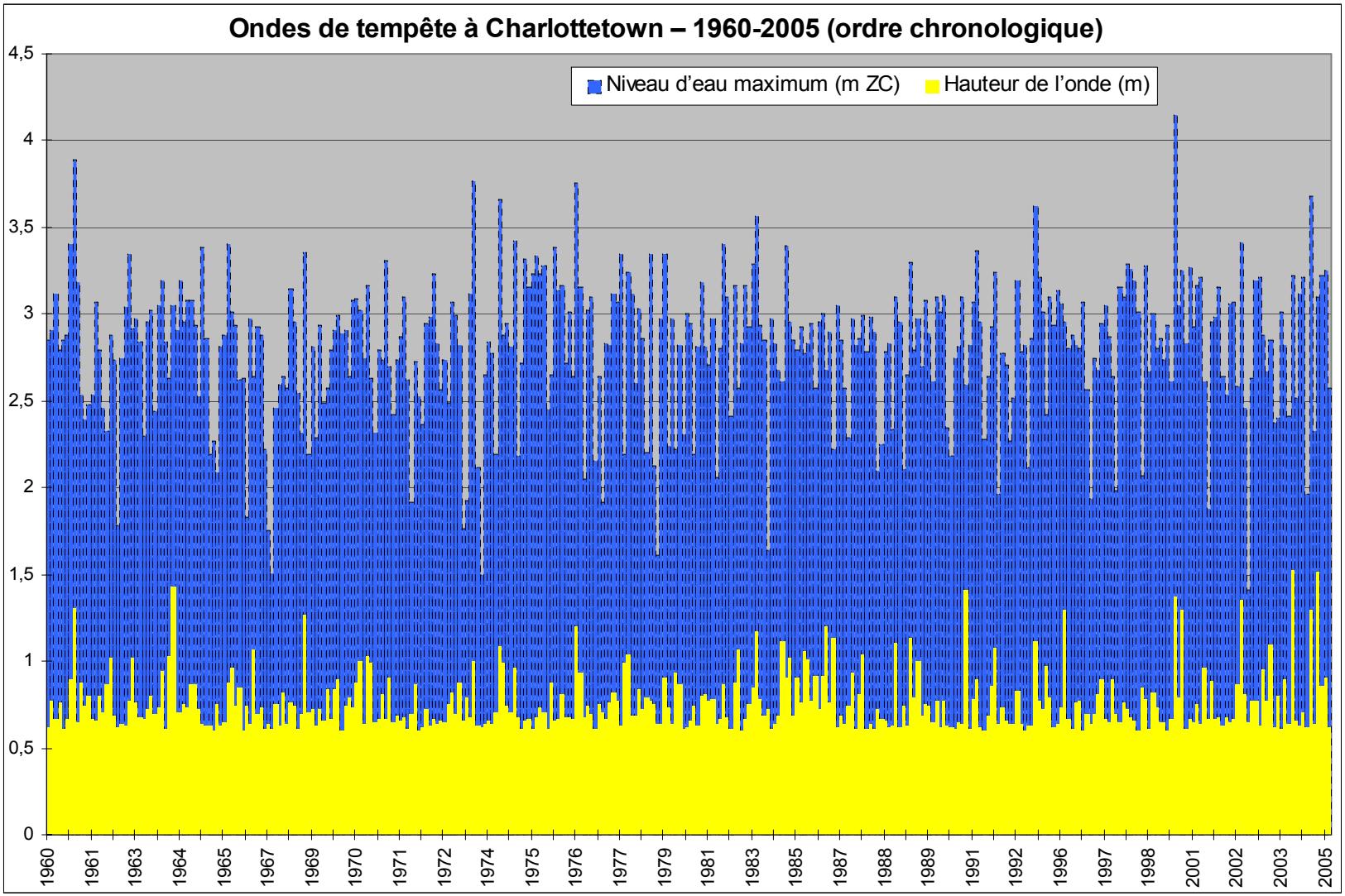


Figure 3. Toutes les ondes de tempête observées à Charlottetown (1960-2005), en ordre chronologique.

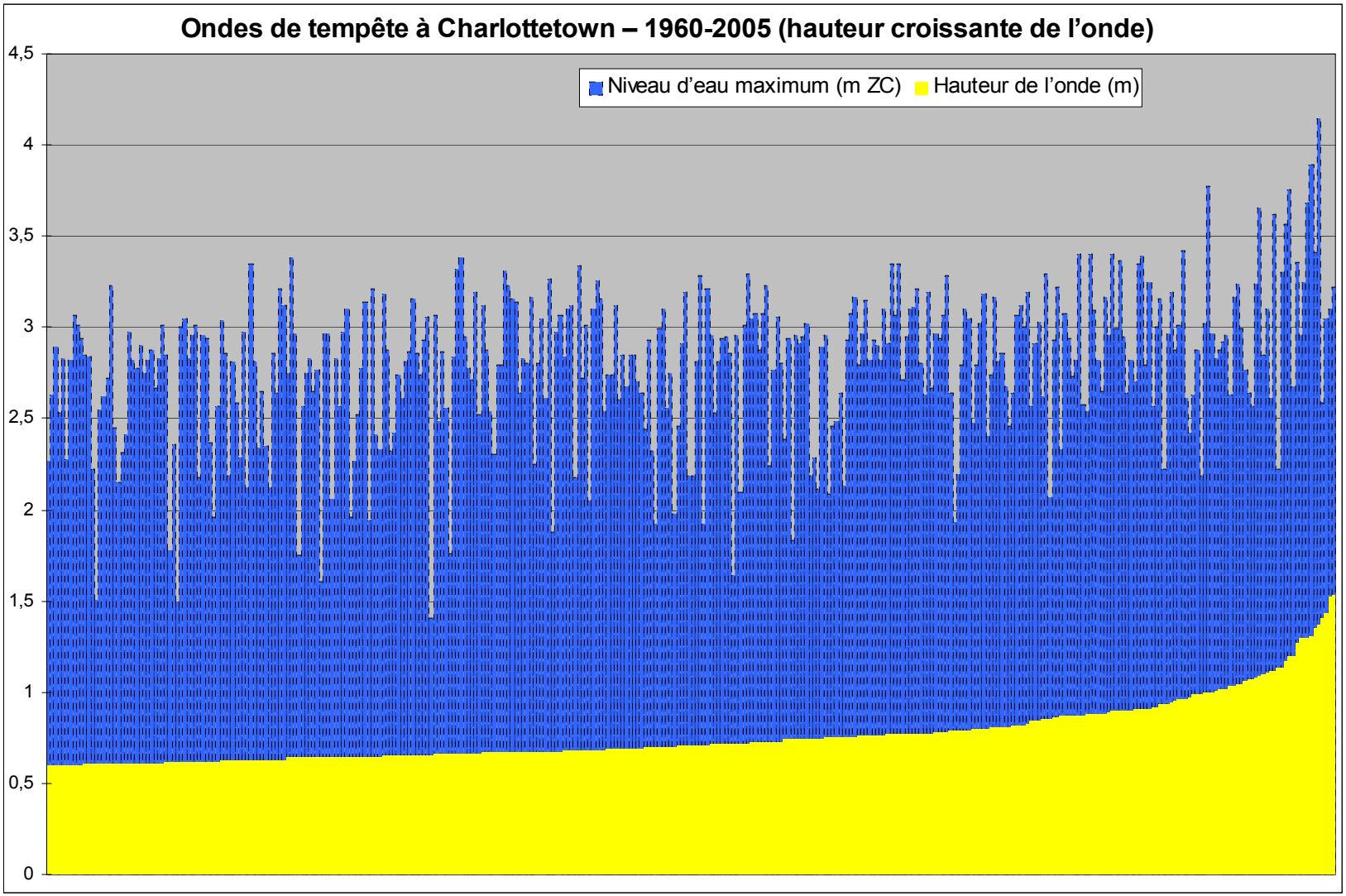


Figure 4. Toutes les ondes de tempête observées à Charlottetown (1960-2005), par hauteur croissante de l'onde.

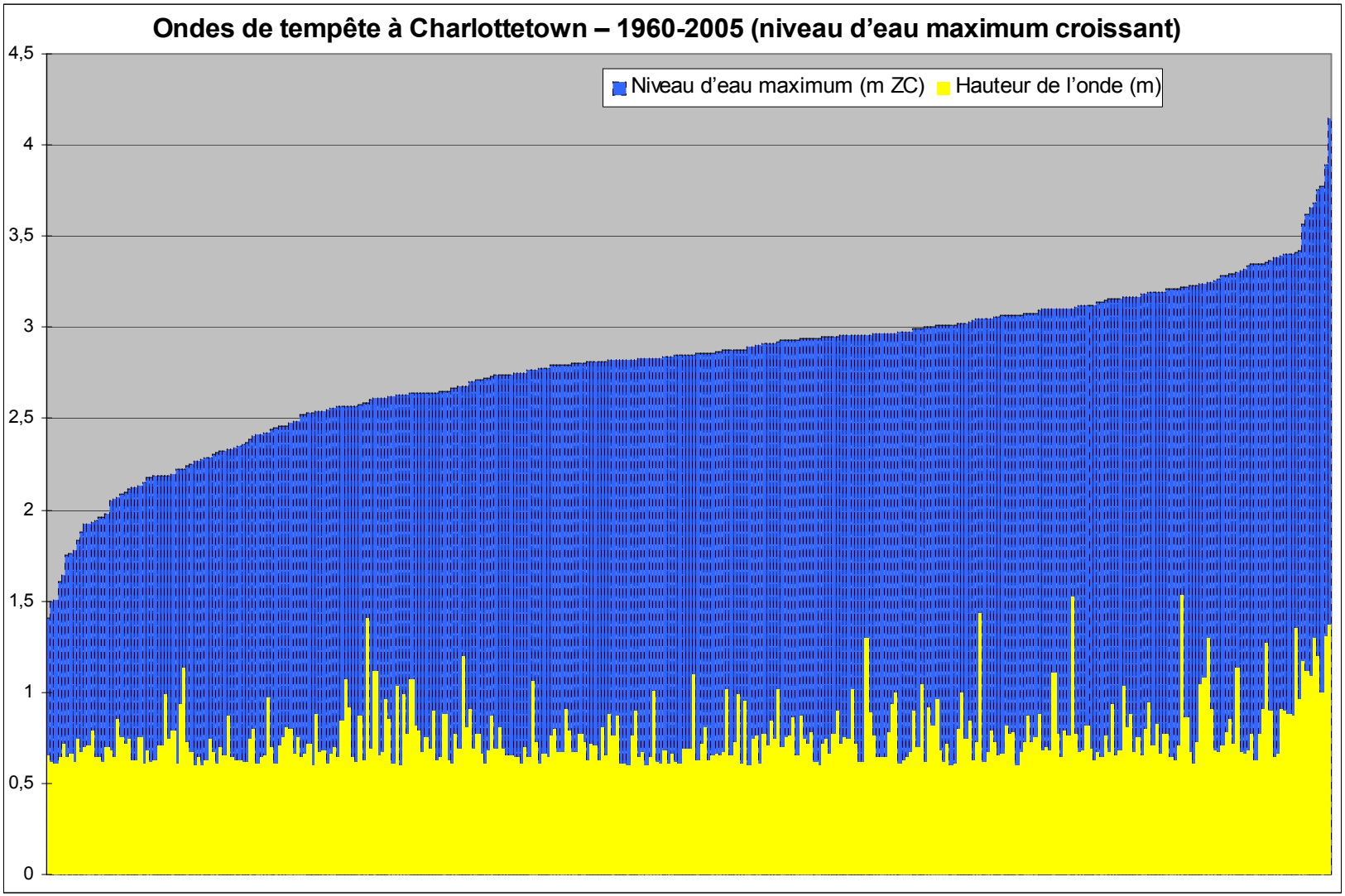


Figure 5. Toutes les ondes de tempête observées à Charlottetown (1960-2005), par niveau d'eau maximum croissant.

4.2.3.3 Prise en compte des données manquantes pour Charlottetown 1960-2005

Le texte ci-dessous reprend l'analyse donnée dans Parkes & Ketch, 2002. ***Storm surge climatology.*** *Section 2.3.3 Accounting for missing data at Charlottetown 1960-1998,* pour le projet sur l'élévation du niveau de la mer dans l'Île-du-Prince-Édouard, avec une mise à jour composée de nouvelles données pour 1999-2005. Depuis 1999, il n'y a eu que très peu de données manquantes.

La pièce jointe A (section 4.2.15.1) est un sommaire des données manquantes à Charlottetown, mois par mois, y compris les années 1960-2005. Une inspection visuelle des différentiels pour les divers sites marégraphiques montre que ceux de Charlottetown ressemblent beaucoup plus à ceux de Pictou qu'à ceux des autres sites. De plus, le marégraphe de Pictou a le deuxième enregistrement le plus long, après Charlottetown; c'est pourquoi on l'a utilisé dans la mesure du possible pour combler les lacunes d'épisodes manquants d'ondes de tempête.

Les données d'observation du niveau de la mer de Pictou ont été corrigées pour tenir compte de l'élévation relative du niveau de la mer de la même manière que celles de Charlottetown, c.-à-d. à raison de 32 cm/siècle à partir de 1977. Les épisodes d'ondes de tempête en ont été extraits sur la même base que pour Charlottetown. Les valeurs de pointe de l'onde pour les mêmes épisodes survenus à la fois à Pictou et à Charlottetown sont pointées sur le diagramme de dispersion de la figure 6. Il s'agit de 130 épisodes d'ondes de tempête où l'onde a dépassé 60 cm aux deux endroits. Une droite de régression linéaire de meilleur ajustement est tracée dans les données, et forcée par l'origine du diagramme de dispersion. Ce diagramme montre que les ondes de tempête à Pictou et à Charlottetown présentent des intensités similaires.

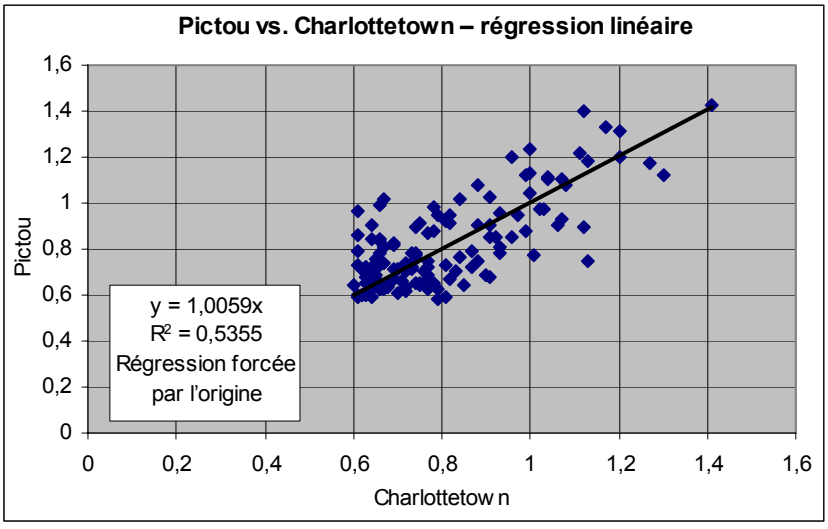


Figure 6. Valeurs de pointe des ondes de tempête – Pictou *vs* Charlottetown.

La plupart du temps, quand les données de Charlottetown étaient manquantes, on disposait de celles de Pictou (Parkes & Ketch, 2002b. Attachment B. *A comparison of*

periods of missing data at Charlottetown and Pictou). Si les données de Pictou manquaient aussi, on prenait celles de Pointe-du-Chêne. On a également corrigé les données d'observation du niveau de la mer de Pointe-du-Chêne pour tenir compte de l'élévation relative du niveau de la mer, de la même manière que pour celles de Charlottetown, soit à raison de 32 cm/siècle à partir de 1977. Les épisodes d'ondes de tempête en ont été extraits comme pour Charlottetown. Les valeurs de pointe des épisodes survenus à la fois à Pointe-du-Chêne et à Charlottetown sont présentées sur un diagramme de dispersion à la figure 7. Il s'agit cette fois de 102 épisodes d'ondes de tempête qui dépassaient 60 cm à la fois à Pointe-du-Chêne et à Charlottetown.

Une droite de régression linéaire de meilleur ajustement (forcée par l'origine) est tracée dans les données. On note ici une variabilité plus grande qu'entre Charlottetown et Pictou (figure 6). On voit que les ondes de tempête sont généralement plus importantes à Pointe-du-Chêne qu'à Charlottetown, d'un facteur moyen de 1,14. Lorsque les données de Charlottetown et de Pictou manquaient, on appliquait un facteur de correction de 0,88 aux épisodes de Pointe-du-Chêne, qui étaient ensuite comptés comme des épisodes à Charlottetown.

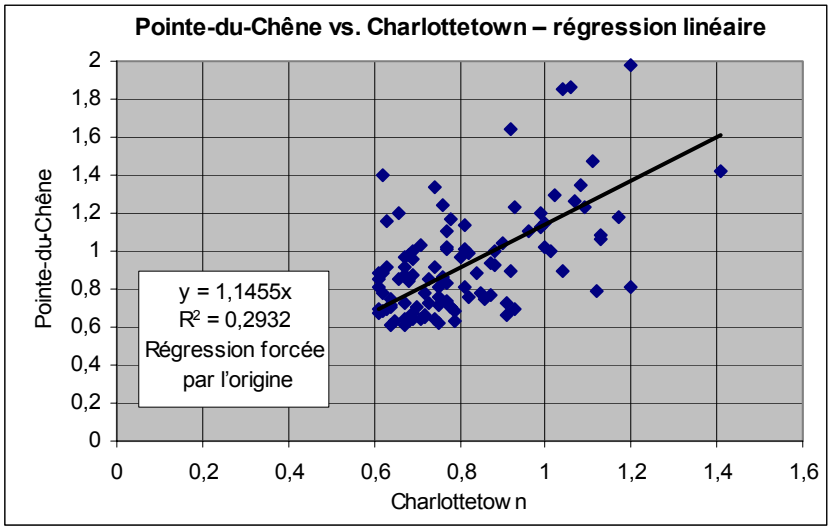


Figure 7. Valeurs de pointe des ondes de tempête – Pointe-du-Chêne *vs*. Charlottetown.

Il s'est trouvé de courtes périodes pendant lesquelles les données manquaient à la fois pour Charlottetown, Pictou et Pointe-du-Chêne. On a alors recherché des épisodes dans les données d'Escuminac et de Rustico, mais il n'en a été identifié qu'un. Les nouvelles données pour 1999-2005 étaient très complètes mais, sur les périodes de données manquantes, on a cherché des épisodes à d'autres sites. Aucun n'a été trouvé; il faut cependant noter qu'aucune autre donnée n'était disponible à des fins de contre-vérification pour la période de trois jours de données manquantes en novembre 2000.

Au total, huit épisodes interpolés ont été tirés de l'enregistrement marégraphique de Pictou, sept de celui de Pointe-du-Chêne, et un d'Escuminac et de Rustico. Ces épisodes interpolés ne représentent que 4 % de l'ensemble de données.

4.2.4 Climatologie des ondes de tempête à Charlottetown

Les *Normales climatiques du Canada* (1993) sont une série de volumes de données climatologiques sur la température, les précipitations, les vents et d'autres variables, comportant des statistiques sur une période de 30 ans et représentant la climatologie de la région. La période de 30 ans est celle que recommande l'Organisation météorologique mondiale pour définir des normales. Ce nombre d'années, bien que choisi de façon quelque peu arbitraire, a cependant été considéré comme assez long pour éliminer la variabilité interannuelle. Aux fins de notre étude, nous utiliserons l'ensemble de données de niveau d'eau soumises à un contrôle de la qualité sur 43 ans, soit la période allant de novembre 1961 à décembre 2004 à Charlottetown, pour définir la climatologie des ondes de tempête à cet endroit. Les données pour 1960 et la première partie de 1961 y seront incluses pour arrondir la décennie 1960 et prendre en compte l'épisode de niveau d'eau élevé qu'on sait être survenu le 21 janvier 1961 (donc un total de 45 années).

4.2.4.1 Climatologie des ondes de tempête à Charlottetown – 1960-2004

La figure 8 présente les nombres annuels moyens d'épisodes d'ondes de tempête dépassant divers seuils. Tous les épisodes survenus à Charlottetown (dont les données interpolées) sont montrés par an et par catégorie d'intensité (définie par des seuils espacés de 10 cm) à la figure 9. Les mêmes données sont également présentées dans des graphiques individuels pour les seuils de 60, 80, 100 et 120 cm à la figure 10. La distribution des ondes de tempête (selon les données de 1960-1998) au-dessus des seuils et par mois est illustrée par la figure 11. Ces données représentent la climatologie des ondes de tempête à Charlottetown.

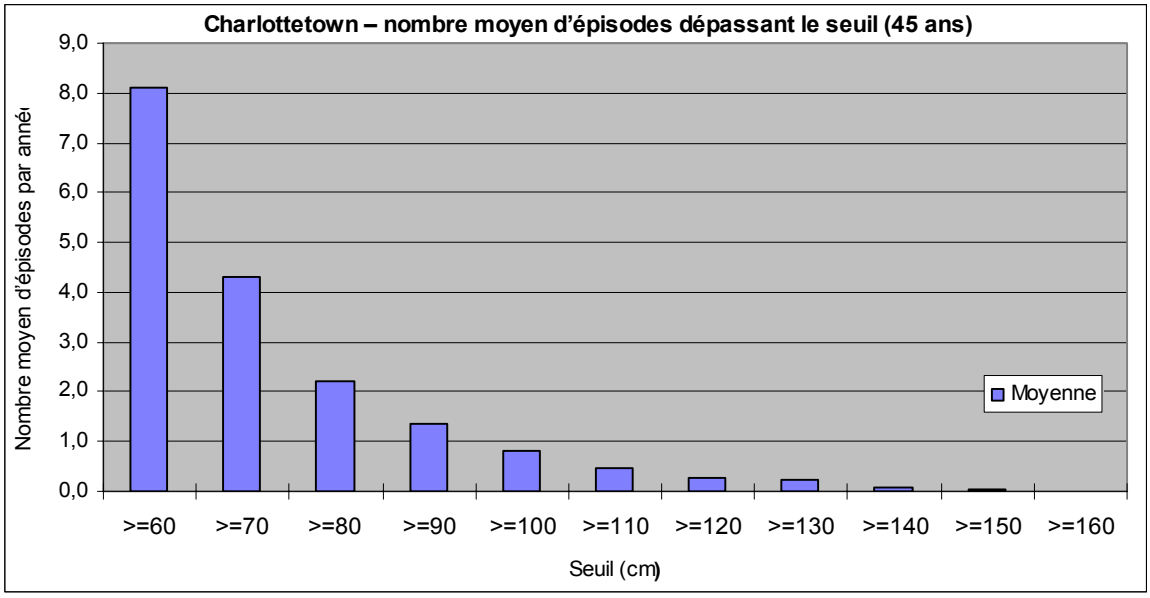


Figure 8. Nombre annuel moyen d'ondes de tempête dépassant des seuils donnés à Charlottetown (1960-2004).

En règle générale, les ondes de tempête de plus de 60 cm sont fréquentes à Charlottetown, avec une moyenne de huit occurrences par année, contre par exemple deux fois par an sur la côte atlantique à Halifax (Galbraith, 1979; Parkes *et al.*, 1997). Nous avons repéré 30 épisodes de 100 cm ou plus, soit près de un par an en moyenne. Les ondes de tempête dépassant 120 cm sont rares (on en a trouvé 13) et se produisent en moyenne trois fois par décennie. Nous avons trouvé deux épisodes de 150 cm. Les ondes de tempête qui touchent Charlottetown se produisent surtout pendant la saison de tempêtes, à la fin de l'automne et en hiver. Les statistiques moyennées montrent une augmentation de fréquence en octobre et en novembre, avec une pointe d'activité en décembre et en janvier. La fréquence baisse significativement en avril, et on n'a noté que peu d'occurrences sur la période de mai à septembre. La fréquence des ondes de tempête varie considérablement d'une année à l'autre, en raison de la grande variabilité interannuelle de la fréquence et de l'intensité des tempêtes elles-mêmes (Lambert, 1996; Hirsch *et al*., 1999; Manson *et al.*, 2002b) et de leurs trajectoires. Sur la période 1960-2004, on a noté des périodes où les tempêtes étaient regroupées; il est difficile de détecter des tendances claires dans les données, mais les ondes de tempête supérieures à 120 cm semblent être devenues un peu plus fréquentes dernièrement.

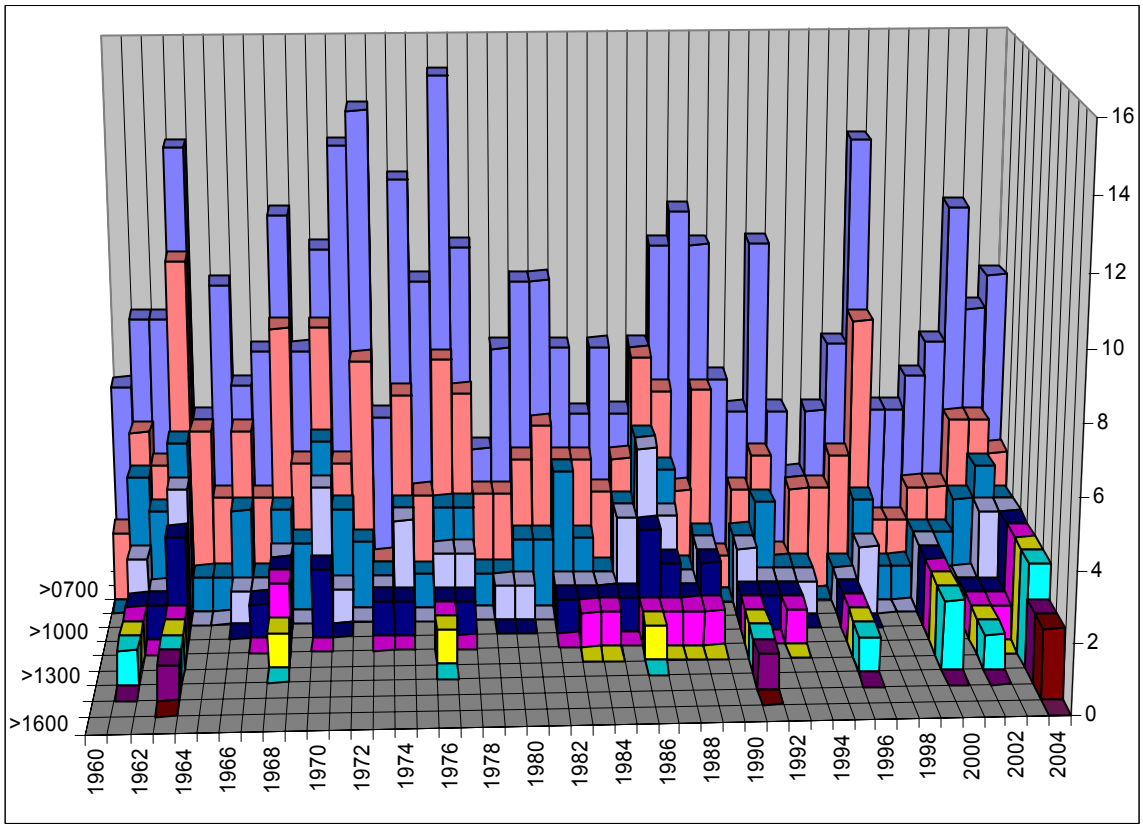


Figure 9. Ondes de tempête dépassant certains seuils à Charlottetown (1960-2004).

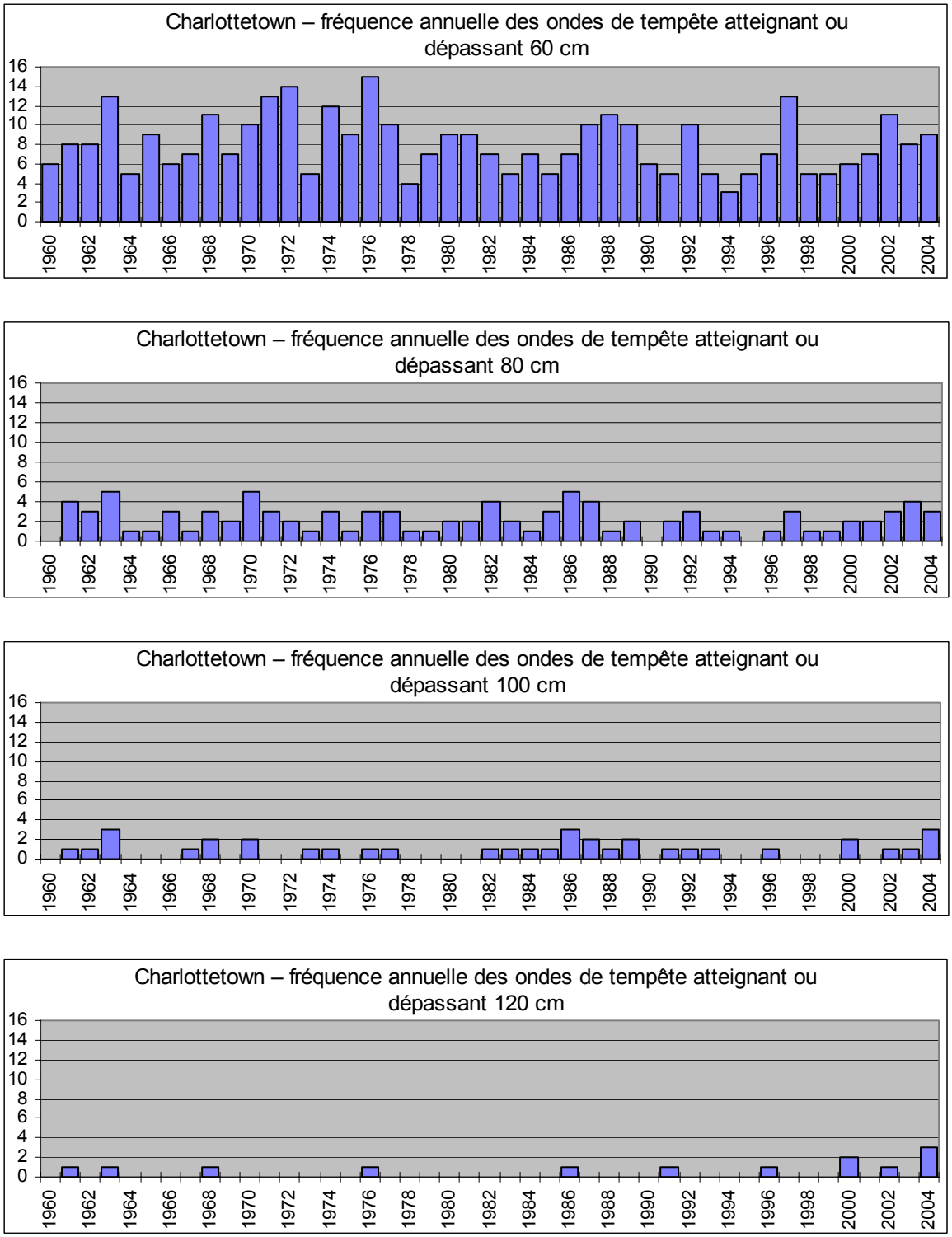


Figure 10. Ondes de tempête dépassant les seuils de 60, 80, 100 et 120 cm à Charlottetown (1960-2004).

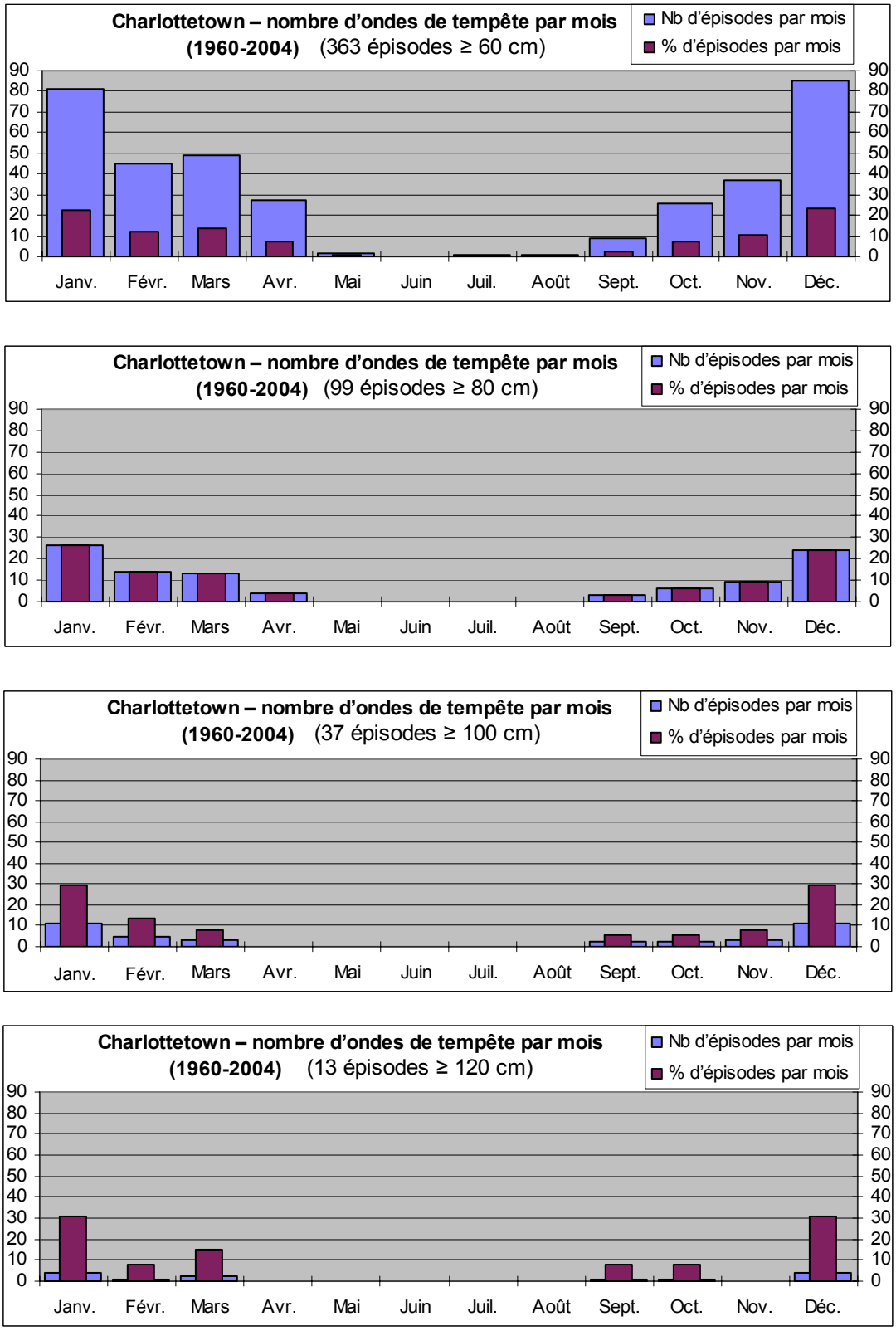


Figure 11. Ondes de tempête dépassant les seuils de 60, 80, 100 et 120 cm à Charlottetown, par mois, (1960-2004).

4.2.4.2 Données de 1911 à 1959 sur le niveau de l'eau à Charlottetown

Des ondes de tempête dépassant 60 cm ont été extraites des données sur le niveau de l'eau à Charlottetown pour la période 1911-1959, ainsi que le niveau maximum atteint lors de chaque épisode. Bien que ces données n'aient pas été soumises au processus de contrôle de la qualité du SDMM, une inspection visuelle a révélé qu'elles étaient dans l'ensemble de très bonne qualité. Quelques pointes ont été éliminées de l'ensemble de données, de même que les courtes périodes d'importantes erreurs de phase. Parfois, certaines données ne pouvaient pas être conciliées avec les marées prévues; elles ont donc été exclues de l'analyse. Les éventuels épisodes d'ondes de tempête manquants pendant cette période ne pouvaient pas être interpolés à partir d'autres marégraphes, parce que nous n'avons pas de données numériques de stations proches. On peut cependant voir à partir de la pièce jointe A, section 4.2.15.1, (données mensuelles manquantes – 1911-1959) que les données sont presque complètes pour la période 1938-1959.

Les résultats sont pointés par ordre chronologique à la figure 12. À la figure 13, les ondes de tempête survenues à Charlottetown entre 1911 et 1959 sont présentées par année au-dessus des seuils de 60, 80, 100 et 120 cm, avec le pourcentage annuel de données manquantes.

Tous les épisodes observés à Charlottetown (en excluant les épisodes interpolés) sur les périodes 1911-1959 et 1960-1998 sont colligés à la figure 14 et pointés en ordre chronologique.

Nous examinerons plus loin les trajectoires des systèmes météorologiques qui ont engendré des ondes de 90 cm ou plus à Charlottetown (sections 4.2.8 et 4.2.9). Nous examinerons aussi la signature des données du niveau d'eau à Charlottetown des cyclones tropicaux traversant la région.

Bien que les plus anciennes données marégraphiques numériques pour Charlottetown archivées au SDMM remontent à 1911, un marégraphe y avait été installé dès octobre 1907 (Dawson, 1917). On dispose de quelques observations antérieures remontant à 1896, et les extrêmes de ces observations sont donnés par Dawson par rapport à des références arbitraires. Il est intéressant de noter que Dawson ne mentionne aucune inondation du front de mer de Charlottetown durant ses observations.

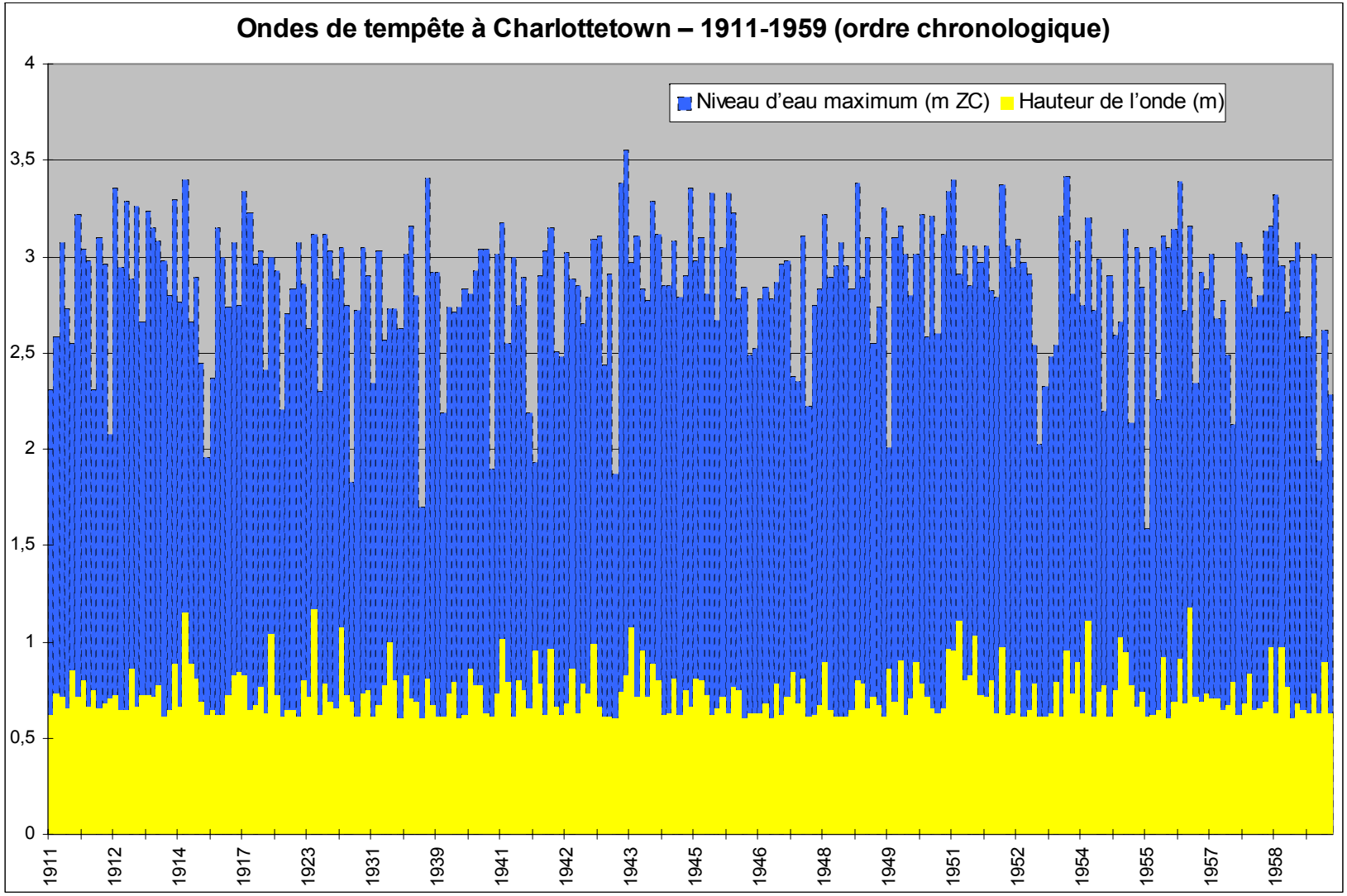


Figure 12. Toutes les ondes de tempête supérieures à 60 cm observées à Charlottetown (1911-1959), en ordre chronologique.

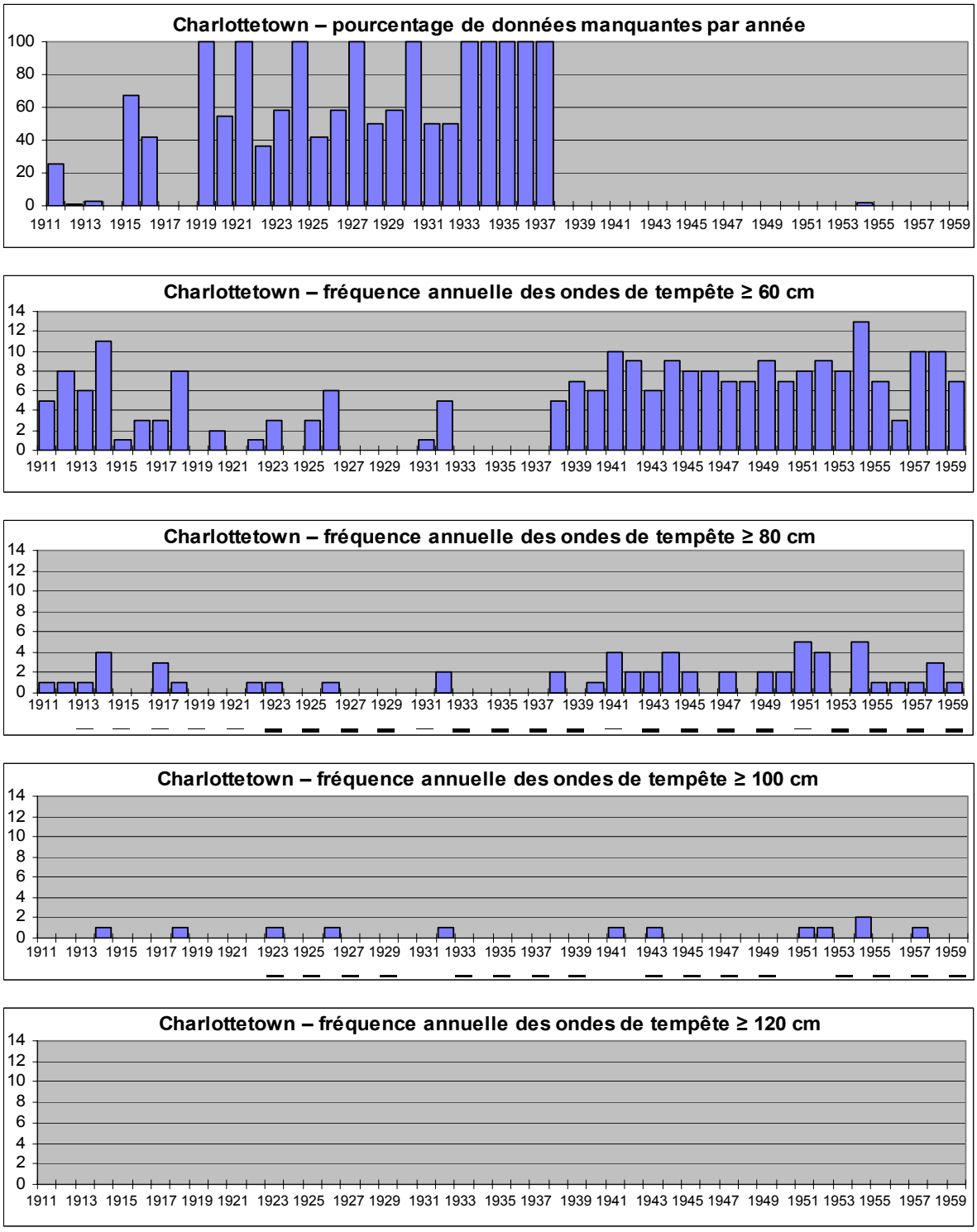


Figure 13. Ondes de tempête à Charlottetown au-dessus des seuils de 60, 80, 100 et 120 cm (1911-1959).

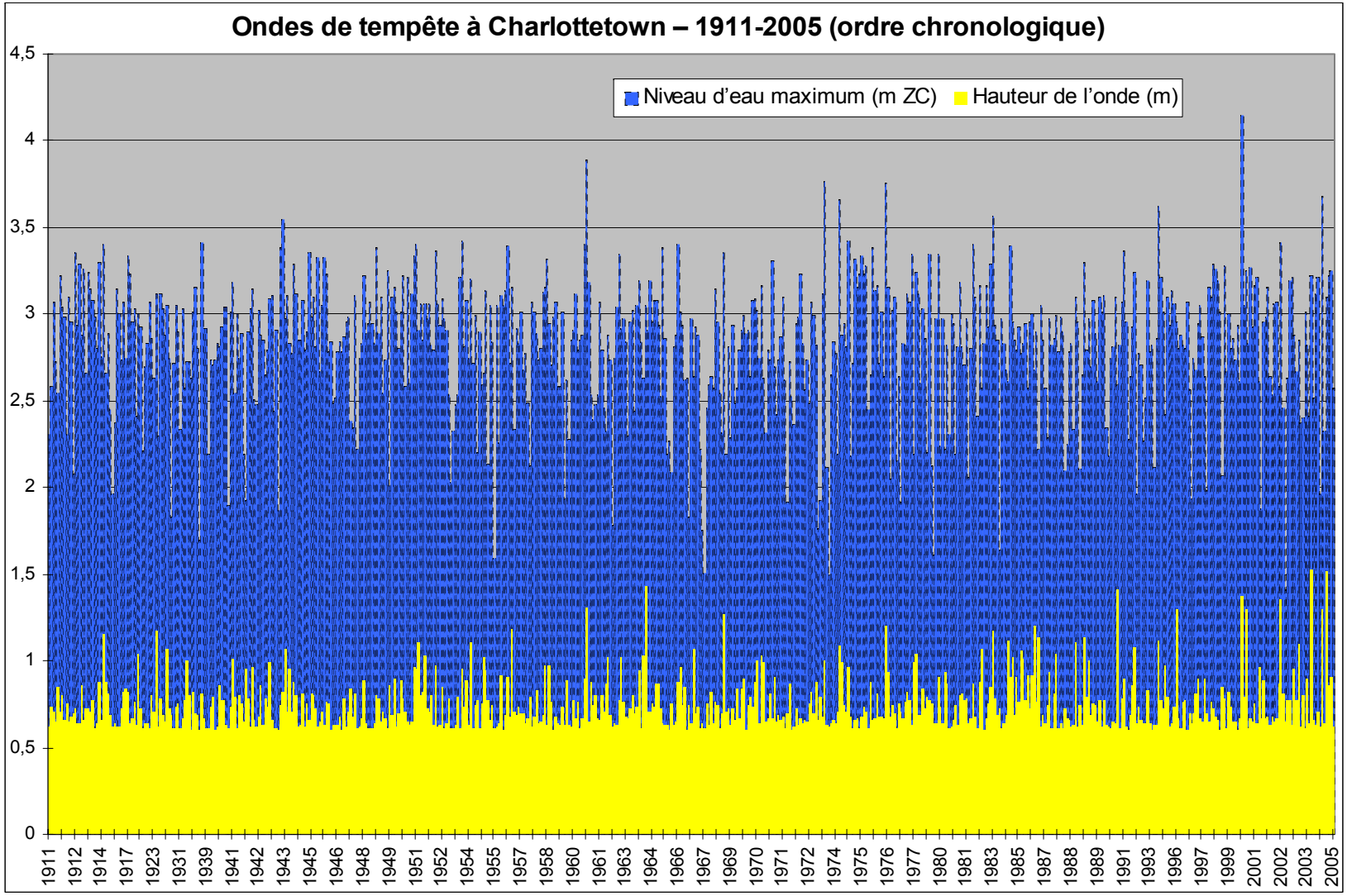


Figure 14. Toutes les ondes de tempête supérieures à 60 cm observées à Charlottetown (1911-2005), en ordre chronologique.

4.2.4.3 Statistiques décennales des ondes de tempête à Charlottetown

Dans la base de données sur les ondes de tempête survenues de 1938 à 2005 à Charlottetown, il y a très peu de manques. Aux figures 15 à 20, les données ont été colligées par décennie des années 1940 aux années 1990; elles sont présentées sous forme d'histogramme à la figure 21.

Les ondes de tempête semblent être devenues un peu plus fréquentes des années 1940 aux années 1960; en particulier, des ondes fortes (>120 cm), totalement absentes des décennies 1940 et 1950 (et jamais enregistrées dans les années antérieures [voir la figure 13]), sont visibles par la suite, même si elles restent rares. Les décennies 1970 et 1980 ont connu beaucoup d'ondes de tempête, avec chaque année en moyenne plus de deux épisodes supérieurs à 80 cm et, dans les années 1980, plus d'un épisode de 100 cm. Dans les années 1990, il y a eu dans l'ensemble moins d'ondes de tempête, même s'il est survenu quelques épisodes particulièrement forts.

À la figure 22, les mêmes données sont présentées par tranches de 5 ans. On voit que certaines périodes sont beaucoup plus actives que d'autres, surtout le début des années 1960 et la fin des années 1980. Nous verrons plus tard que ces périodes ont été marquées par de fréquents coups de vent du nord-est. La période depuis 2000 a aussi été très active.

On peut utiliser les enregistrements de longue durée des ondes de tempête pour caractériser les changements de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, mais les résultats peuvent ne pas être concluants, à moins qu'ils ne soient confortés par les données de marégraphes proches situés sur des côtes orientées différemment, puisque les trajectoires des tempêtes sont aussi un facteur important. Zhang *et al.* (1997) ont examiné des enregistrements marégraphiques de longue durée à Atlantic City, au New Jersey, et à Charleston, en Caroline du Sud. Ils ont noté des variations interdécennales, mais pas de tendance visible à long terme de l'intensité des ondes ou de l'activité cyclonique au cours du XX^{e} siècle. Cependant, au large de la côte est de l'Amérique du Nord, il y a souvent des cyclogénèses et des creusages explosifs de dépressions (Sanders & Gyakum, 1980; Manson *et al.*, 2002b); c'est pourquoi les tendances des tempêtes intenses peuvent avoir une signature plus grande plus au nord. Lambert (1996), dans son étude des épisodes hivernaux de cyclones extratropicaux intenses dans l'hémisphère Nord de 1899 à 1991, a remarqué une augmentation du nombre de tempêtes intenses après 1970 dans l'Atlantique Nord en général. Les changements survenus dans les ondes de tempête intenses sont examinés plus loin, dans la section du rapport concernant la modélisation numérique (section 4.3).

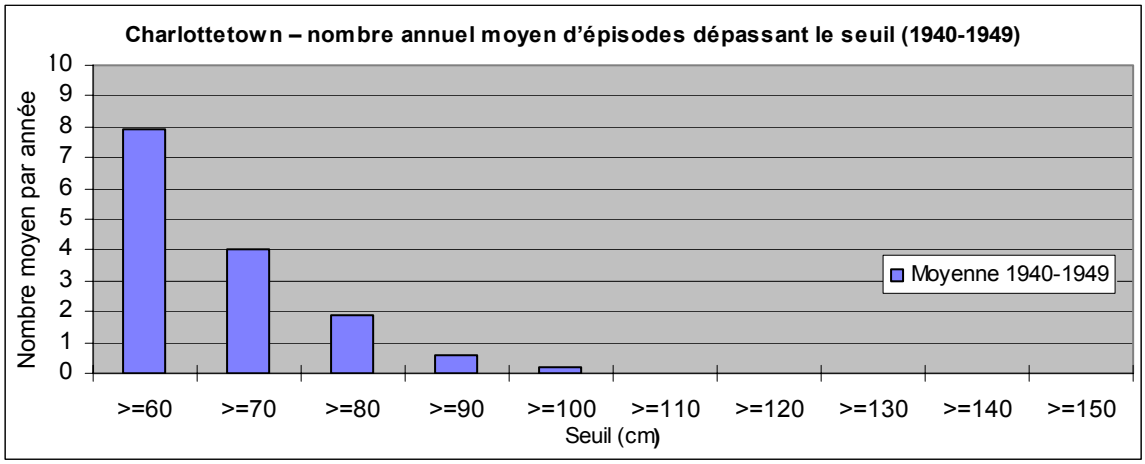


Figure 15. Fréquence annuelle moyenne des ondes de tempête dépassant certains seuils dans les années 1940.

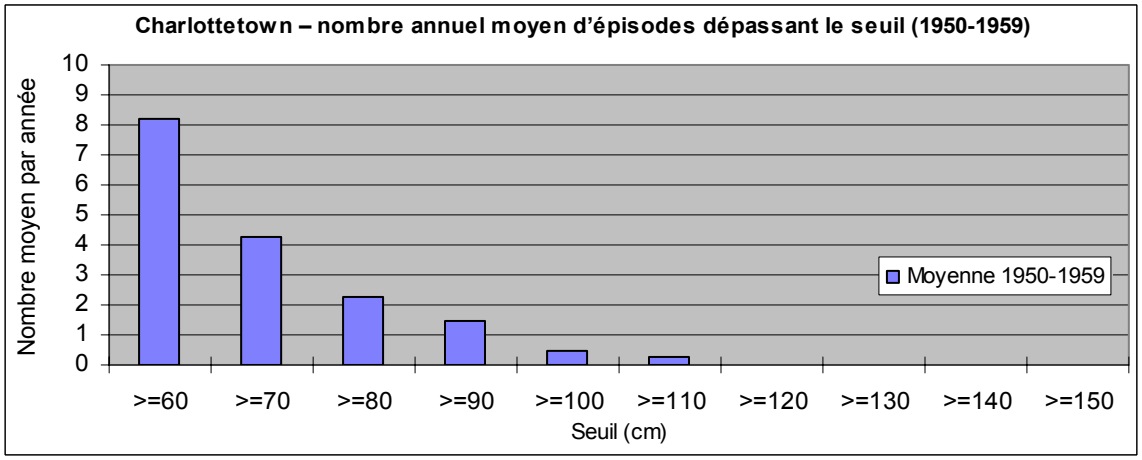


Figure 16. Fréquence annuelle moyenne des ondes de tempête dépassant certains seuils dans les années 1950.

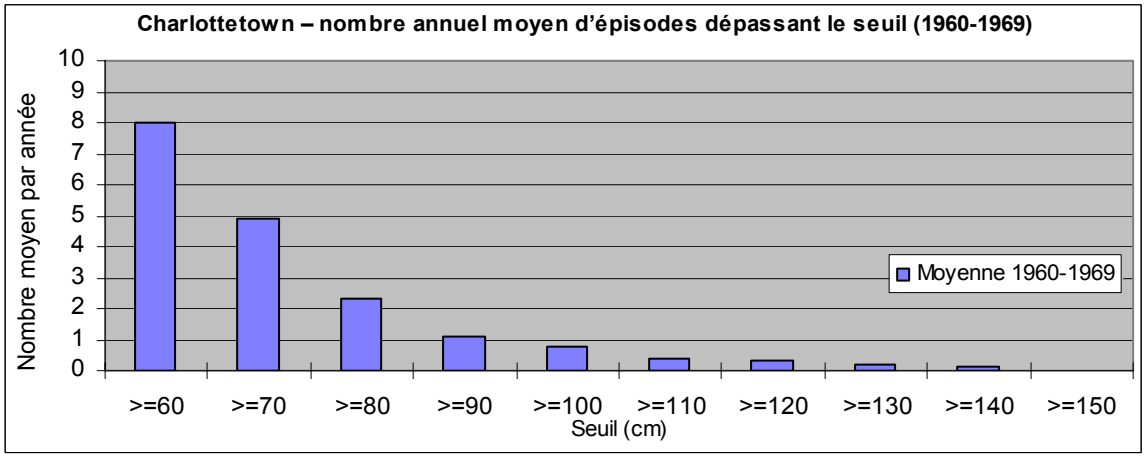


Figure 17. Fréquence annuelle moyenne des ondes de tempête dépassant certains seuils dans les années 1960.

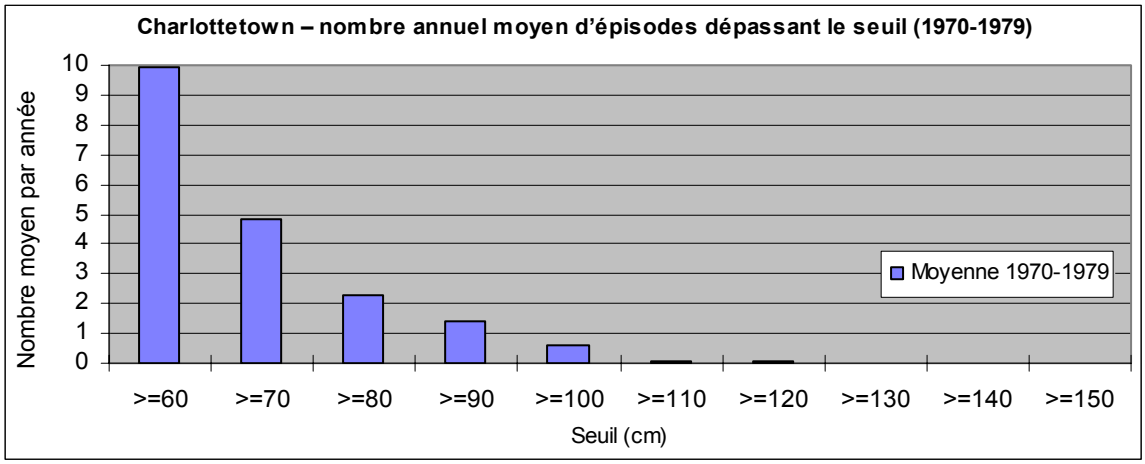


Figure 18. Fréquence annuelle moyenne des ondes de tempête dépassant certains seuils dans les années 1970.

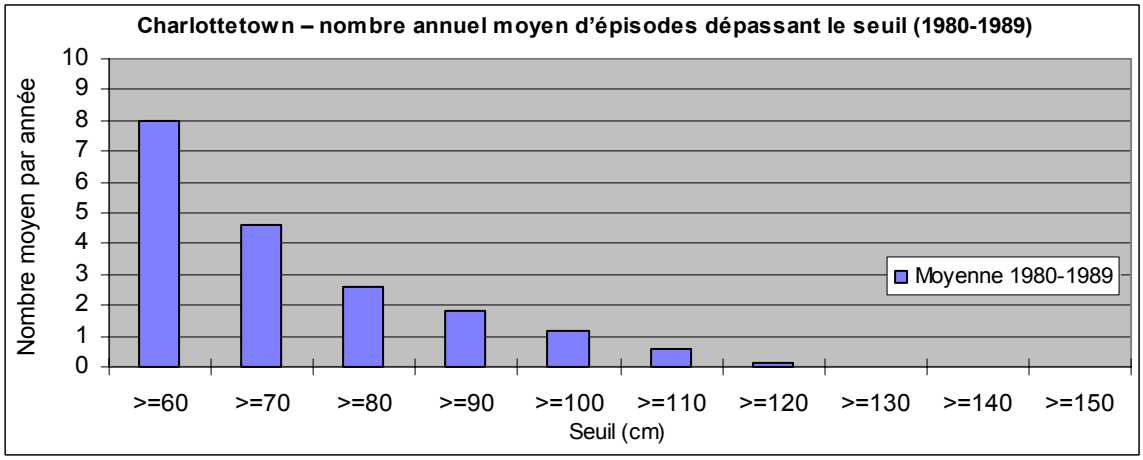


Figure 19. Fréquence annuelle moyenne des ondes de tempête dépassant certains seuils dans les années 1980.

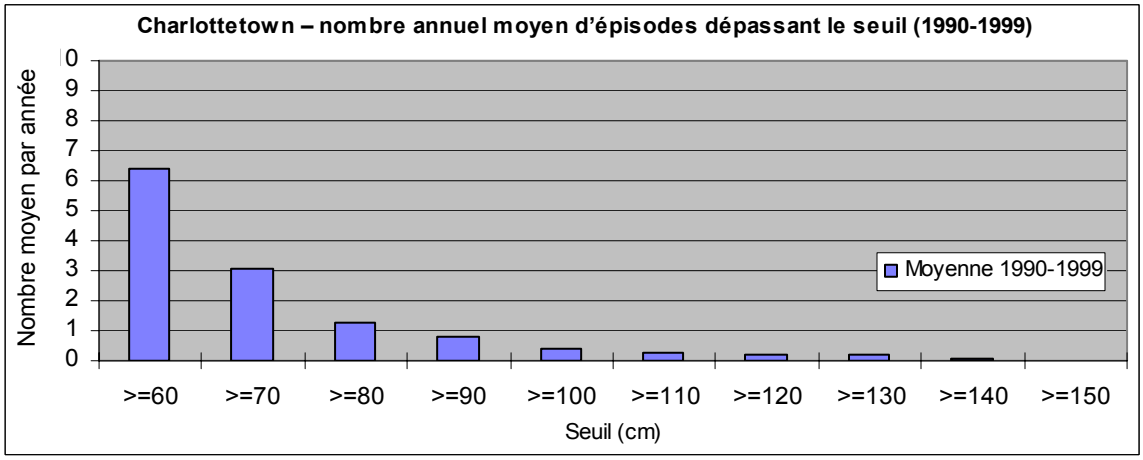


Figure 20. Fréquence annuelle moyenne des ondes de tempête dépassant certains seuils dans les années 1990.

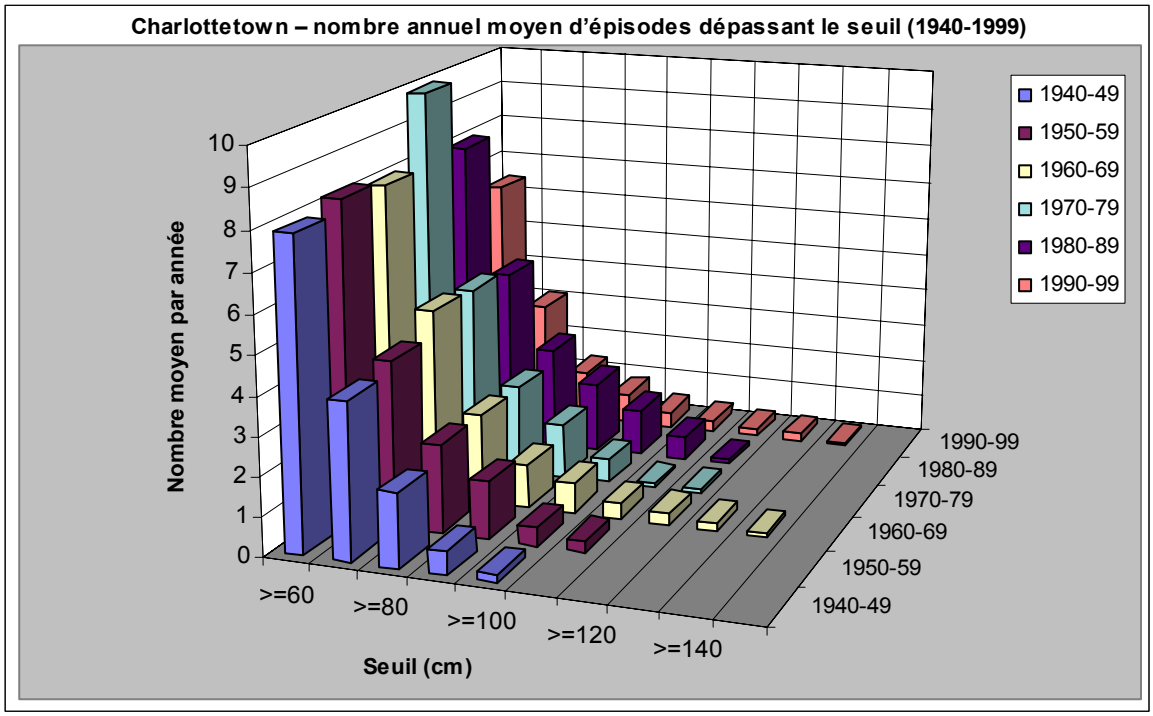


Figure 21. Nombre annuel moyen d'ondes de tempête dépassant certains seuils, par décennie, à Charlottetown.

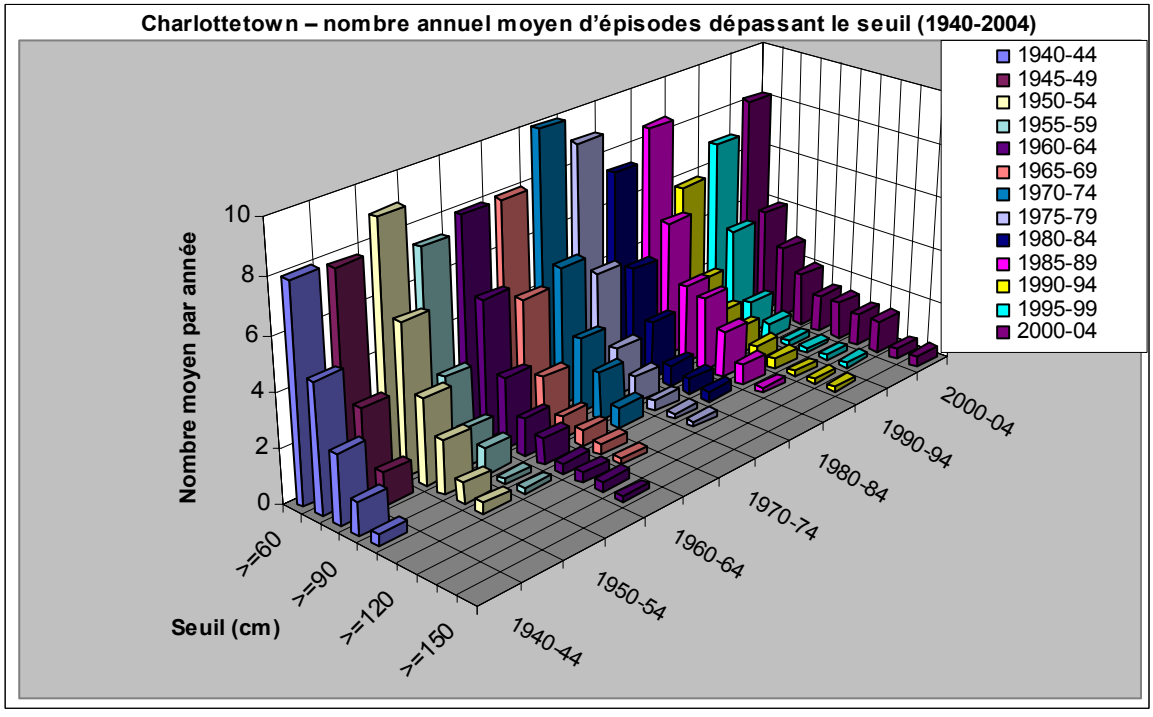


Figure 22. Nombre annuel moyen d'ondes de tempête dépassant certains seuils, par demi-décennie, à Charlottetown**.**

4.2.4.4 Rajustement des niveaux d'eau à l'année 2000

Dans les analyses antérieures, toutes les données sur les niveaux d'eau ont été rajustées à l'année 1977, en présumant une élévation linéaire du niveau de la mer de 32 cm/siècle. Ces données sont maintenant rajustées à l'année 2000 par ajout de 7,36 cm aux valeurs de niveau d'eau (les valeurs des ondes de tempête, étant déjà normalisées, n'ont pas besoin de rajustement supplémentaire). On représente ainsi le niveau approximatif qu'aurait atteint une onde de tempête du passé, si elle était survenue en 2000.

Tous les épisodes d'ondes de tempête observés de 1911 à 2005 (les épisodes interpolés ne sont pas pris en compte) sont présentés dans l'ordre chronologique à la figure 23 et par ordre croissant de niveau d'eau maximum à la figure 24.

Le tableau 1 donne la liste des 10 plus fortes ondes de tempête identifiées dans cette analyse (1911-2005), avec une indication qualitative du moment du cycle de marée auquel est survenue la pointe de l'onde (c.-à-d. à marée haute/basse ou à proximité, etc.). Le tableau donne aussi le niveau d'eau maximum observé pendant l'épisode et le niveau qui aurait été atteint si l'épisode était survenu en 2000. On trouvera au tableau 2 les 10 niveaux d'eau les plus élevés identifiés dans l'analyse (1911-2005) et les 11 niveaux les plus élevés qui auraient été atteints si tous les épisodes étaient survenus en 2000. Les mêmes données sont présentées sous forme graphique aux figures 25 (les dix plus fortes ondes de tempête), 26 (les dix niveaux d'eau les plus élevés) et 27 (les 11 niveaux les plus élevés une fois les données rajustées à l'année 2000).

L'eau commence à inonder le front de mer de Charlottetown à un niveau d'environ 3,6 m au-dessus du zéro des cartes (Webster *et al*., 2002), que ne peut pas atteindre une onde de tempête de moins de 60 cm combinée à la plus haute marée prévue (2,91 m ZC). De tous les épisodes d'ondes de tempête répertoriés sur la période de 1911 à 2005, sept seulement ont atteint ce niveau et ont causé l'inondation du front de mer de Charlottetown. Le niveau d'eau de la tempête du 21 janvier 2000 se situe à 38 cm plus haut que celui de la tempête du 21 janvier 1961 (tempête de l'inauguration du président Kennedy). Quand on prend en compte l'élévation du niveau de la mer, neuf de ces tempêtes auraient causé une certaine inondation du front de mer si elles étaient survenues en 2000, et le niveau de la tempête du 21 janvier 2000 se situe maintenant à seulement 26 cm plus haut que le niveau rajusté de la tempête de l'inauguration de Kennedy. C'est le meilleur exemple que nous puissions trouver dans cet ensemble de données pour illustrer les impacts de l'élévation relative du niveau de la mer sur le risque d'inondation.

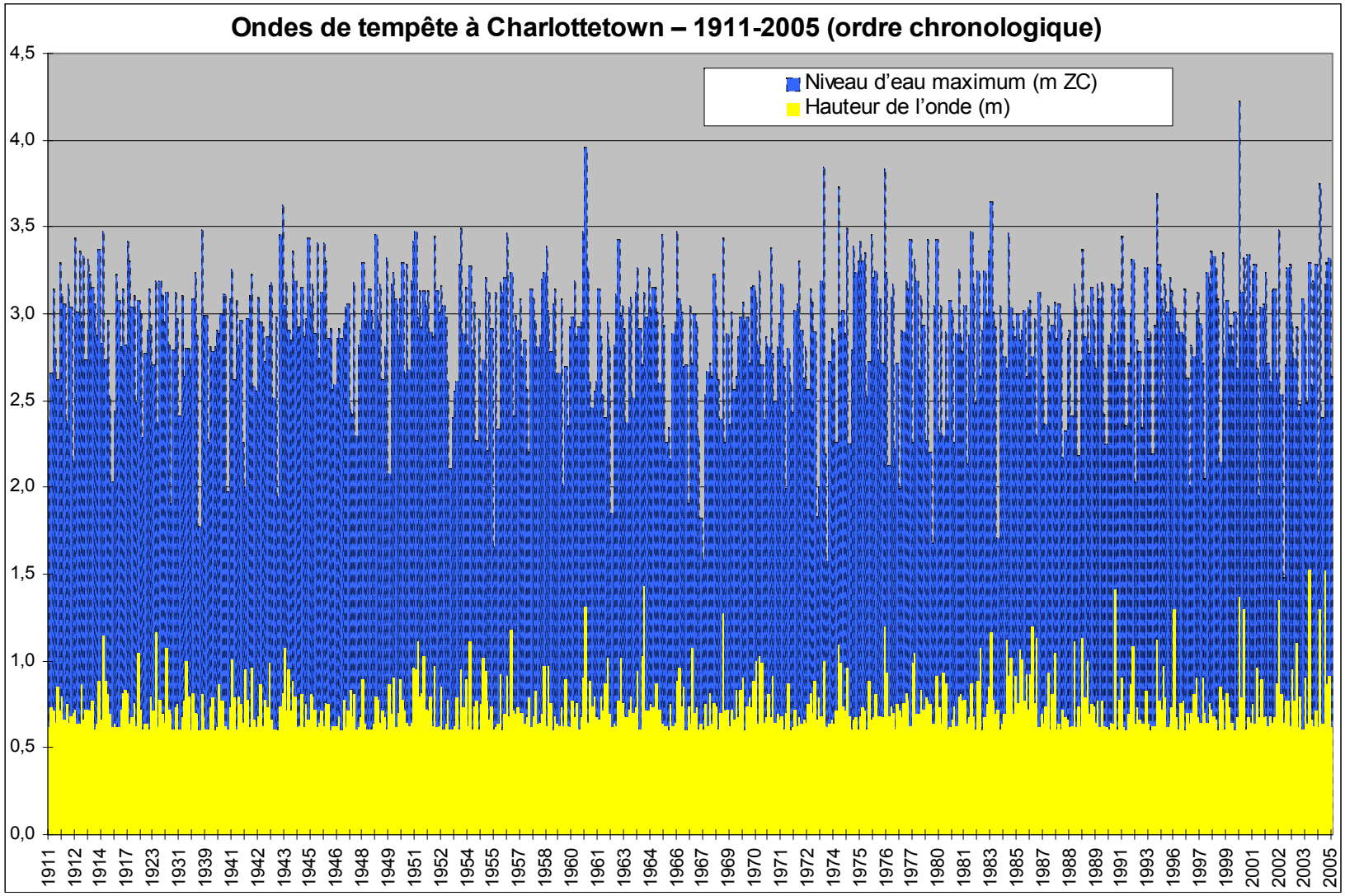


Figure 23. Toutes les ondes de tempête observées à Charlottetown de 1911 à 2005, ramenées à l'année 2000.

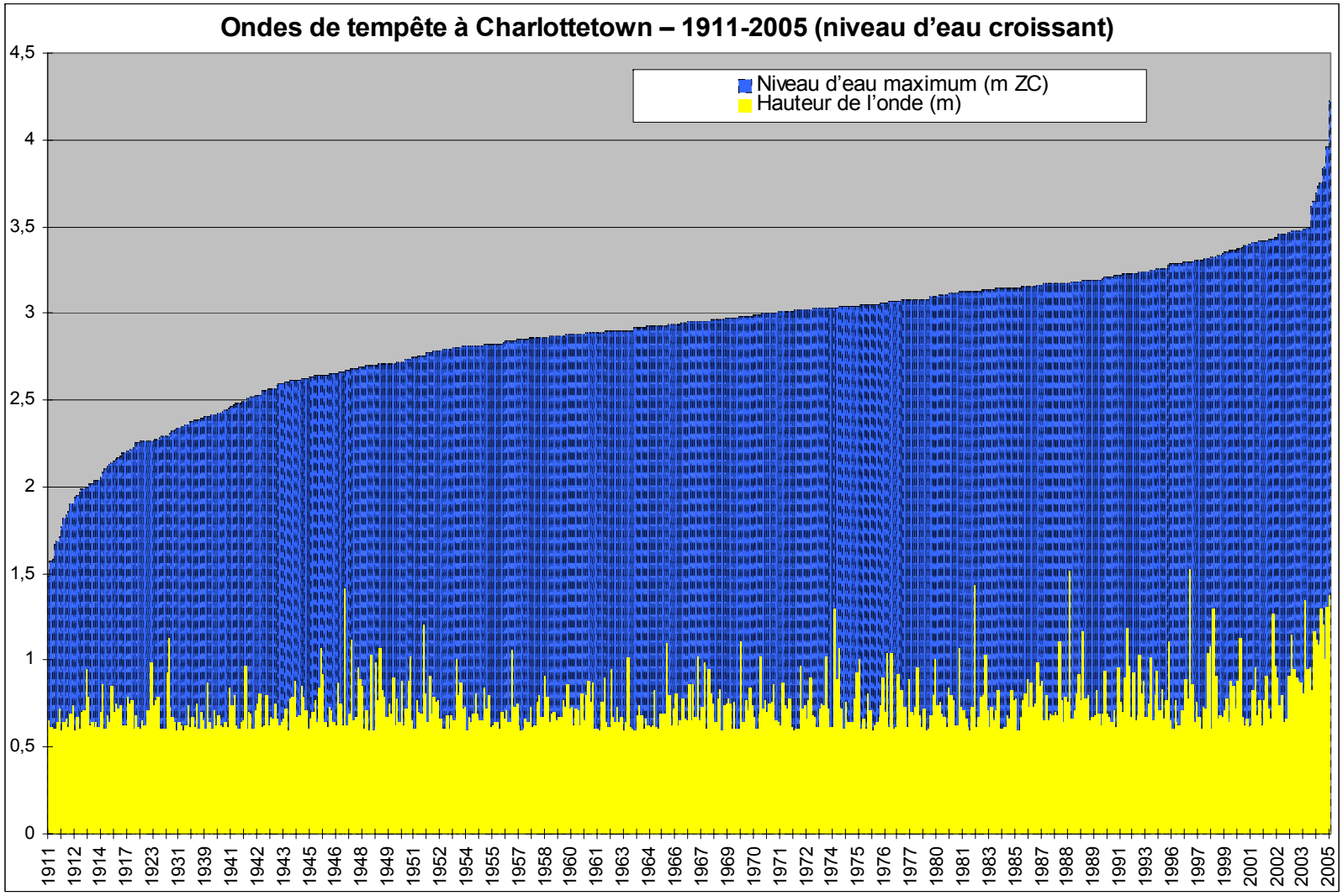


Figure 24. Toutes les ondes de tempête observées à Charlottetown de 1911 à 2005, par ordre de niveau d'eau maximal ramené à l'année 2000.

Tableau 1. Charlottetown – dix plus fortes ondes de tempête.

Dix plus fortes ondes de tempête – Charlottetown – 1911-2005				
Date	Hauteur de l'onde de tempête	Niveau d'eau maximum observé	Niveau d'eau maximum (2000)	Moment du cycle de la marée
17 janv. 2004	1,53	3,31	3,29	Basse
27 déc. 2004	1,52	3,19	3,17	Basse
19 déc. 1963	1,43	3,01	3,12	Basse
12 mars 1991	1,41	2,63	2,66	Basse
21 janv. 2000	1,37	4,22	4,22	Haute
12 sept. 2002	1,35	3,49	3,48	Milieu du cycle
21 janv. 1961	1,31	3,84	3,96	Presque haute
15 janv. 1996	1,30	3,02	3,03	Milieu du cycle
29 oct. 2000	1,30	3,33	3,32	Basse
19 févr. 2004	1,30	3,77	3,75	Haute

Tableau 2. Charlottetown – dix niveaux d'eau les plus élevés

Dix niveaux d'eau les plus élevés – Charlottetown – 1911 à 2005					
par niveau d'eau observé (m ZC)			par niveau d'eau ramené à 2000 (m ZC)		
Date	Niveau d'eau maximum observé	Hauteur de l'onde de tempête	Date	Niveau d'eau maximum (2000)	Hauteur de l'onde de tempête
21 janv. 2000	4,22	1,37	21 janv. 2000	4,22	1,37
21 janv. 1961	3,84	1,31	21 janv. 1961	3,96	1,31
19 févr.2004	3,77	1,30	21 janv. 1973	3,84	1,00
21 janv. 1973	3,76	1,00	17 mars 1976	3,83	1,20
17 mars 1976	3,76	1,20	19 févr.2004	3,75	1,30
30 déc. 1993	3,67	1,12	05 févr. 1974	3,73	1,09
05 févr. 1974	3,65	1,09	30 déc. 1993	3,69	1,12
25 déc. 1983	3,59	1,17	25 déc. 1983	3,64	1,17
12 sept. 2002	3,49	1,35	01 déc. 1943	3,62	0,82
01 déc. 1943	3,44	0,82	12 janv. 1954	3,49	0,95
			20 oct. 1974	3,49	0,96

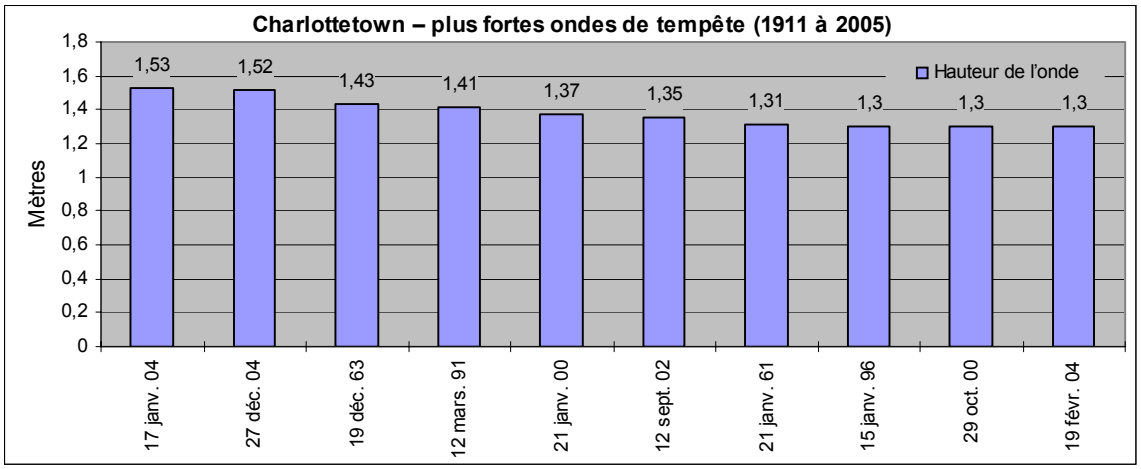


Figure 25. Les dix plus fortes ondes de tempête à Charlottetown.

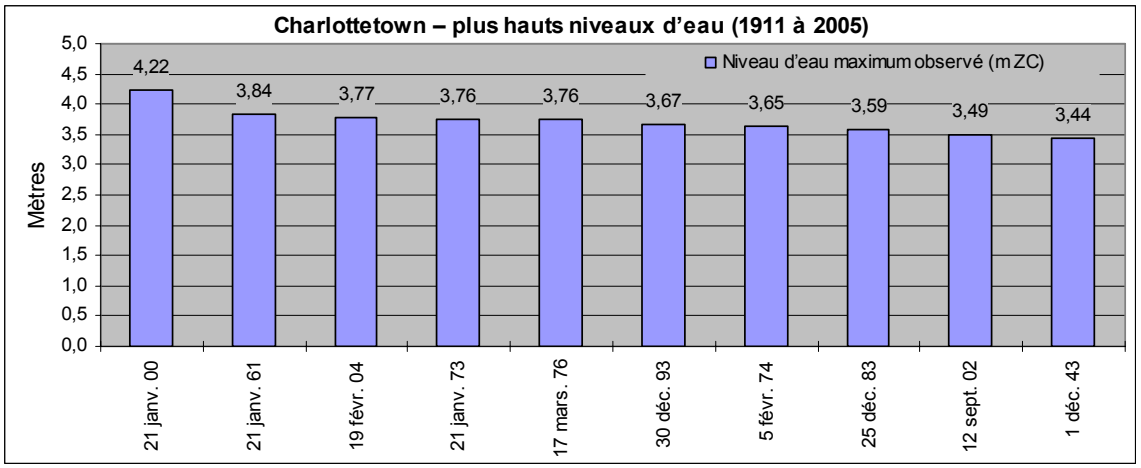


Figure 26. Les dix niveaux d'eau les plus élevés observés à Charlottetown.

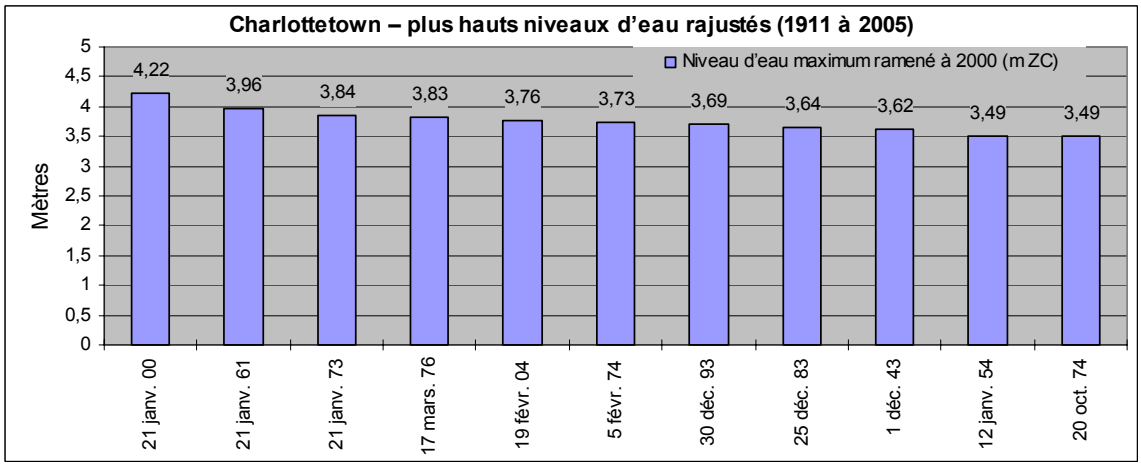


Figure 27. Les 11 niveaux d'eau les plus élevés à Charlottetown (ramenés à l'année 2000).

Dans le document scientifique 6 du rapport sur l'élévation du niveau de la mer dans l'Île-du-Prince-Édouard (Thompson *et al.* 2002), une analyse extrêmale des niveaux d'eau à Charlottetown avait été développée pour estimer les périodes de récurrence des niveaux d'eau extrêmes. Les changements de la probabilité d'inondation étaient ensuite examinés dans des scénarios plausibles de changement climatique. Dans l'avenir, non seulement il y aura des inondations aux niveaux les plus élevés, mais les inondations à un niveau donné seront plus fréquentes. Le 6 novembre 1994, un niveau d'eau de 3,42 m ZC a été atteint à Charlottetown quand une onde de tempête de 51 cm est entrée en phase avec une des marées astronomiques les plus élevées possible (prévue à 2,86 m ZC). Pour faire la preuve du potentiel d'augmentation de fréquence des inondations, il ne suffit pas de prendre en compte les épisodes d'ondes de tempête; il faut aussi regarder les dépassements du niveau d'eau. Nos données sur les niveaux d'eau de 1960 à 2005 (46 ans) couvrent deux modulations nodales du cycle de la marée (18,6 ans) avec une lacune totale d'environ 2,68 années de données. Les épisodes interpolés d'ondes de tempête permettent d'examiner la probabilité de dépassements manqués de plus de 3,6 m ZC, puisque ce niveau exigerait une onde de tempête d'au moins 60 cm. Il n'y a eu aucun dépassement manqué de ce genre. Le nombre de niveaux d'eau observés qui ont franchi les divers seuils durant cette période figure au tableau 3 (colonne 2). Les dépassements de 3,2-3,5 m CD sont ajustés directement pour tenir compte des données manquantes de cette période dans la colonne 3. On remarquera la forte augmentation de la fréquence des dépassements aux niveaux les plus bas. La colonne 5 montre la fréquence des dépassements aux environs de l'année 2100, en supposant que la climatologie des tempêtes reste la même et que l'élévation relative du niveau de la mer se maintienne à 30 cm/siècle (à peu près son taux actuel). Alors que, à l'heure actuelle, on peut s'attendre à un dépassement de 3,6 m ZC à peu près tous les 6 ans, en 2100 on peut s'attendre à ce qu'il y en ait en moyenne un par an, avec, une fois tous les 10 ans environ, un épisode dépassant 4,0 ou 4,1 m ZC. Le niveau d'eau de 4,22 m ZC qui a été observé le 21 janvier 2000 arriverait à 4,52 m ZC. Le tableau 3 montre que, avec l'élévation du niveau de la mer et le réchauffement planétaire, non seulement les inondations atteindront des niveaux plus élevés, mais aussi les inondations des plus bas niveaux deviendront beaucoup plus fréquentes.

Tableau 3. Fréquence annuelle moyenne des dépassements du niveau de l'eau à Charlottetown en 2000 (d'après les données de niveau d'eau de 1960-2005) et en 2100 (en supposant que la climatologie des tempêtes et le taux d'élévation du niveau de la mer restent les mêmes).

Charlottetown				
Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3	Colonne 4	Colonne 5
Niveau (ZC)	Nombre d'épisodes en 1960-1998 (données rajustées à l'année 2000) dépassant le seuil	Colonne 2 ajustée pour tenir compte des données manquantes	Nombre annuel moyen d'épisodes dépassant le seuil (année 2000)	Nombre annuel moyen d'épisodes dépassant le seuil (année 2100)
≥3,2	101	107	2,35	?
≥3,3	43	46	1,01	?
≥3,4	22	23	0,51	?
≥3,5	8	9	0,20	2,35
≥3,6	8	8	0,17	1,01
≥3,7	6	6	0,13	0,51
≥3,8	4	4	0,09	0,20
≥3,9	2	2	0,04	0,17
≥4,0	1	1	0,02	0,13
≥4,1	1	1	0,02	0,09
≥4,2	1	1	0,02	0,04
≥4,3	0	0	0	0,02
≥4,4	0	0	0	0,02
≥4,5	0	0	0	0,02

4.2.5 Les ondes de tempête à Pointe-du-Chêne et à Escuminac

4.2.5.1 Ajustement de l'ensemble de données pour Pointe-du-Chêne

Les données pour Pointe-du-Chêne sont disponibles pour les années 1971 à 1992, et pour la période allant de 2003 au 31 octobre 2005. Les moyennes annuelles et mensuelles à Pointe-du-Chêne figurent dans le graphique de la section 4.1 du présent, document pour lesquelles une tendance linéaire de 25-30 cm/siècle a été calculée.

Les données observées du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne ont donc été corrigées pour tenir compte de l'élévation relative du niveau de la mer à raison de 25 cm/siècle, tout comme pour les données de Charlottetown, c.-à-d. à partir de 1977. Les épisodes d'ondes de tempête ont ensuite été extraits selon la même procédure que pour Charlottetown. En tout, 232 ondes de tempête présentant un différentiel supérieur à 60 cm ont été répertoriées; elles figurent en ordre chronologique à la figure 28, par hauteur croissante de l'onde de tempête à la figure 29, et par niveau d'eau maximum croissant à la figure 30. Le niveau d'eau associé à la tempête du 21 janvier 2000 n'a pas été mesuré par un marégraphe, mais on l'a inclus dans ces graphiques. Ce niveau a été mesuré par Donald Forbes, peu après l'épisode. Comme il constitue un niveau de

référence dans l'historique des inondations dans cette région, sa valeur est utilisée dans ce rapport et dans le projet. L'inondation a atteint le niveau de 3,62 m ZC. Après correction, cela équivaut à un niveau de 3,56 m ZC en 1977. La marée pour cet après-midi-là était prévue à 1,56 m ZC, ce qui donne une valeur de 2,06 m pour l'onde de tempête.

Tous les épisodes d'ondes de tempête sont présentés à la figure 31, pour des différentiels supérieurs à 60, 90, 120 et 150 cm, ainsi que le pourcentage de données manquantes pour chaque année. Ces valeurs représentent toutes les ondes de tempête observées de 60 cm ou plus, dans l'inventaire des données sur le niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne.

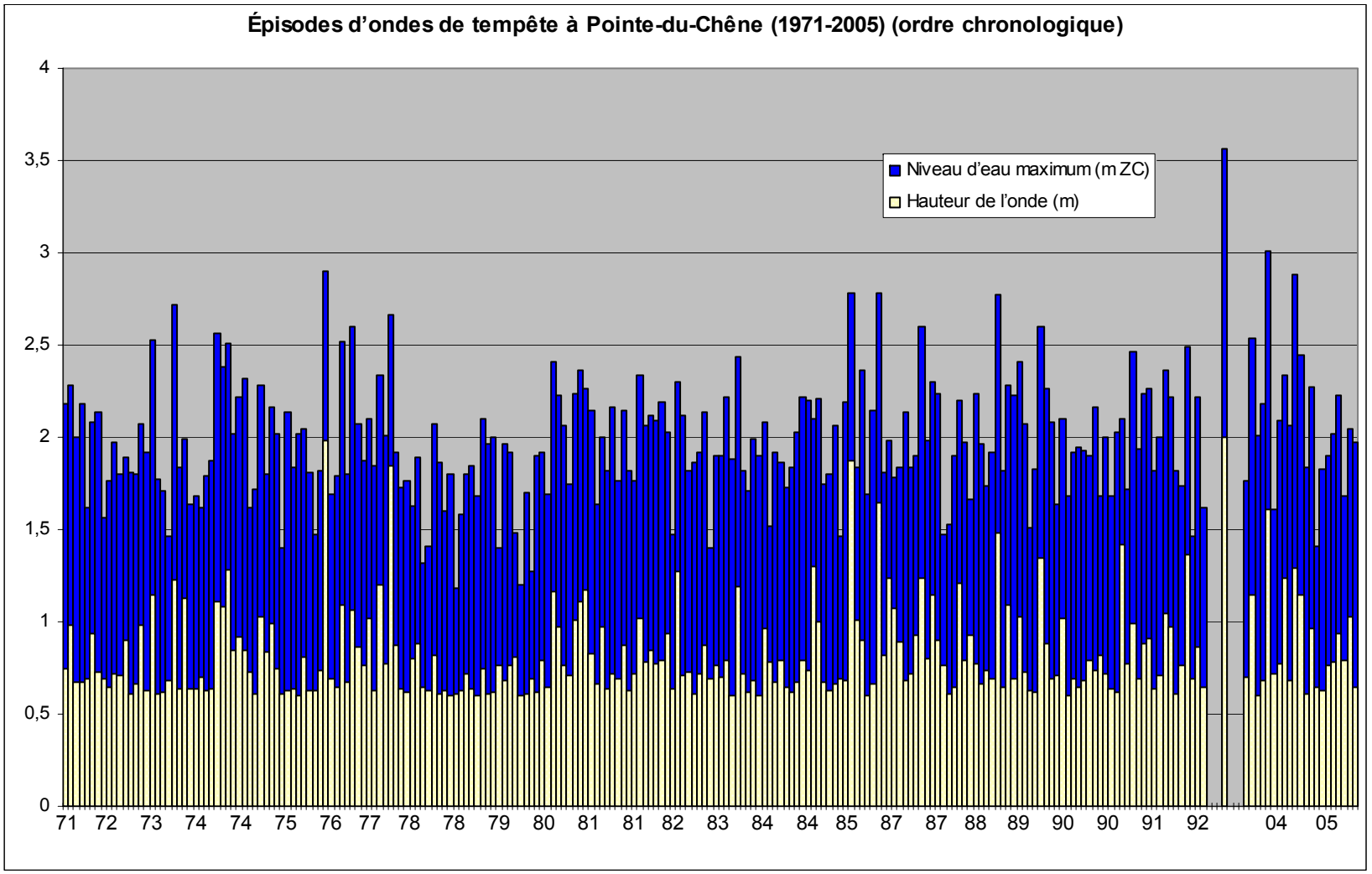


Figure 28. Toutes les ondes de tempête observées à Pointe-du-Chêne (> 60 cm) (1971-2005), en ordre chronologique.

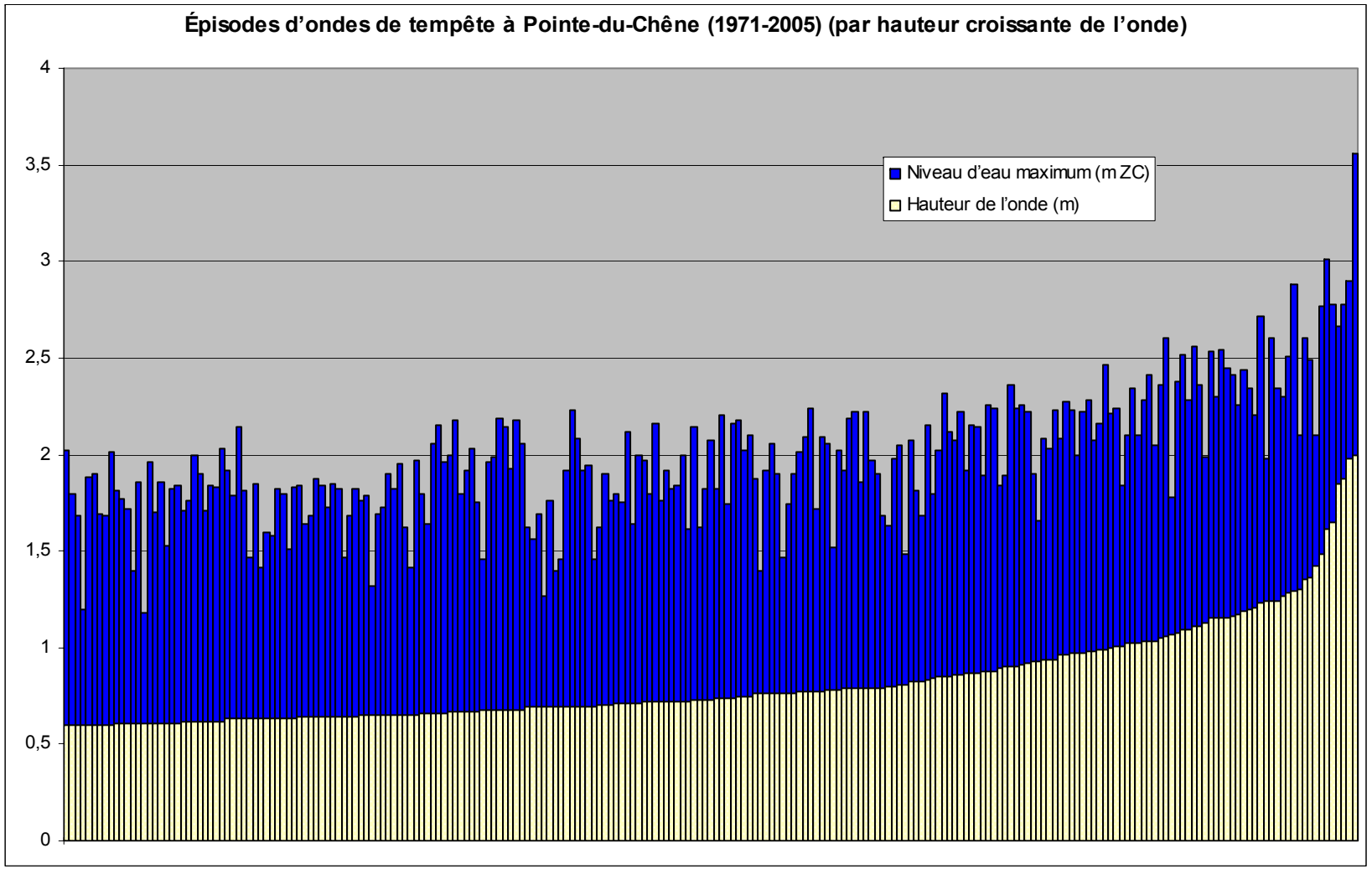


Figure 29. Toutes les ondes de tempête observées à Pointe-du-Chêne (> 60 cm) (1971-2005), par hauteur croissante de l'onde.

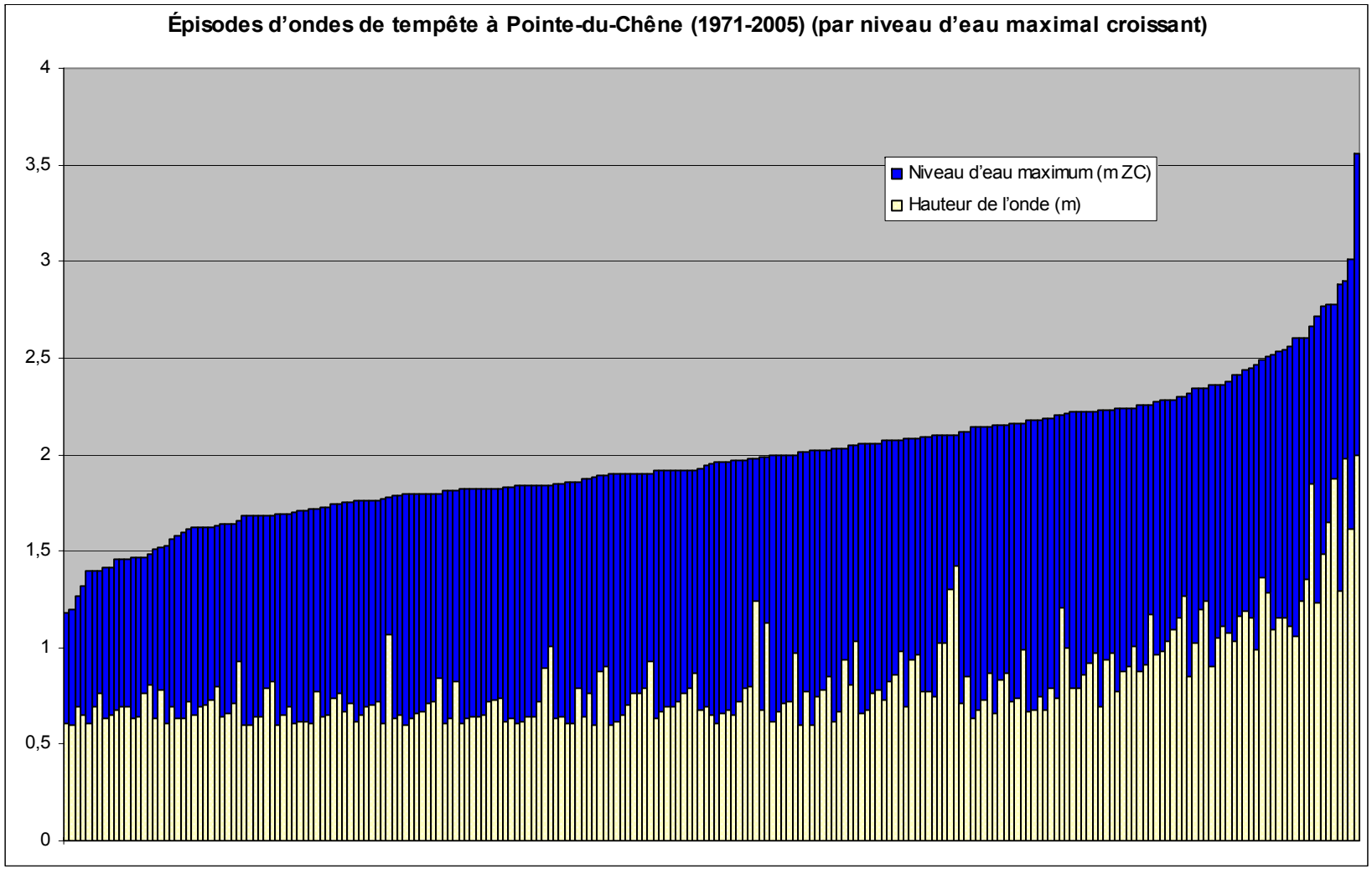


Figure 30. Toutes les ondes de tempête observées à Pointe-du-Chêne (> 60 cm) (1971-2005), par niveau d'eau maximum croissant.

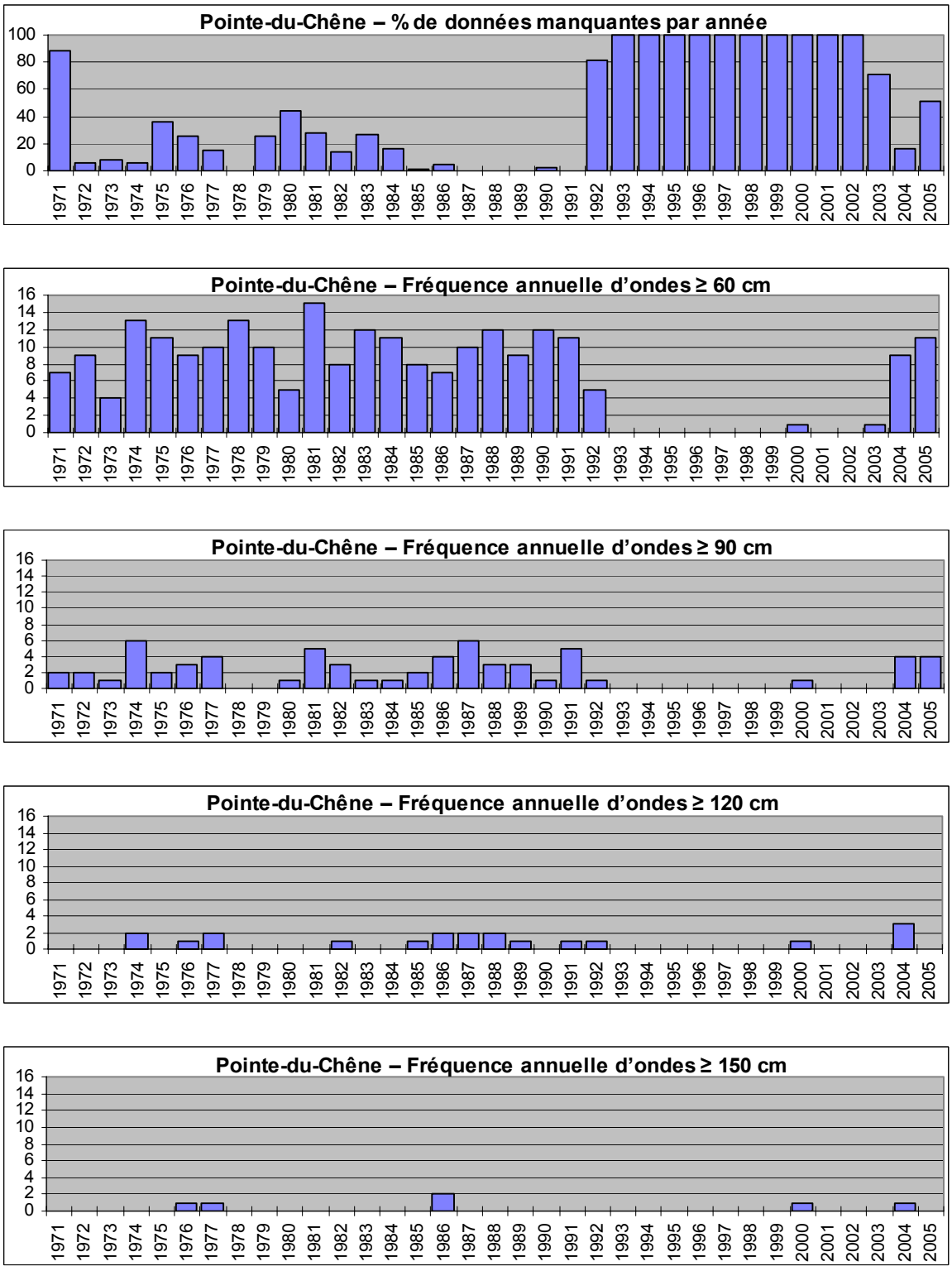


Figure 31. Ondes de tempête supérieures à 60, 90,120 et 150 cm, et graphique des données manquantes.

4.2.5.2 Correction de l'ensemble de données pour Escuminac et Pointe-Sapin

Les données pour Escuminac sont disponibles de janvier 1973 à octobre 2005. Les moyennes annuelles et mensuelles à Pointe-du-Chêne figurent dans le graphique de la section 4.1 du présent document, pour lesquelles une tendance linéaire de 20-23 cm/siècle a été calculée.

Les données observées sur le niveau de la mer à Escuminac ont donc été corrigées pour tenir compte de l'élévation relative du niveau de la mer à raison de 20 cm/siècle, tout comme pour les données de Charlottetown, c.-à-d. à partir de 1977. Les épisodes d'ondes de tempête ont ensuite été extraits selon la même procédure que pour Charlottetown. En tout, 211 ondes de tempête présentant un différentiel supérieur à 60 cm ont été répertoriées.

Les données pour Pointe-Sapin sont disponibles pour la période de janvier 1963 à septembre 1975; et chevauchent celles d'Escuminac pour la période de janvier 1973 à septembre 1975. Les deux sites sont relativement proches l'un de l'autre. Dans cette analyse, les données pour Pointe-Sapin avant 1973 sont annexées à l'ensemble de données d'Escuminac. Quand les marées prévues pour Escuminac sont soustraites des données de Pointe-Sapin, les différentiels résultants contiennent un petit peu plus de bruit que ceux d'Escuminac, mais il y a néanmoins d'un bon ajustement.

Une erreur d'environ 17,89 cm a été relevée dans les données de Pointe-Sapin avant août 1971. Cette erreur a depuis été confirmée par le SDMM, qui signale avoir trouvé des documents selon lesquels un ajustement au niveau de base (BM TS5 1962) de 18,2 cm avait été apporté le 14 septembre 1971. Dans cette analyse, nous avons par conséquent réduit de 18 cm les données pour Pointe-Sapin antérieures à septembre 1971. Toute la base de données a ensuite été ajustée de 20 cm/siècle à partir de 1977. Les épisodes d'ondes de tempête ont ensuite été extraits selon la même procédure que pour Charlottetown. En tout, 64 épisodes d'ondes de tempête supérieurs à 60 cm ont été répertoriés. De plus, on a recherché dans les données pour Pointe-Sapin pour juillet et août 1974 les épisodes d'ondes de tempête, car ces données étaient manquantes pour Escuminac. Toutefois, aucun épisode n'a été trouvé.

Les épisodes d'ondes de tempête pour Pointe-Sapin et Escuminac sont présentés en ordre chronologique à la figure 32. La brisure dans les données correspond au changement de site. Les épisodes sont présentés par hauteur croissante de l'onde à la figure 33, et par niveau d'eau maximum croissant à la figure 34. Le niveau d'eau associé à la tempête du 21 janvier 2000 est absent de ces données, et n'a pas été saisi par les données obtenues sur le terrain. Toutefois, des rapports anecdotiques pour cette région attestent qu'il était plus élevé que les autres niveaux observés de mémoire d'homme.

Tous les épisodes d'ondes de tempête sont présentés à la figure 35, pour des différentiels supérieurs à 60, 90, 120 et 150 cm, ainsi que le pourcentage de données manquantes pour chaque année. Ces valeurs représentent toutes les ondes de tempête observées de 60 cm ou plus figurant dans l'inventaire des données sur le niveau de l'eau à Pointe-Sapin et Escuminac.

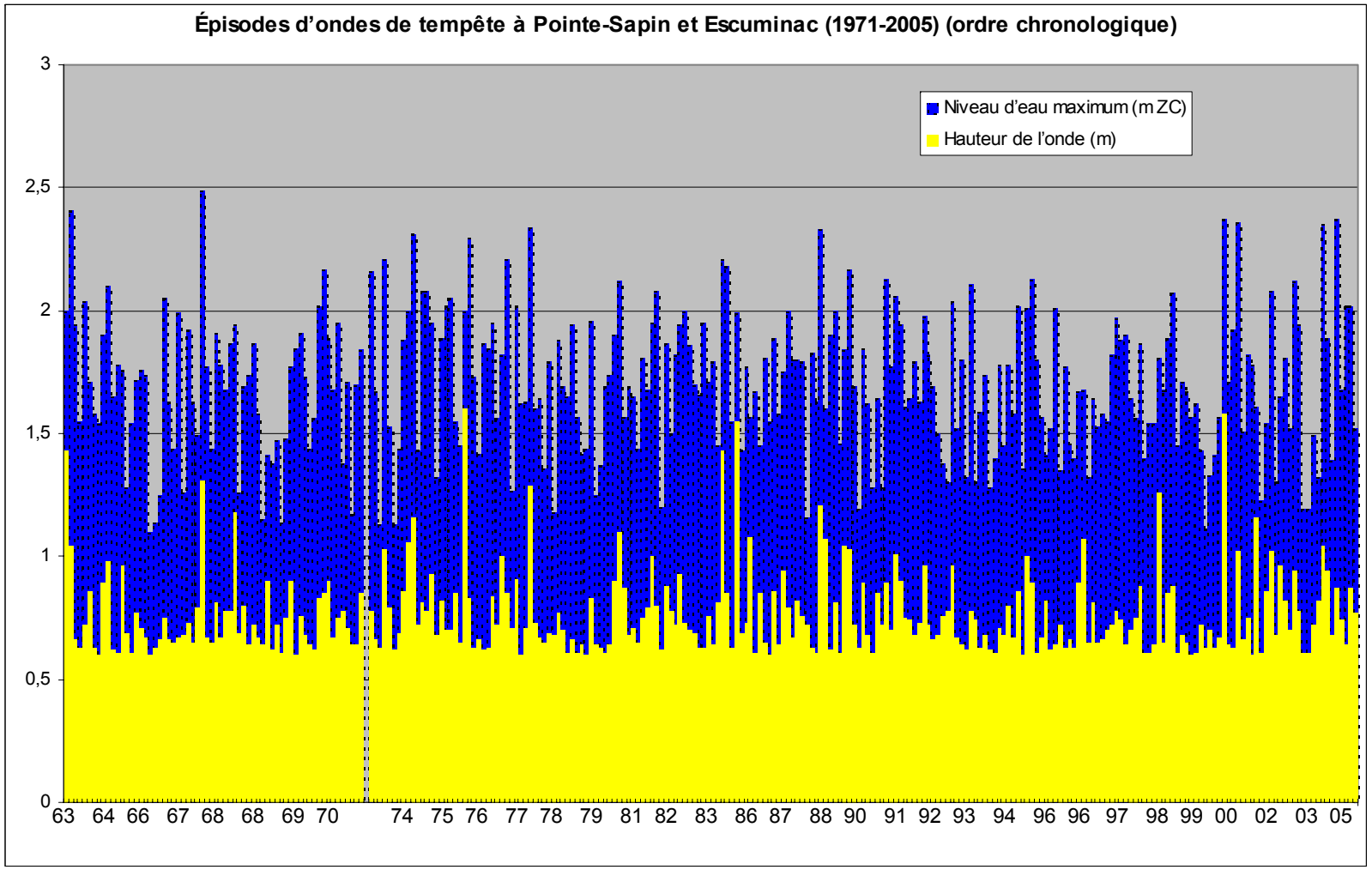


Figure 32. Toutes les ondes de tempête observées à Pointe-Sapin et à Escuminac (> 60 cm) (1963-2005), en ordre chronologique.

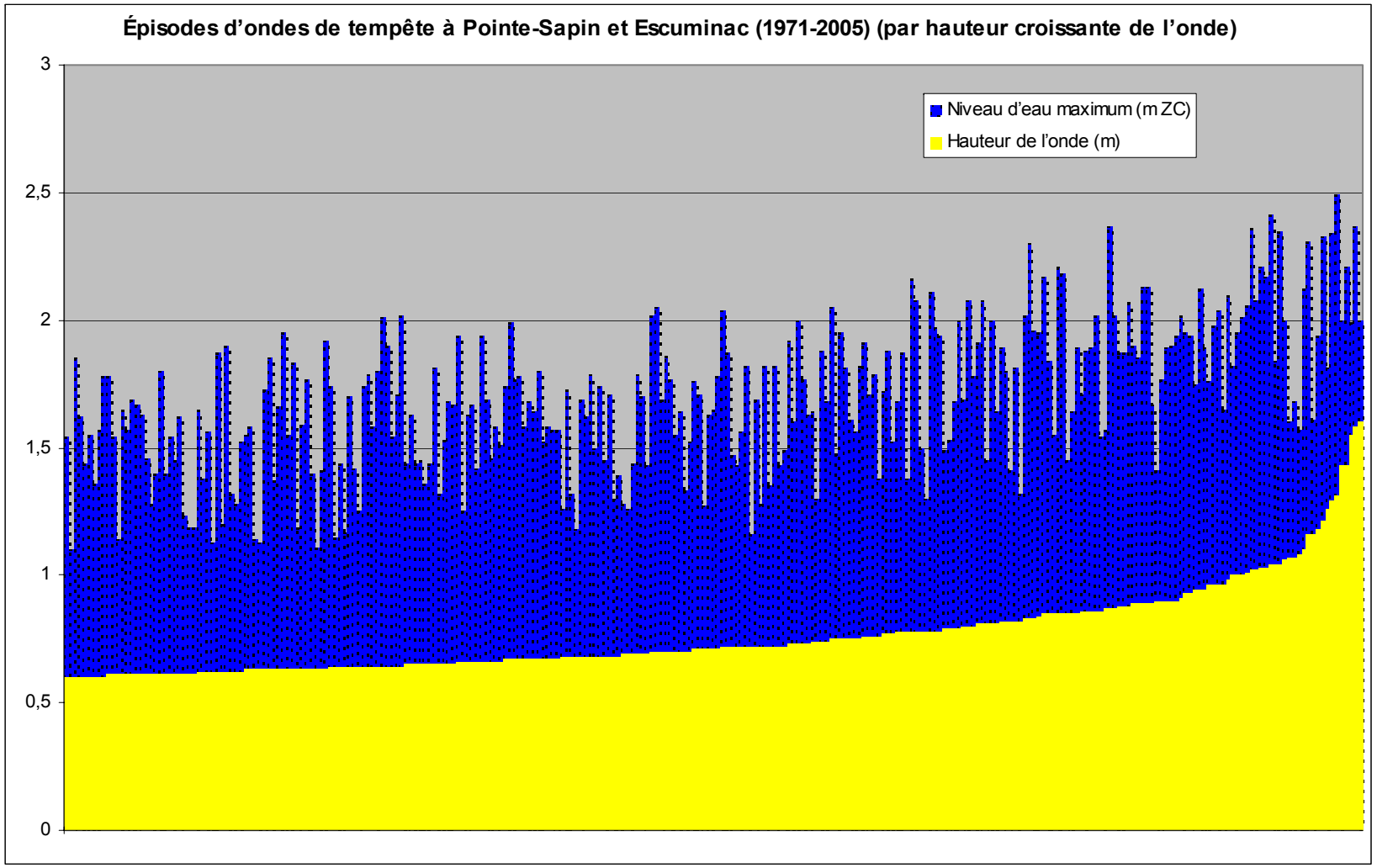


Figure 33. Toutes les ondes de tempête observées à Pointe-Sapin et à Escuminac (> 60 cm) (1963-2005), par hauteur croissante de l'onde.

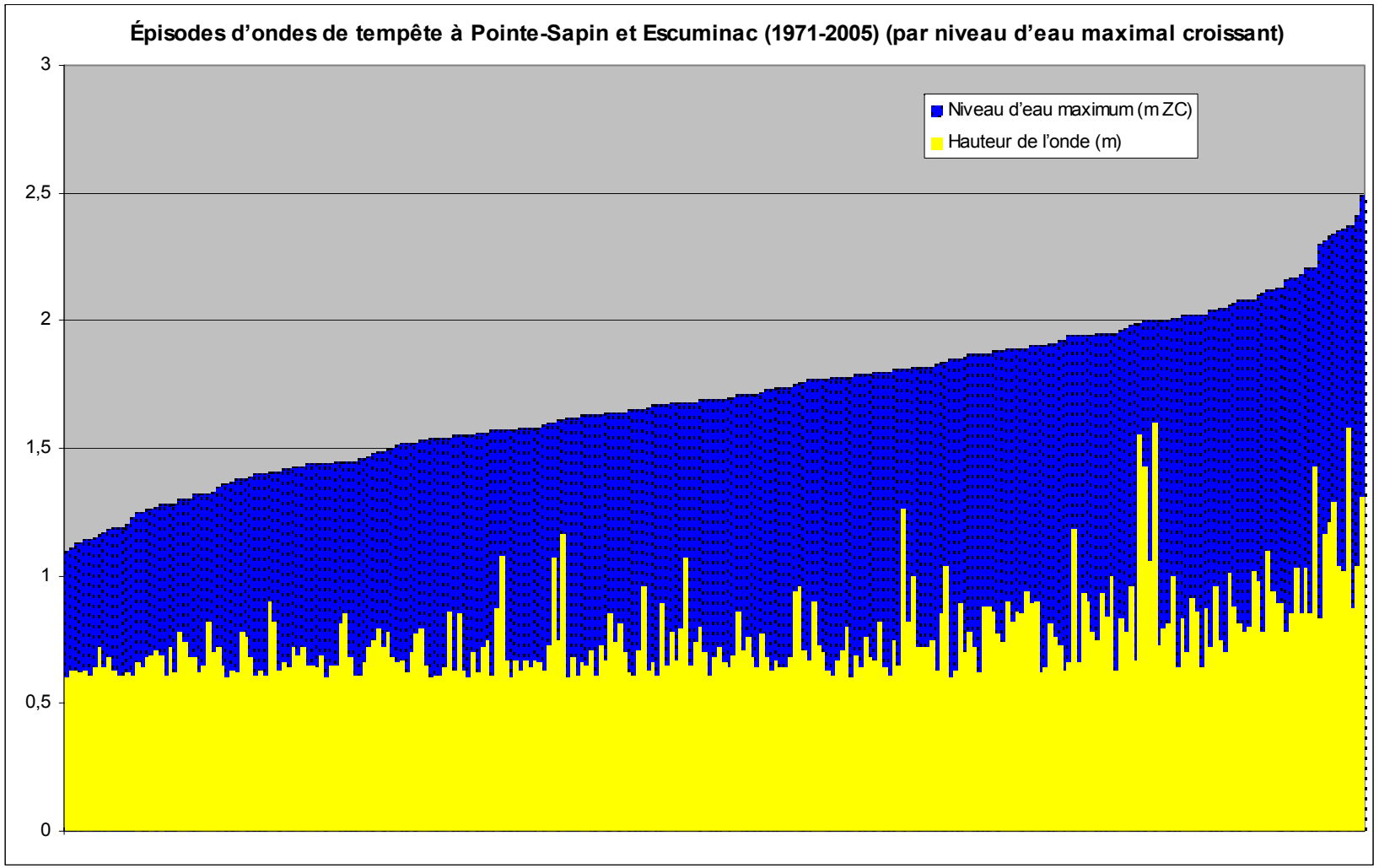


Figure 34. Toutes les ondes de tempête observées à Pointe-Sapin et à Escuminac (> 60 cm) (1963-2005), par niveau d'eau maximum croissant.

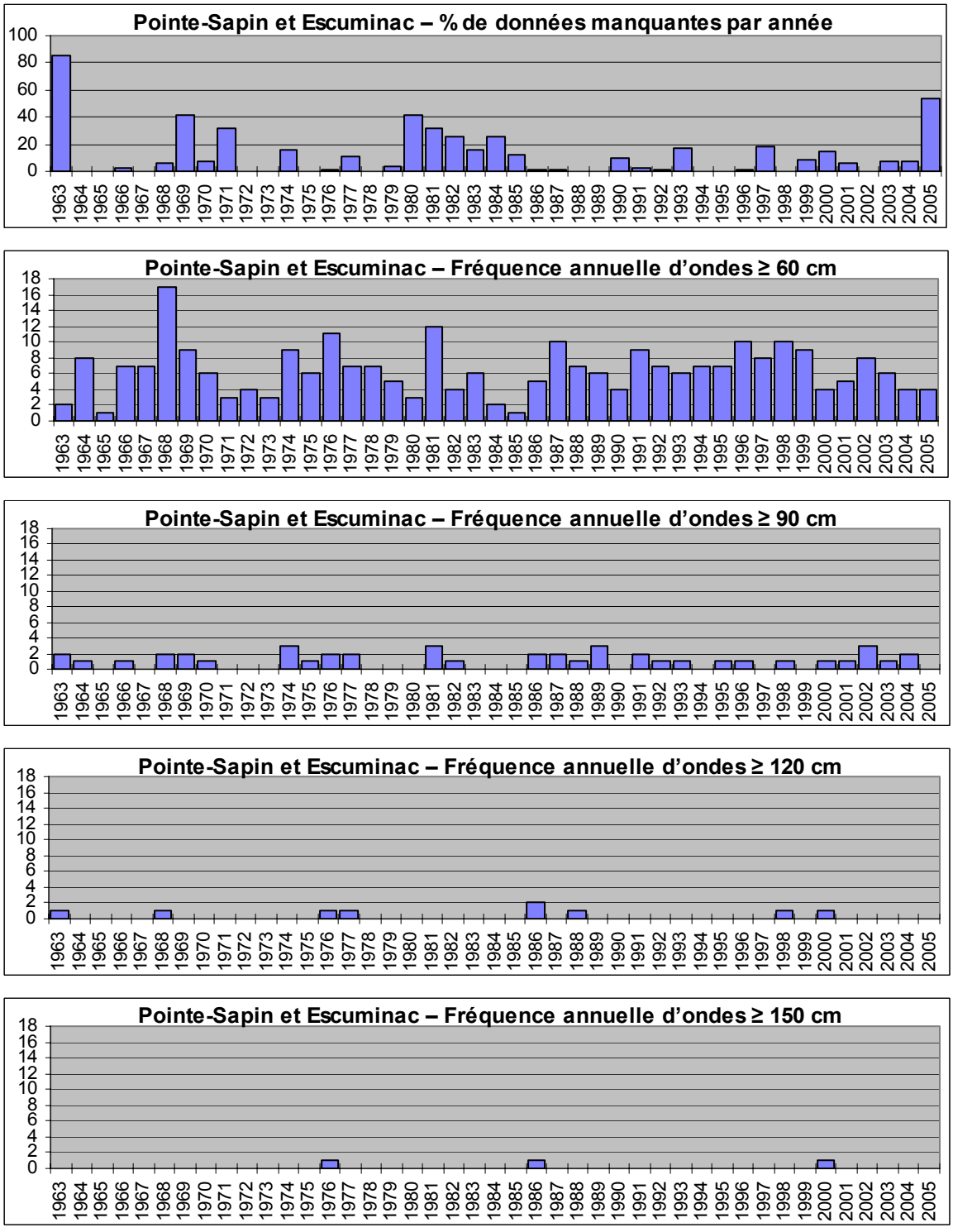


Figure 35. Ondes de tempête supérieures à 60, 90,120 et 150 cm, et graphique des données manquantes.

4.2.6 Climatologie des ondes de tempête à Pointe-du-Chêne et à Escuminac

Les années pour lesquelles il y a moins de 20 % de données manquantes à Pointe-du-Chêne ont été choisies pour représenter la climatologie des ondes de tempête dans cette région. Pour 11 de ces 15 années, il y a moins de 10 % de données manquantes. Pour les quatre autres années (1977, 1982, 1984 et 2004), la majorité des données manquantes se trouvent durant les mois cléments de l'année, plutôt qu'en automne et en hiver. Le nombre moyen d'épisodes par année au-dessus des seuils est illustré aux figures 36 et 37 ci-dessous.

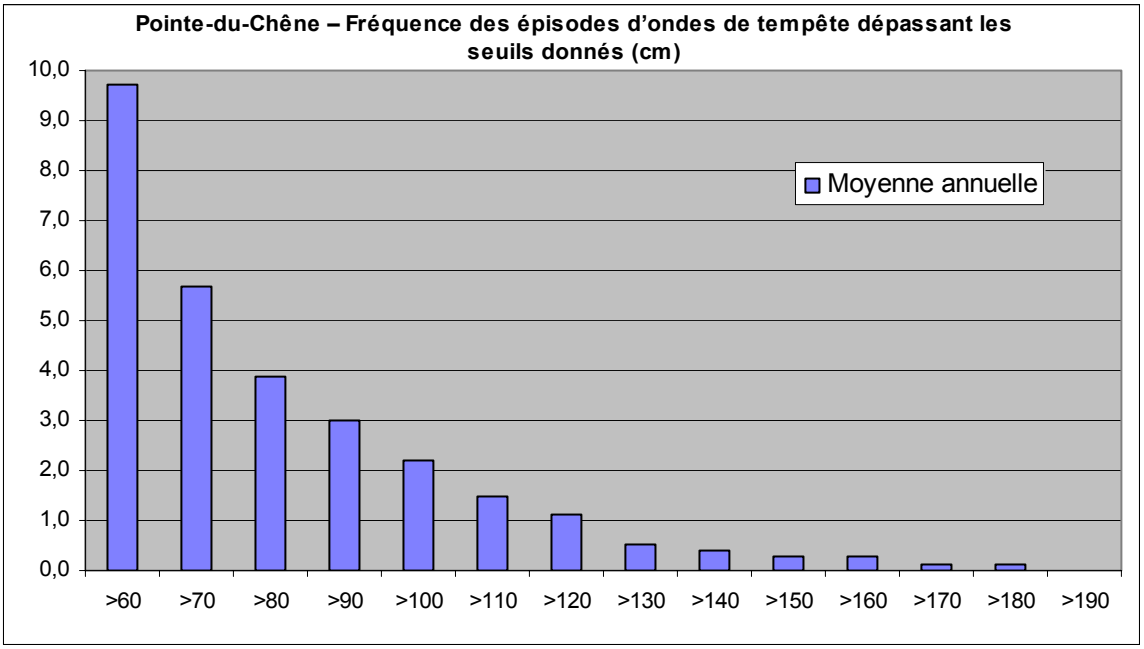


Figure 36. Nombre annuel moyen d'ondes de tempête dépassant divers seuils à Pointe-du-Chêne.

Les années pour lesquelles il y a moins de 10 % de données de niveau d'eau manquantes à Escuminac et à Pointe-Sapin ont été choisies pour représenter la climatologie des ondes de tempête dans cette région. Pour 20 de ces 28 années, il y a moins de 5 % de données manquantes. Le nombre moyen d'épisodes par année au-dessus des divers seuils est illustré à la figure 37 ci-dessous.

La distribution des épisodes d'ondes de tempête pendant ces années choisies est présentée par seuils et par mois à la figure 38 pour Pointe-du-Chêne, et à la figure 39 pour Escuminac et Pointe-Sapin. Ces figures présentent le nombre d'ondes de tempête pour chaque mois, et le pourcentage du nombre total d'épisodes survenus pendant chaque mois.

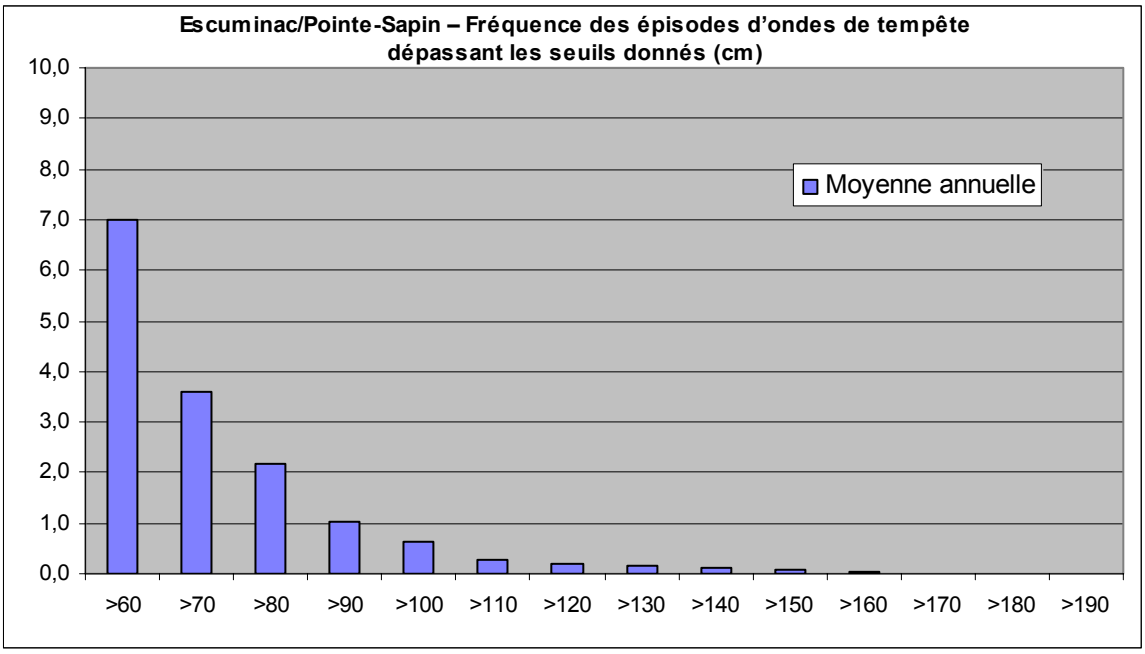


Figure 37. Nombre annuel moyen d'ondes de tempête dépassant divers seuils à Escuminac.

Les ondes de tempête à Escuminac-Pointe-Sapin sont similaires en fréquence, en distribution et en taille à celles de Charlottetown (voir la figure 8 pour la période de 1960-2004). En moyenne, on compte chaque année environ 7 épisodes qui dépassent le seuil de 60 cm, et environ un au-dessus de 100 cm. On constate une grande variabilité de la fréquence d'une année à l'autre, sans tendance manifeste discernable. Sur la période de 1963 à 2005, on a répertorié 9 ondes de tempête dépassant 120 cm à Escuminac-Pointe-Sapin, par rapport à 13 épisodes de même nature à Charlottetown pour la période 1960-2005. Les ondes de tempête très fortes sont peut-être un peu plus fréquentes, 3 épisodes de plus de 150 cm ayant été répertoriés à Escuminac (même en l'absence de la tempête du 21 janvier 2000), contre deux à Charlottetown. La plus forte onde de tempête observée avait une hauteur de 160 cm, le 17 mars 1976. Ces ondes de tempête sont principalement associées à la période de tempête, soit à la fin de l'automne et en hiver. Les statistiques montrent une augmentation de la fréquence en octobre et en novembre, l'activité étant maximale en décembre et en janvier. La fréquence diminue de manière notable en avril, et il y a peu d'occurrences entre mai et septembre.

Les ondes de tempête à Pointe-du-Chêne sont plus importantes et plus fréquentes qu'à Escuminac ou à Charlottetown, bien que leur distribution sur l'année soit évidemment similaire, car elles sont provoquées par les mêmes tempêtes. On répertorie en moyenne chaque année 10 épisodes dépassant 60 cm, et 2 à 3 épisodes en moyenne de plus de 100 cm. Les ondes de tempête supérieures à 150 cm se produisent tous les 2 ou 3 ans, et quelques ondes de tempête atteignant 200 cm ont été répertoriées (198 cm le 17 mars 1976, et 200 cm le 21 janvier 2000), ce qui représente les plus importantes ondes de tempête jamais observées au Canada atlantique, à la connaissance des auteurs.

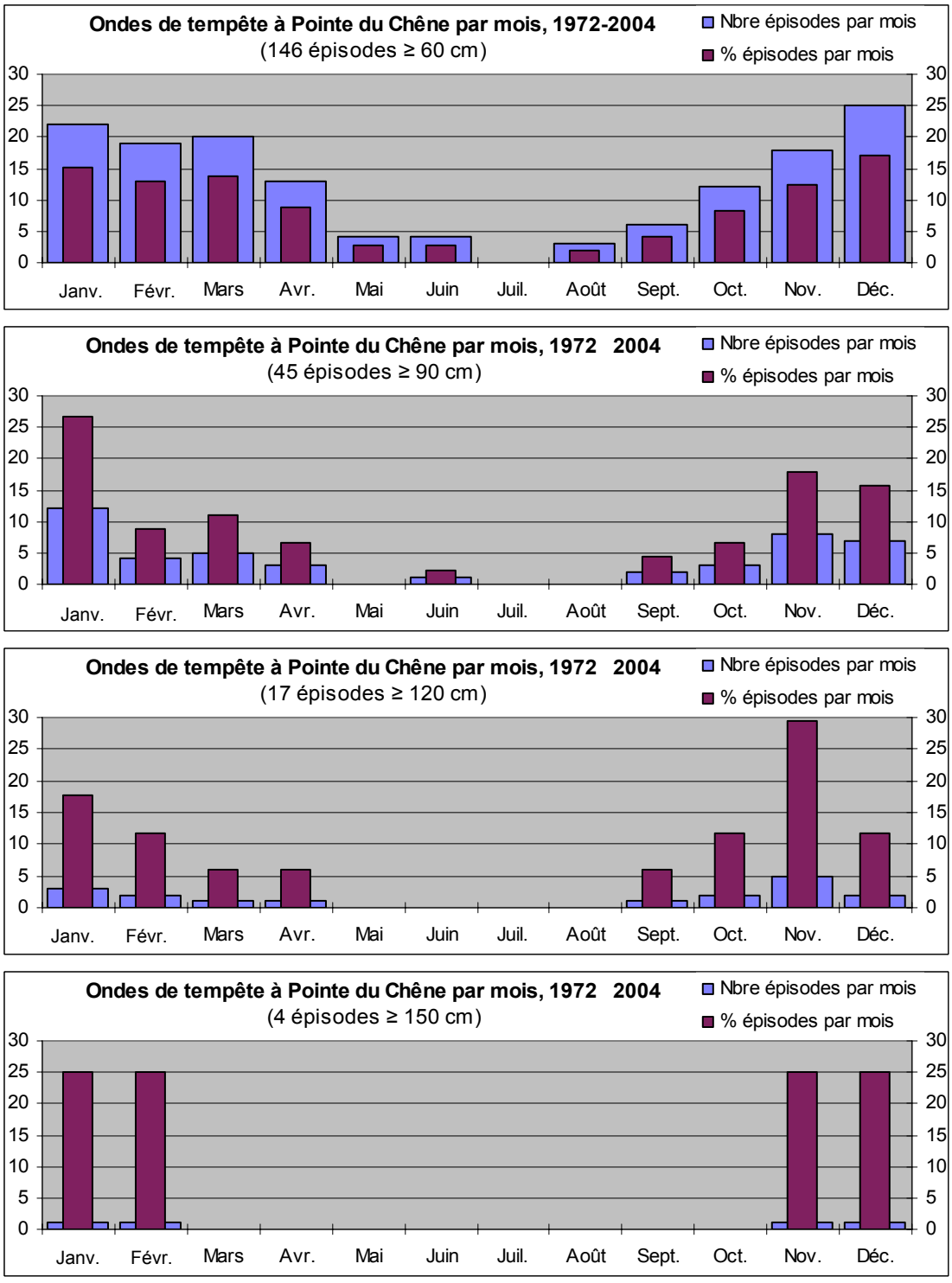


Figure 38. Ondes de tempête supérieures à 60, 90, 120 et 150 cm, par mois, à Pointe-du-Chêne.

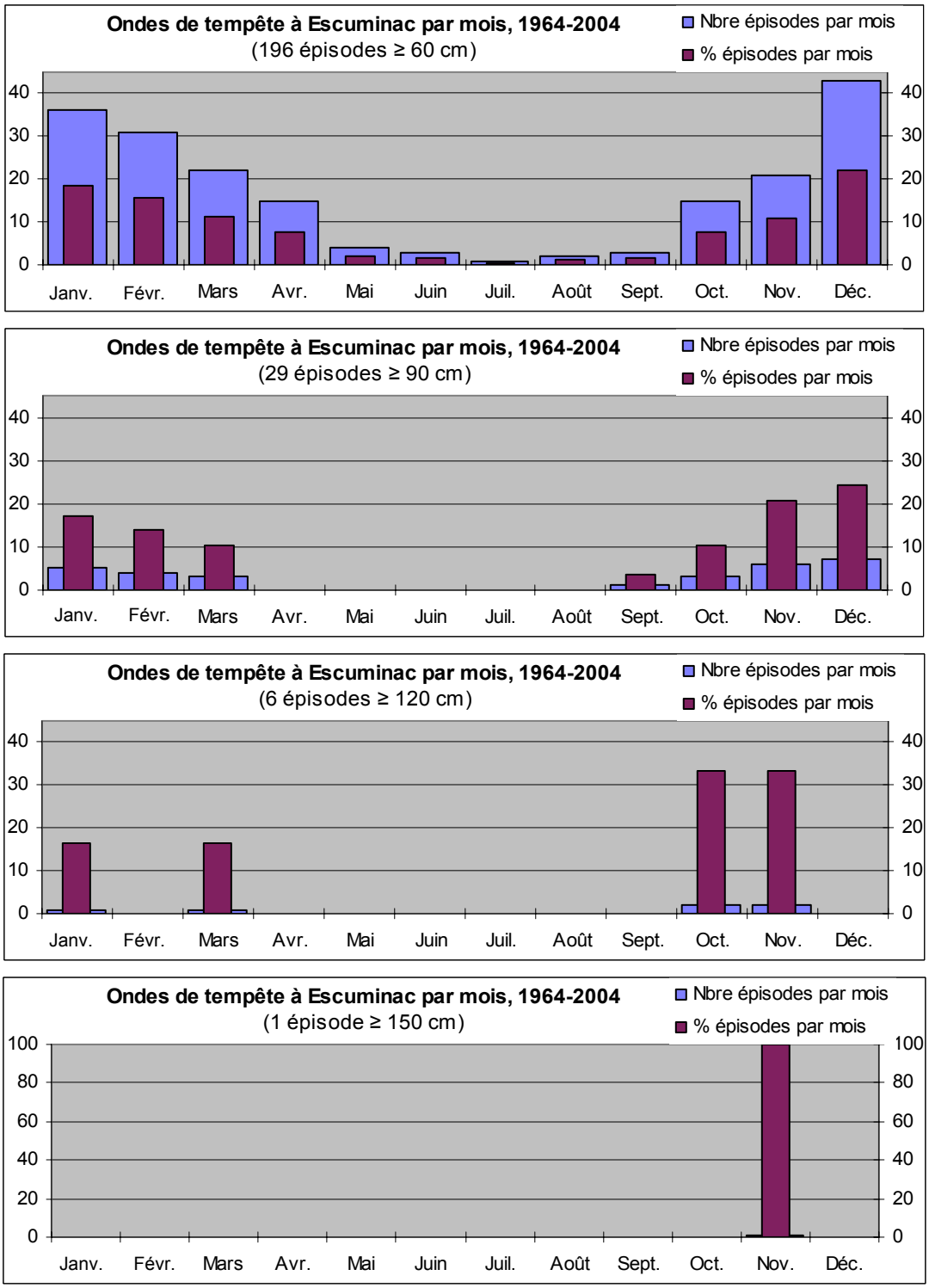


Figure 39. Ondes de tempête supérieures à 60, 80, 100 et 120 cm, par mois, à Escuminac-Pointe-Sapin.

4.2.7 Épisodes extrêmes à Pointe-du-Chêne et à Escuminac

Dans l'analyse qui précède, toutes les données sur le niveau de l'eau ont été ramenées à l'année 1977, en supposant une élévation linéaire du niveau de la mer de 20 cm/siècle à Escuminac et à Pointe-Sapin, et de 25 cm/siècle à Pointe-du-Chêne. Ces données peuvent maintenant être ramenées à l'année 2000, en ajoutant 4,6 cm aux valeurs du niveau de l'eau à Escuminac et à Pointe-Sapin, et 5,75 cm à Pointe-du-Chêne (les valeurs des ondes de tempête sont déjà normalisées et ne nécessitent aucune autre correction). Ces valeurs représentent donc le niveau de l'eau approximatif qu'aurait pu atteindre un épisode d'onde de tempête du passé, s'il s'était produit en 2000.

Le tableau 4 présente les 10 principales ondes de tempête observées à Pointe-du-Chêne (1971-2005), la valeur maximale du niveau d'eau observée pour chacun de ces épisodes, ainsi que le niveau que l'épisode aurait atteint s'il s'était produit en 2000. Le tableau donne également une description qualitative du moment où l'onde de tempête a été maximale pendant le cycle de la marée (c.-à-d. à marée haute ou près de celle-ci, à marée basse, pendant une faible marée haute, etc.). La même information figure au tableau 5 pour Escuminac et Pointe-Sapin, pour la période couverte par les données sur le niveau d'eau (1963-2005).

Le tableau 6 présente les 11 principaux épisodes observés dans les données sur les niveaux de l'eau à Pointe-du-Chêne, et les 11 valeurs maximales de niveau d'eau qui auraient été atteintes si tous les épisodes s'étaient produits en 2000. Le tableau 7 présente les mêmes données, mais pour Escuminac-Pointe-Sapin. Les mêmes données sont représentées graphiquement aux figures 40 et 41 (les 10 principaux épisodes d'ondes de tempête); aux figures 42 et 43 (les 11 valeurs maximales observées du niveau de l'eau) et aux figures 44 et 45 (les 11 plus grandes valeurs de niveau d'eau ramenées à l'année 2000).

Avant la récente réinstallation du marégraphe à Pointe-du-Chêne, la valeur maximale du niveau d'eau enregistrée à cet endroit était de 2,90 m ZC, le 17 mars 1976. Les données récentes renferment deux épisodes dépassant cette valeur, soit la tempête du 19 février 2004 (Juan blanc) et celle du 27 décembre 2004 (un épisode de vagues dévastatrices d'erosion des côtes dans la région). Des levés additionnels sur le terrain ont permis de déterminer le niveau de la tempête marquante du 21 janvier 2000, mais il manque néanmoins d'autres dates et des épisodes importants, comme la tempête du 29 octobre 2000 et l'ouragan Gustav, le 12 septembre 2002. L'ouragan Gustav se caractérise par la 9^{e} valeur de niveau d'eau la plus élevée observée dans les données de Charlottetown, et il a provoqué des inondations à Pointe-du-Chêne; le niveau était probablement proche de celui associé à l'épisode Juan blanc. Parmi les autres épisodes qui figurent parmi les dix plus importants à Charlottetown (et qui ont probablement eu également un impact significatif à Pointe-du-Chêne), il y a la tempête qui a eu lieu le jour de l'assermentation du président Kennedy le 21 janvier 1961 (le 2^{e} niveau en importance jamais observé à Charlottetown) et la tempête du 21 janvier 1973 (au 4^{e} rang pour Charlottetown), ces deux valeurs étant antérieures à l'ensemble de données.

Les niveaux historiques à Escuminac ne contiennent pas le niveau pour la tempête du 21 janvier 2000, bien que l'inondation dans ces secteurs, moindre que plus au sud, ait

probablement atteint de nouveaux records de niveau d'eau. Fait intéressant : le niveau le plus élevé observé depuis 1963 provient des données annexées pour Pointe-Sapin; il est attribuable à la tempête du 21 octobre 1968 (ouragan Gladys). La marée prévue la plus élevée à Pointe-du-Chêne est d'environ 1,7 m ZC. L'onde de tempête connue la plus grande est d'environ 2,0 m. En combinant ces chiffres, on obtient un niveau d'eau maximum possible de 3,7 m ZC, valeur un peu plus élevée que le niveau atteint avec la tempête du 21 janvier 2000, ce qui permet de supposer que Pointe-du-Chêne a déjà eu un bon aperçu du pire scénario d'inondation dans le climat d'aujourd'hui. La marée prévue la plus haute à Escuminac est d'environ 1,6 m ZC. L'onde de tempête la plus élevée connue est d'environ 1,6 m. En combinant ces chiffres, on obtient un niveau d'eau maximum possible de 3,2 m ZC, donc de 70 cm plus élevé que celui observé avec l'ouragan Gladys, ce qui permet de supposer que les littoraux du nord de la zone à l'étude n'ont pas encore connu de niveau d'inondation correspondant au pire scénario dans le climat d'aujourd'hui. Même si le niveau de l'eau atteint avec la tempête du 21 janvier 2000 en était assez proche, le littoral était protégé par la glace à cette époque et l'inondation n'a pas été accompagnée de vagues océaniques. Le pire scénario ne s'est pas produit de mémoire récente dans les secteurs nord de la zone à l'étude, où le littoral serait entièrement exposé à la force vive des vagues qui se développent dans un flux du nord-est traversant le golfe du Saint-Laurent. Nous en traiterons plus à fond dans l'étude de la tempête du 29 octobre 2000 (section 4.2.9.2).

Tableau 4. Pointe-du-Chêne, dix plus fortes ondes de tempête, 1971-2005.

Dix plus fortes ondes de tempête – Pointe-du-Chêne 1971-2005				
Date	Hauteur de l'onde de tempête	Niveau d'eau maximum observé	Niveau d'eau maximum (2000)	Moment du cycle de la marée
21 janv. 2000	2,00	3,62	3,62	Haute
17 mars 1976	1,98	2,90	2,96	Milieu du cycle
4 janv. 1986	1,87	2,80	2,84	Basse
7 déc. 1977	1,85	2,66	2,72	Basse
22 nov. 1986	1,65	2,80	2,84	Milieu du cycle
19 févr. 2004	1,61	3,08	3,07	Haute
21 nov. 1988	1,48	2,80	2,83	Haute
12 mars 1991	1,42	2,14	2,16	Basse
1er févr. 1992	1,36	2,53	2,55	Basse
21nov. 1989	1,35	2,63	2,66	Presque haute

Tableau 5. Escuminac et Pointe-Sapin, dix plus fortes ondes de tempête, 1963-2005.

Dix plus fortes ondes de tempête – Escuminac-Pointe-Sapin 1963-2005				
Date	Hauteur de l'onde de tempête	Niveau d'eau maximum observé	Niveau d'eau maximum (2000)	Moment du cycle de la marée
17 mars 1976	1,53	2,00	2,05	Basse
29 oct. 2000	1,52	2,42	2,42	Presque haute
22 nov. 1986	1,43	2,01	2,04	Basse
29 oct. 1963	1,41	1,97	2,05	Basse
4 janv. 1986	1,37	2,23	2,26	Milieu du cycle
21 oct. 1968	1,35	2,47	2,54	Haute

Dix plus fortes ondes de tempête – Escuminac-Pointe-Sapin 1963-2005				
7 déc. 1977	1,31	2,34	2,39	Milieu du cycle
30 oct. 1998	1,30	1,85	1,86	Basse
21 nov. 1988	1,30	2,35	2,38	Presque haute
8 déc. 1968	1,30	1,92	1,99	Basse

Tableau 6. Pointe-du-Chêne, dix niveaux d'eau les plus élevés, 1971-2005.

Dix niveaux d'eau les plus élevés – Pointe-du-Chêne 1971-2005					
par niveau d'eau observé (m ZC)			par niveau d'eau ramené à 2000 (m ZC)		
Date	Niveau d'eau maximum observé	Hauteur de l'onde de tempête	Date	Niveau d'eau maximum (2000)	Hauteur de l'onde de tempête
21 janv. 2000	3,62	2,00	21 janv. 2000	3,62	2,00
19 févr. 2004	3,08	1,61	19 févr. 2004	3,07	1,61
27 déc. 2004	2,95	1,29	17 mars 1976	2,96	1,98
17 mars 1976	2,90	1,98	27 déc. 2004	2,94	1,29
4 janv. 1986	2,80	1,87	22 nov. 1986	2,84	1,65
22 nov. 1986	2,80	1,65	4 janv. 1986	2,84	1,87
21 nov. 1988	2,80	1,48	21 nov. 1988	2,83	1,48
5 févr. 1974	2,71	1,23	5 févr. 1974	2,78	1,23
7 déc. 1977	2,66	1,85	7 déc. 1977	2,72	1,85
12 nov. 1987	2,63	1,24	17 janv. 1977	2,66	1,06
21 nov. 1989	2,63	1,35	12 nov. 1987	2,66	1,24

Tableau 7. Escuminac et Pointe-Sapin, dix niveaux d'eau les plus élevés, 1963-2005.

Dix niveaux d'eau les plus élevés – Escuminac-Pointe-Sapin 1963-2005					
par niveau d'eau observé (m ZC)			par niveau d'eau ramené à 2000 (m ZC)		
Date	Niveau d'eau maximum observé	Hauteur de l'onde de tempête	Date	Niveau d'eau maximum (2000)	Hauteur de l'onde de tempête
21 oct. 1968	2,47	1,31	21 oct. 1968	2,54	1,31
29 oct. 2000	2,42	1,58	19 déc. 1963	2,46	1,04
27 déc. 2004	2,42	0,87	29 oct. 2000	2,42	1,58
6 févr. 2001	2,41	1,02	27 déc. 2004	2,42	0,87
19 févr. 2004	2,40	1,04	6 févr. 2001	2,41	1,02
19 déc. 1963	2,39	1,04	19 févr. 2004	2,40	1,04

21 nov. 1988	2,38	1,21	7 déc. 1977	2,39	1,29
7 déc.1977	2,35	1,29	21 nov. 1988	2,38	1,21
26 nov. 1974	2,34	1,16	26 nov. 1974	2,36	1,16
12 juin 1976	2,30	0,83	12 juin 1976	2,35	0,83
4 janv. 1986	2,23	1,43	5 févr. 1974	2,26	1,03

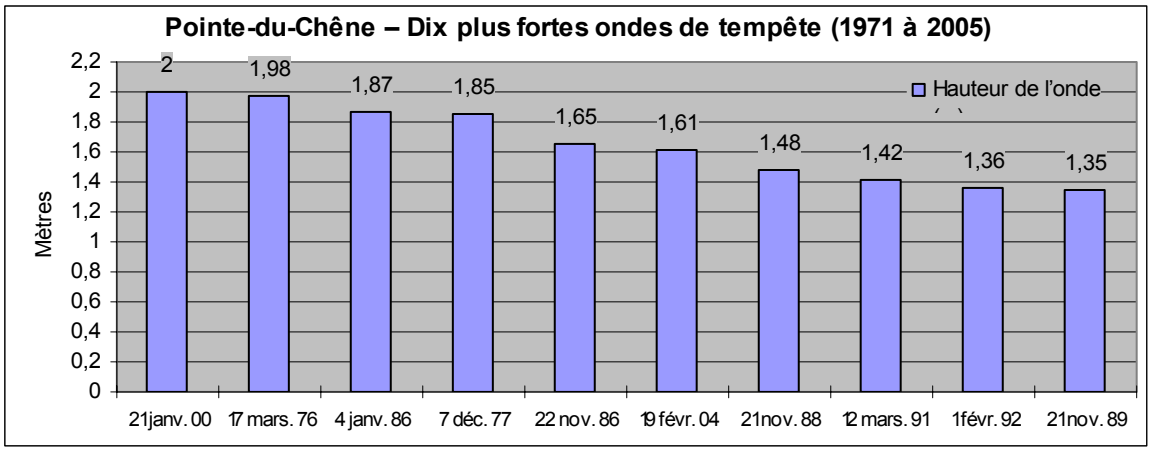


Figure 40. Les dix plus fortes ondes de tempête à Pointe-du-Chêne, 1971-2005.

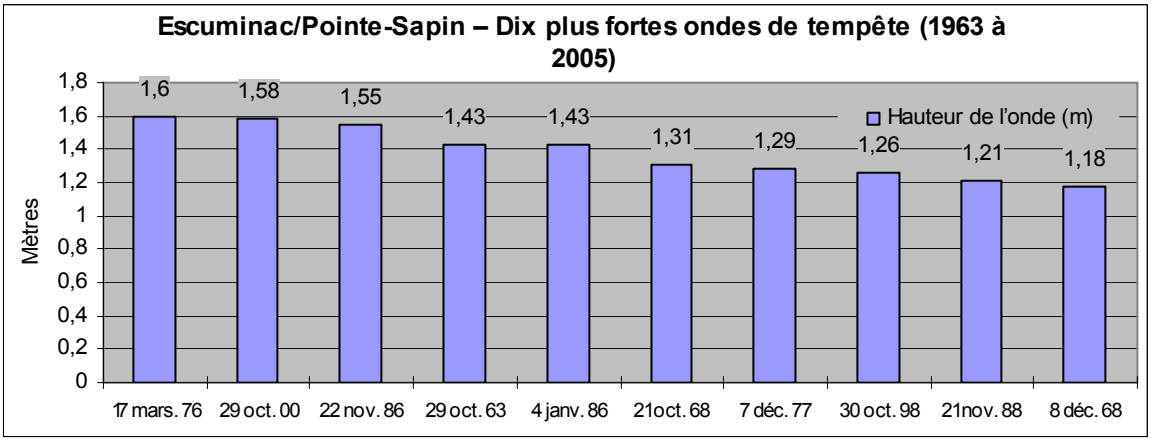


Figure 41. Les dix plus fortes ondes de tempête à Escuminac-Pointe-Sapin, 1963-2005.

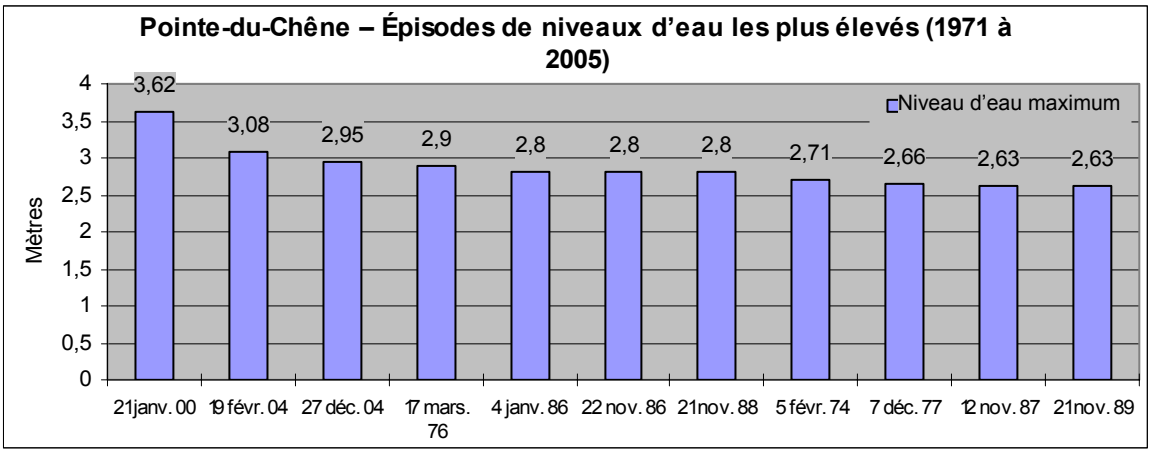


Figure 42. Les 11 niveaux d'eau les plus élevés observés à Pointe-du-Chêne, 1971-2005.

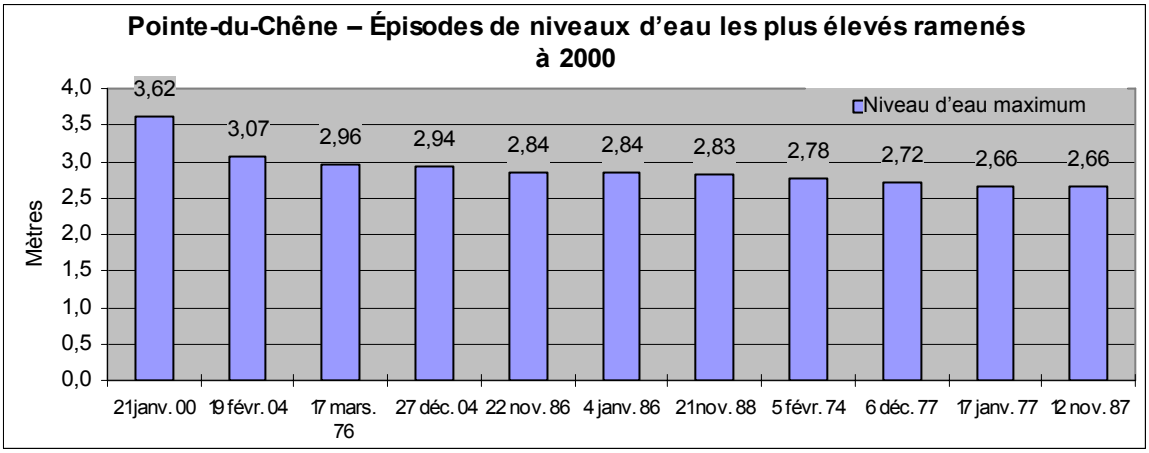


Figure 43. Les 11 niveaux d'eau les plus élevés à Pointe-du-Chêne (ramenés à 2000).

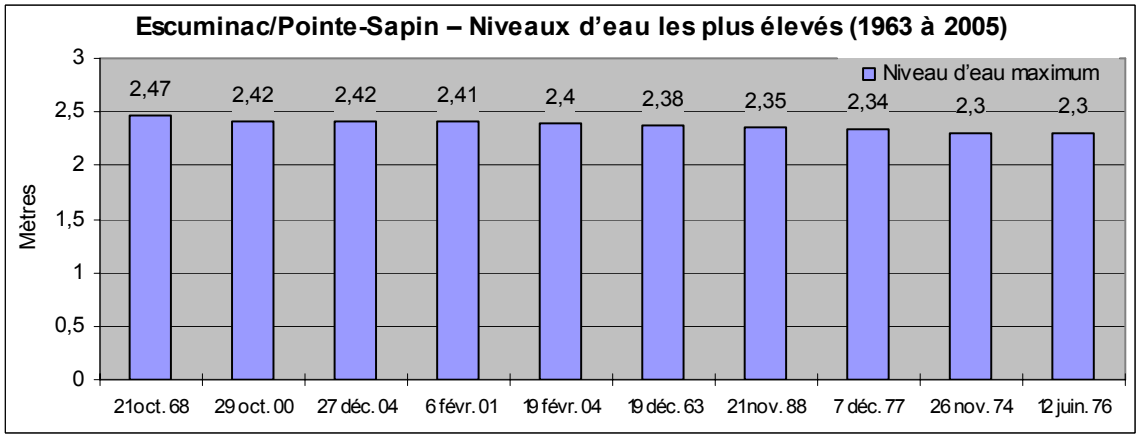


Figure 44. Les dix niveaux d'eau les plus élevés observés à Escuminac-Pointe-Sapin, 1963-2005.

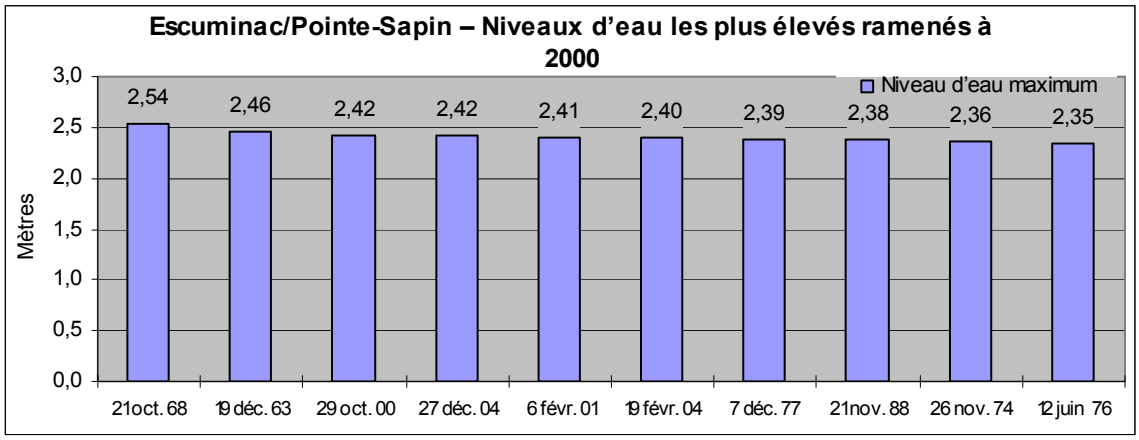


Figure 45. Les dix niveaux d'eau les plus élevés à Escuminac-Pointe-Sapin (ramenés à 2000).

Selon les données recueillies pour le projet, le niveau de la mer commence à inonder le quai principal de Pointe-du-Chêne à un niveau de 1,2 m au-dessus du niveau du modèle altimétrique numérique (MAN), soit environ 20 cm au-dessus du niveau moyen de la mer. Ce quai comporte toutefois une section basse, et l'inondation en superficie n'y progresse pas de manière appréciable tant qu'on n'atteint pas environ 1,6 m au-dessus du niveau de la mer, auquel moment l'eau s'approche de la ville. À 1,8 m au-dessus du MAN, l'eau commence à entrer dans la ville et 50 % du quai est sous l'eau. Ce niveau correspond à 1,6 m au-dessus du niveau moyen de la mer et environ 2,65 m au-dessus du zéro des cartes. De tous les épisodes d'ondes de tempête répertoriés entre 1971 et 2005, seulement neuf ont dépassé ce niveau, mais d'autres en ont été proches. Si on tient compte de l'élévation du niveau de la mer, 11 de ces tempêtes auraient à ce niveau provoqué des inondations.

Dans la section 4.3 de ce rapport, on élabore une analyse extrémale des niveaux d'eau à Pointe-du-Chêne pour estimer les périodes de récurrence des niveaux d'eau extrêmes dans des scénarios plausibles de changement climatique. Dans l'avenir, non seulement il y aura des inondations aux niveaux les plus élevés, mais les inondations à un niveau donné seront plus fréquentes. Pour comprendre l'augmentation potentielle de la fréquence des inondations, il ne suffit pas de tenir compte des épisodes d'ondes de tempête; il faut aussi étudier les dépassements du niveau d'eau. Nos données sur les niveaux d'eau à Pointe-du-Chêne couvrent 25 ans (1971 à 1992, et 2003 à 2005), avec un « trou » total d'environ 5,66 années de données. Toutefois, il manque les importantes années 2000 et 2002, qui contiennent les tempêtes du 21 janvier et du 29 octobre 2000 et l'ouragan Gustav. Nous avons donc ajouté ces deux années dans la base de données, en formulant l'hypothèse qu'elles sont par ailleurs normales, hormis ces tempêtes majeures. On a postulé que la tempête du 29 octobre 2000 était à plus de 3,1 m ZC (voir pièce jointe B dans la section 4.2.15.2) et que l'ouragan Gustav était à peu près du niveau de Juan blanc, soit plus de 3,0 m ZC. Le nombre de niveaux d'eau observés qui ont franchi les divers seuils pendant cette période (21,34 années) figure au tableau 8 (colonne 2). On remarquera la forte augmentation de la fréquence des dépassements aux niveaux les plus bas. En supposant que la climatologie des tempêtes demeure la même et que le niveau relatif de la mer monte de 30 cm/siècle au cours des 100 prochaines années (c.-à-d. près

du taux actuel), la colonne 4 montre la fréquence des dépassements annuels autour de l'année 2100. À l'heure actuelle, on peut s'attendre à un dépassement de 2,7 m ZC (la moitié du quai serait sous l'eau et l'eau approcherait de la ville) tous les deux ans; on pourrait en 2100 s'attendre à trois dépassements similaires tous les deux ans. Le niveau associé à Juan blanc (> 3,0) qui, historiquement, se produit tous les 5-6 ans en moyenne, serait maintenant atteint tous les deux ans, et le niveau d'eau de 3,62 m ZC observé le 21 janvier 2000 aurait été de 3,92 m ZC. Le tableau 5 montre qu'avec l'élévation du niveau de la mer et le réchauffement planétaire, non seulement les inondations atteindront des niveaux plus élevés, mais aussi les inondations à des niveaux plus bas deviendront beaucoup plus fréquentes.

Tableau 8. Fréquence annuelle moyenne des dépassements du niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne en 2000 (d'après les données de niveau d'eau de 1971-2005) et en 2100 (en supposant que la climatologie des tempêtes et le taux d'élévation du niveau de la mer restent les mêmes).

Pointe-du-Chêne			
Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3	Colonne 4
Niveau (ZC)	N^{bre} d'épisodes en 1971-2005 (données ramenées à l'année 2000) dépassant le seuil	N^{bre} annuel moyen d'épisodes dépassant le seuil (année 2000)	N^{bre} annuel moyen d'épisodes dépassant le seuil (année 2100)
≥2,2	74	3,47	?
≥2,3	46	2,16	?
≥2,4	31	1,45	?
≥2,5	24	1,12	3,47
≥2,6	15	0,70	2,16
≥2,7	11	0,52	1,45
≥2,8	9	0,42	1,12
≥2,9	6	0,28	0,70
≥3,0	4	0,19	0,52
≥3,1	2	0,09	0,42
≥3,2	1	0,05	0,28
≥3,3	1	0,05	0,19
≥3,4	1	0,05	0,09
≥3,5	1	0,05	0,05
≥3,6	1	0,05	0,05
≥2,2			0,05
≥2,3			0,05
≥2,4			0,05

4.2.8 Les tempêtes

Les ondes de tempête du golfe du Saint-Laurent touchent habituellement de grandes étendues et sont souvent associées à des systèmes météorologiques à grande échelle (synoptiques). Il existe un lien très étroit entre les ondes de tempête enregistrées à Escuminac et à Pointe-du-Chêne, et celles qui l'ont été à Charlottetown. Les ondes sont essentiellement associées au passage des tempêtes extratropicales (des latitudes moyennes), surtout à l'automne et au printemps, mais elles peuvent être causées par des cyclones tropicaux qui atteignent nos latitudes, surtout en été et à l'automne.

Dans le rapport sur l'élévation du niveau de la mer à l'Île-du-Prince-Édouard, tous les épisodes d'ondes de tempête survenus à Charlottetown et dépassant 90 cm ont été regroupés dans un tableau, et on a cartographié leurs trajectoires. Les données dans ce tableau comprennent : la date à laquelle l'onde de tempête a atteint son maximum à

Charlottetown, la durée pendant laquelle l'épisode a dépassé 60 cm, la valeur maximale de l'onde de tempête, le niveau de l'eau au moment de cette pointe, le niveau d'eau maximum atteint pendant l'épisode, la pression plus basse centrale de la tempête pendant qu'elle était au sud de 50 °N, la vitesse maximum de chute de la pression centrale sur 24 heures (Δ press. 24), la latitude centrée sur le temps de cette chute maximale ϕ (c.-à-d. 12 heures dans la période) et la vitesse de chute maximum géostrophiquement équivalente en bergerons (b), 1 bergeron correspondant à une chute de 24 mb en 24 heures à 60 °N. On calcule les vitesses de chute géostrophiquement équivalentes en bergerons pour les basses latitudes en multipliant la vitesse de chute maximale sur 24 heures à la latitude ϕ, centrée dans le temps, par $\sin\phi/\sin 60$ (voir Sanders et Gyakum, 1980).

Ce tableau comprend également des estimations subjectives du régime des vents au-dessus du golfe du Saint-Laurent, dans la zone située au nord de l'Île-du-Prince-Édouard, à l'est du Nouveau-Brunswick et au sud de l'île d'Anticosti, pendant ces épisodes d'ondes de tempête. Ces valeurs ont été obtenues en évaluant les cartes météorologiques synoptiques pour la période de 6 heures qui précèdent le maximum de l'onde de tempête et une autre pour la période qui se situe entre 6 heures et 12 heures avant ce maximum. Le régime des vents était décrit par la direction (N., N.-N.-E., etc.) et la vitesse du vent (Cv = coups de vent; T = tempêtes; Vf = vents forts, Mod = vents modérés). Ces données figurent au tableau 9 ci-dessous.

On peut voir au tableau 9 que les tempêtes causant des ondes de tempête s'accompagnent habituellement de vents du nord-est de force coup de vent ou tempête traversant le golfe du Saint-Laurent. De plus, une analyse de la direction et de la vitesse du vent aux îles de la Madeleine au début et à la fin de ces épisodes d'ondes de tempête (c.-à-d. quand l'onde de tempête atteint 60 cm, puis redescend sous ce seuil à Charlottetown) montre que des vents du nord-est précèdent en général l'onde de tempête maximale; quand elle redescend, ce sont les vents nord-ouest qui prédominent habituellement. Ce sont des conditions normales pour un cyclone qui passerait à la latitude de l'Île-du-Prince-Édouard en se déplaçant vers le nord-est.

Les pressions minimales figurant au tableau 9 montrent que la plupart des dépressions qui ont généré ces intenses ondes de tempête étaient très profondes. 86 % de ces systèmes météorologiques ont à un certain moment présenté une pression centrale de 980 mb ou moins, 60 % une pression centrale de 970 mb ou moins, et 32 % une pression centrale de 960 mb ou moins. De ces systèmes, 82 % présentaient un taux de creusement d'au moins un bergeron, et par conséquent se qualifiaient comme systèmes à creusement explosif, 27 % des tempêtes s'étant creusées à raison de deux bergerons ou plus. Une tempête, en l'occurrence celle du 5 janvier 1989, présentait un taux de plus de trois bergerons. On trouvera davantage d'information sur les tempêtes figurant dans ce tableau dans le catalogue *Severe Storms off Canada's East Coast* (Lewis et Moran, 1984), du Centre climatologique canadien.

Tableau 9. Épisodes de vents causant des ondes de tempête de plus de 0,9 m à Charlottetown (1960-2000). Le régime des vents était décrit par la direction (N., N.-N.-E., etc.) et la vitesse du vent (Cv = coups de vent; T = tempêtes; Vf = vents forts, Mod = vents modérés

Date	Durée (heures)	Onde (m)	Niveau d'eau (m ZC)	Niveau d'eau max. (m ZC)	Press. min. (mb)	Δ press. 24 (mb)	ϕ	b	Régime des vents (0-6)	Régime des vents (6-12)
01-05-61	8	0,9	3,4	3,4	970	36	42	1,9	N, T	NE, Cv
01-21-61	18	1,31	3,28	3,89	962	23	39	1,3	NE, T	NE, Cv
03-23-62	7	1,02	1,78	2,88	968	23	38	1,4	NE, Cv	NE, Cv
02-20-63	8	1,02	2,8	2,92	970	27	42	1,5	ENE, T	ENE, Cv
10-30-63	4	0,94	3,07	3,19	976	13	41	0,7	NW, Vf	NW, Cv
11-28-63	5	1,03	2,26	2,63	988	27	51	1,3	NW, Cv	NW, Cv
12-19-63	9	1,43	3	3,05	950	50	39	2,9	NNE, T	NE, Cv
01-28-66	17	0,96	2,15	3,01	962	22	36	1,4	NE, T	NE, T
02-08-67	7	1,07	1,93	2,64	974	18	42	1,0	NNE, T	NE, Cv
12-08-68	13	1,27	3,12	3,36	956	40	38	2,3	W, Vf	W, Vf
11-29-68	pas de données	1,11							NE, Cv	NW, Vf
01-15-70	8	0,9	2,09	2,99	970	26	42	1,4	NNW, T	NNW, T
12-07-70	17	1,0	2,09	3,02	978	10	43	0,5	NNE, T	NE, Cv
12-25-70	14	1,03	3,17	3,17	982	20	43	1,1	NE, Cv	NE, Cv
12-27-70	8	0,99	1,6	2,63	948	38	39	2,2	NE, T	NE, Cv
03-05-71	9	0,91	2,55	2,7	963	21	39	1,2	N, Cv	NE, Vf
01-21-73	9	1,0	3,77	3,77	966	30	42	1,6	N, T	NNE, Cv
02-05-74	14	1,09	2,88	3,66	968	27	41	1,5	NNE, T	NNE, Cv
02-18-74	10	0,99	2,12	2,88	962	32	37	1,9	NNE, T	NE, Cv
10-20-74	6	0,96	3,42	3,42	960	36	39	2,1	NNE, T	NE, Cv
03-17-76	15	1,2	3,57	3,76	952	46	42	2,5	NE, T	NE, Cv
09-15-77	5	0,99	1,58	2,19	984	17	46	0,9	N, T	NE, Cv
12-07-77	22	1,04	3,24	3,24	960	22	43	1,2	NE, T	NE, Cv
12-17-79	7	0,91		3,35	969	38	40	2,1	N, Cv	Var, Vf
02-21-80	4	0,93	1,65	2,22	972	14	36	0,9	NW, Cv	NW, Cv
10-02-82	5	1,07	1,85	2,57	986	14	50	0,7	N, Cv	NNE, Cv
12-25-83	16	1,17	1,92	3,57	950	36	44	1,9	N, T	N, Cv
12-26-84	5	1,12	2,6	2,61	994	49	52	2,2	NW, Cv	NW, Cv
01-05-85	7	0,91	3,39	3,39	956	40	38	2,3	N, T	NNE, Vf
01-16-85	11	1,02	1,8	2,96	960	30	42	1,6	N, T	NNE, Cv
02-28-85	3	0,91	2,79	2,79	978	34	44	1,8	NW, Cv	N, Vf
01-04-86	10	1,06	2,08	2,77	976	27	45	1,4	N, T	NNE, Cv
01-06-86	8	1,01	1,86	2,83	974	29	43	1,5	ENE, Cv	ENE, Vf
03-07-86	4	0,92	2,47	2,57	976	19	43	1,0	NE, Cv	NE, Cv
11-22-86	7	0,92	2,32	3	978	20	42	1,1	NE, T	NE, Cv
12-08-86	5	1,2	2,36	2,68	991	36	46	1,8	NW, Cv	NW, Cv
01-24-87	5	1,13	2,16	2,22	967	28	39	1,6	T, Mod	SE, T

11-12-87	7	0,93	2,97	2,97	967	28	40	1,6	NE, Cv	NE, Cv
12-30-87	14	1,04	2,46	2,99	953	43	38	2,5	NW, T	N, Cv
11-22-88	15	1,11	2,5	3,1	971	9	46	0,5	NNE, Cv	NE, T
01-05-89	17	1,13	1,94	3,3	941	56	36	3,4	N, Cv	NNE, Cv
01-21-89	7	1,0	2,56	2,97	964	35	45	1,8	N, T	NE, Cv
03-12-91	13	1,41	2,42	2,59	959	22	42	1,2	N, T	NE, Cv
12-03-91	10	0,9	3,37	3,37	974	32	48	1,6	W, Mod	NW, Mod
02-02-92	16	1,08	2,5	3,24	962	34	38	2,0	NE, T	NE, T
12-30-93	9	1,12	3,62	3,62	956	43	39	2,5	N, T	NE, T
12-08-94	5	0,97	2,11	2,42	960	41	45	2,1	N, Cv	NNW, Cv
01-15-96	7	1,3	2,96	2,96	988	8	48	0,4	NW, Cv	W, Vf
03-07-97	9	0,9	2,36	2,95	959	41	44	2,1	NNW, T	NE, T
04-02-97	7	0,9	1,71	2,64	978	9	38	0,5	NNE, T	NNE, Cv
01-21-00	n.d.	1,36			946	42	38	2,5	NE,Mod	E, Mod
10-29-00	n.d.	1,29			979	18	39	1,0	NE, T	NE, T

Tous les épisodes d'ondes de tempête supérieures à 110 cm à Pointe-du-Chêne ont été identifiés à partir des données de niveau d'eau (1971-1992 et août 2003-octobre 2005). On en a dénombré 30. Les cartes des trajectoires de ces 30 tempêtes figurent à la pièce jointe C (section 4.2.15.3). De ce nombre, 17 se trouvent au tableau 9, qui donne la liste des épisodes d'ondes de tempête de 90 cm à Charlottetown (pour la période 1960-1998, plus les deux tempêtes de référence de l'année 2000 [21 janvier et 29 octobre]). Cinq des 13 tempêtes restantes ont été observées depuis la publication de ce tableau (dans Manson, 2002a). Les huit autres épisodes ont également été répertoriés comme épisodes à Charlottetown, mais la hauteur des ondes était dans la plage de 60 à 90 cm.

Un graphique composite de toutes les trajectoires des tempêtes est présenté à la figure 46 et, malgré quelques exceptions à la règle (comme la tempête du 2 octobre 1982), on voit que ces trajectoires présentent de grandes similitudes. Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, ces tempêtes sont surtout des tempêtes marines extratropicales qui subissent un creusage explosif au large de la côte est, passent à l'est de la zone à l'étude et sont habituellement accompagnées d'une période de vents du nord ou du nord-est de force coup de vent ou tempête, soufflant à travers le golfe du Saint-Laurent. La géométrie de ces tempêtes est habituellement propice à la formation de grosses mers dans la zone à l'étude (en l'absence de glace de mer), ce dont nous traiterons plus à fond à la section 4.2.10 du présent document.

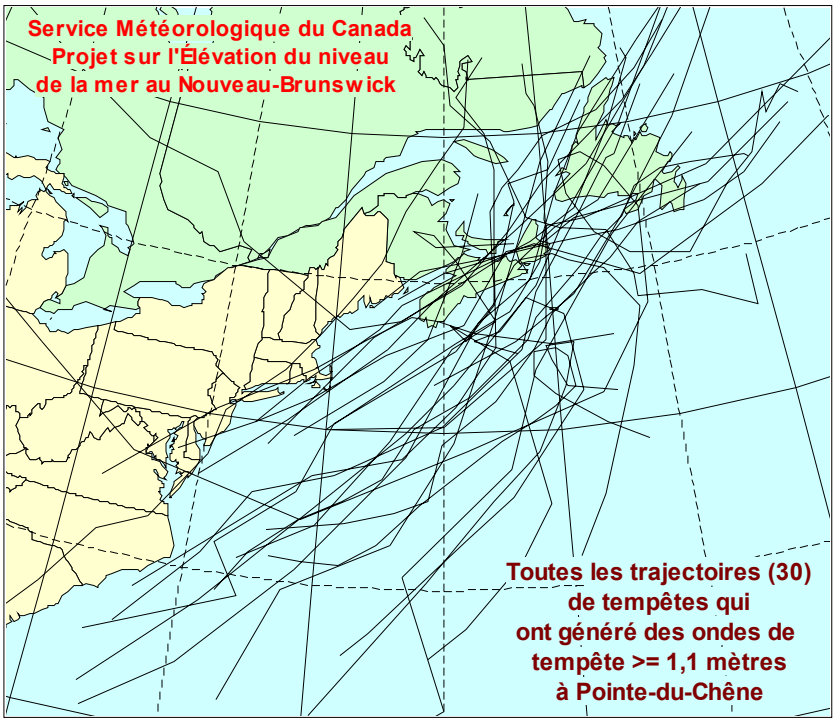


Figure 46. Graphique composite des trajectoires des tempêtes.

Les cyclones tropicaux peuvent également frapper notre région quand leur trajectoire s'incurve vers le nord ou le nord-est au large de la côte est de l'Amérique du Nord à des latitudes plus basses. Ces tempêtes sont souvent en phase finale après être passées sur les eaux froides au nord du mur du Gulf Stream; elles sont habituellement en phase de transition pour devenir des cyclones extratropicaux ou post-tropicaux. Néanmoins, elles peuvent toucher terre sur la côte est du Canada en ayant encore la force de l'ouragan (comme Luis à Terre-Neuve en 1995, ou Juan en Nouvelle-Écosse en 2003), ou se réintensifier sous l'effet d'un forçage dynamique aux moyennes latitudes (comme la tempête subtropicale du 29 octobre 2000).

Pour examiner l'impact des cyclones tropicaux dans notre secteur, nous avons interrogé la base de données HURDAT du National Hurricane Center, base dite des « meilleures trajectoires » (1851 à 2004). Cette étude détaillée figure à la pièce jointe D (section 4.2.15.4). Au fil des ans, de nombreux cyclones tropicaux ont touché la région. La figure 47 illustre les trajectoires de celles de ces tempêtes qui ont généré des ondes de 60 cm ou plus enregistrées par l'un ou l'autre des marégraphes (Pointe-du-Chêne, Escuminac, Pointe-Sapin, Charlottetown ou Rustico) pendant leur période d'enregistrement.

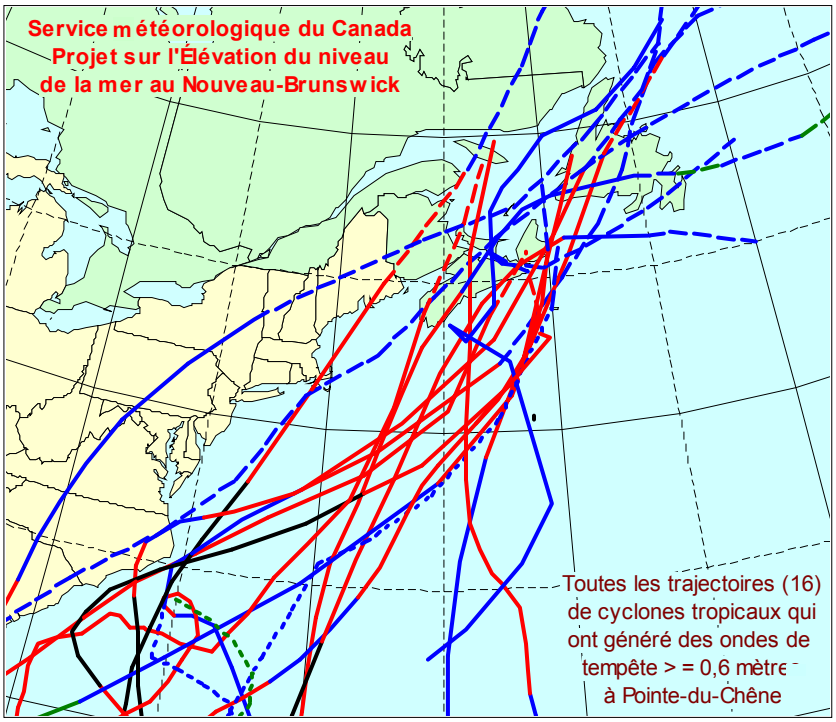


Figure 47. Trajectoires des cyclones tropicaux ayant généré des ondes de tempête de 60 cm ou plus et enregistrées par un marégraphe (Pointe-du-Chêne, Escuminac, Pointe-Sapin, Charlottetown ou Rustico)**.**

Bien que moins courants que les épisodes d'ondes de tempête extratropicales, les cyclones tropicaux peuvent être très puissants et se produire pendant la saison météorologique tropicale (juin à novembre), lorsque la glace de mer n'offre aucune protection contre les vagues. L'ouragan Gladys en 1968 et la tempête subtropicale du 29 octobre 2000 sont décrits à la prochaine section.

4.2.9 Les tempêtes de référence

Le tableau 10 présente les dix plus hauts niveaux d'eau observés à Charlottetown, Pointe-du-Chêne et Escuminac-Pointe-Sapin, depuis que l'on compile les données sur les niveaux de l'eau. Nous présentons également le classement de ces niveaux d'eau aux autres emplacements (les classements au-dessus de dix ne représentent pas le véritable classement du niveau d'eau mesuré, mais plutôt le classement une fois les valeurs ramenées à 1977).

Tableau 10. Les dix principaux épisodes de niveau d'eau. Les tempêtes indiquées en couleur ou en gras sont décrites plus en détail ci-dessous.

	Charlottetown				Pointe-du-Chêne				Escuminac			
	Date	Niveau d'eau maximum observé	Classement à Pointe-du-Chêne	Classement à Escuminac	Date	Niveau d'eau maximum observé	Classement à Charlottetown	Classement à Escuminac	Date	Niveau d'eau maximum observé	Classement à Charlottetown	Classement à Pointe-du-Chêne
1	**21 janv. 2000**	**4,22**	**1**	M	**21 janv. 2000**	**3,62**	**1**	M	**21 oct. 1968**	**2,47**	**234**	**M**
2	21 janv. 1961	3,84	M	M	**19 févr. 2004**	**3,08**	**3**	**5**	**29 oct. 2000**	**2,42**	**55**	**M**
3	**19 févr. 2004**	**3,77**	**2**	**5**	**27 déc. 2004**	**2,95**	**121**	**3**	**27 déc. 2004**	**2,42**	**121**	**3**
4	21 janv. 1973	3,76	M	17	17 mars 1976	2,90	5	44	**6 févr. 2001**	**2,41**	**85**	**M**
5	17 mars 1976	3,76	4	44	4 janv. 1986	2,80	377	11	**19 févr. 2004**	**2,40**	**3**	**2**
6	30 déc. 1993	3,67	M	22	22 nov. 1986	2,80	200	49	19 déc. 1963	2,39	165	M
7	5 févr. 1974	3,65	8	12	21 nov. 1988	2,80	126	7	21 nov. 1988	2,38	126	7
8	25 déc. 1983	3,59	24	M	5 févr. 1974	2,71	7	12	7 déc. 1977	2,35	58	9
9	12 sept. 2002	3,49	M	27	7 déc. 1977	2,66	58	8	26 nov. 1974	2,34	406	15
10	1er déc. 1943	3,44	M	M	12 nov. 1987	2,63	219	74	12 juin 1976	2,30	75	12

Les ondes de tempête présentent une continuité d'un site à l'autre, ce qui n'est pas le cas des niveaux d'eau, car ceux-ci dépendent de la concordance ou de la non-concordance de phase entre l'onde de tempête et la marée. Ce sont les ondes de tempête intenses de longue durée qui ont le plus de chances de figurer comme épisodes importants aux trois sites. Les tempêtes indiquées au tableau 10 sont toutes des épisodes importants en soi, mais certaines constituent des tempêtes de référence pour ce qui est de l'érosion et de l'inondation côtières. Les tempêtes indiquées en couleur ou en gras sont décrites plus en détail ci-dessous.

4.2.9.1 La tempête du 21 janvier 2000

Le 21 janvier 2000, une dépression très intense a traversé les Maritimes en direction nord et a touché de nombreux emplacements côtiers, provoquant de graves inondations côtières et des dommages attribuables aux vagues et à la pression exercée par la glace

(Forbes *et al.*, 2000). Avec une pression centrale minimale de 946 mb à 1800 UTC, le 21 janvier, alors qu'elle était centrée à 110 km au SSE de Halifax, la tempête est ensuite passée à 55 km à l'est de Charlottetown à 0000 UTC le 22 janvier (pression centrale de 951 mb), puis s'est orientée vers le nord, traversant le golfe du Saint-Laurent.

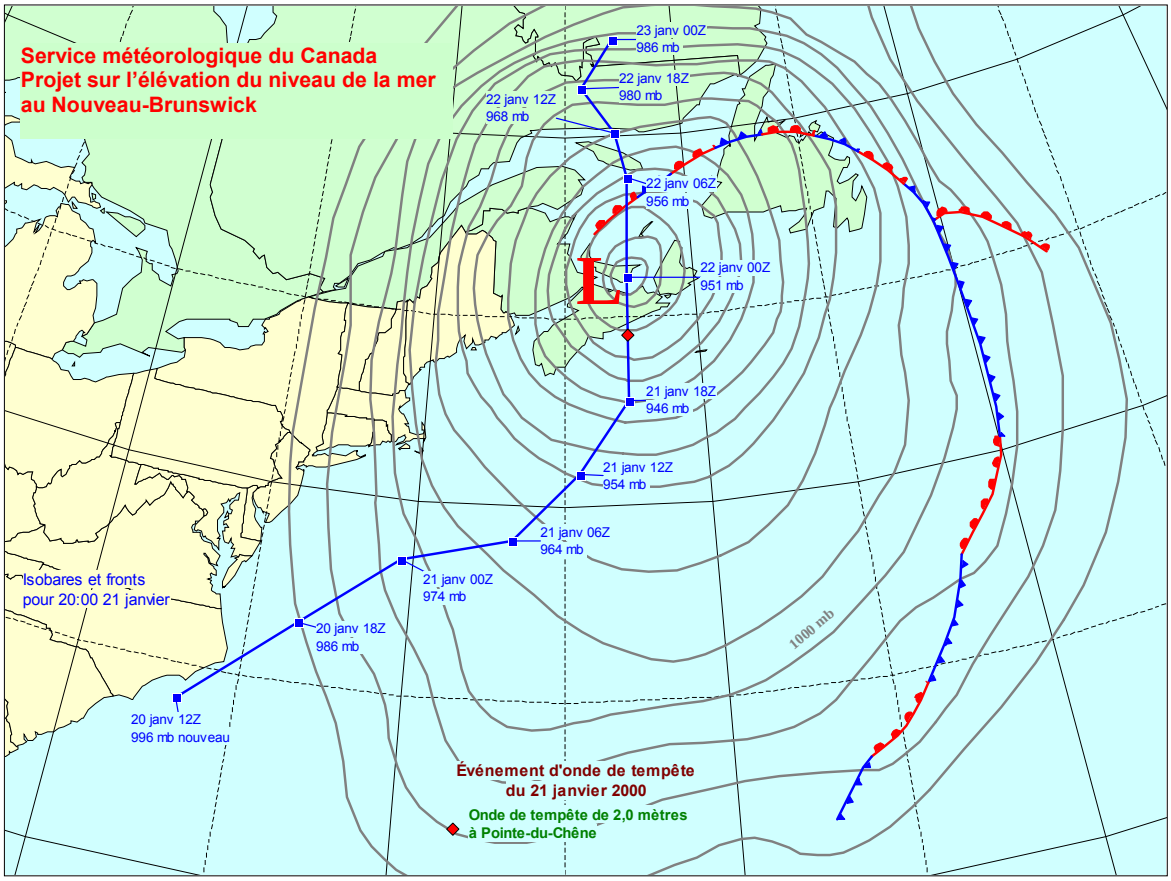


Figure 48. Carte météorologique du 22 janvier 2000, à 0000 UTC.

L'onde de tempête associée à ce système coïncidait avec la marée haute en de nombreux endroits, pendant une période de marées de périgée du printemps (la lune était à son périgée le 19 janvier, et pleine le 21 janvier). Les inondations côtières subséquentes ont été particulièrement graves dans l'est du Nouveau-Brunswick et dans tout le détroit de Northumberland. Cet épisode a été étudié par MacPhee *et al.* (2000), Forbes *et al.* (2000, 2001a), Bobanovic *et al.* (2000) et Bigio *et al.* (2000).

Les impacts de la tempête ont été ressentis dans toute la région, notamment sous la forme de dommages causés par les vagues sur le littoral de la Nouvelle-Écosse dans la baie de Fundy, et au Cap-Breton. Les vents forts ont également fait lever de très grosses vagues et endommagé les infrastructures côtières sur la côte sud de Terre-Neuve. Sur le littoral est de l'Île-du-Prince-Édouard, en grande partie libre de glace, les niveaux d'eau élevés ont recouvert les quais et diverses parties de la côte, dans maintes localités, et les vagues océaniques ont provoqué une grave érosion de la plage-barrière de Souris. Sur la côte nord de l'Île-du-Prince-Édouard, l'onde de tempête n'était pas à son maximum à

marée haute, et la banquise a protégé le littoral contre les vagues. Néanmoins, de nombreuses communautés côtières ont vu leurs quais recouverts d'eau et connu quelques inondations mineures. Toutefois, les dommages n'ont pas été aussi graves, et les principales plages n'ont généralement pas été touchées. Sur la côte ouest de l'Île-du-Prince-Édouard, l'onde de tempête (de 1,5 à 2,0 m, selon les estimations) était en phase avec la marée haute, ce qui a provoqué de graves inondations de plusieurs sections côtières, et perturbé de nombreuses localités. Dans ces secteurs, la pression exercée par la glace au moment de l'inondation a provoqué un amoncellement et un empilement de glace de mer sur le littoral. Les inondations se sont poursuivies dans tout le détroit de Northumberland le soir du 21 janvier et ont touché toutes les localités côtières, y compris certaines parties des centre-villes de Charlottetown et de Summerside.

Les impacts ont été ressentis partout le long des côtes du Nouveau-Brunswick donnant sur le golfe, notamment dans la zone étudiée pour ce projet, et surtout ses sections sud. Ils ont été plus intenses que tout ce que pouvaient se rappeler les résidents des localités côtières. À mesure que la tempête se développait, la banquise de la partie ouest du golfe du Saint-Laurent (photographie 1) était poussée vers la côte par les vents, et surélevée sur des niveaux d'eau extraordinairement élevés.

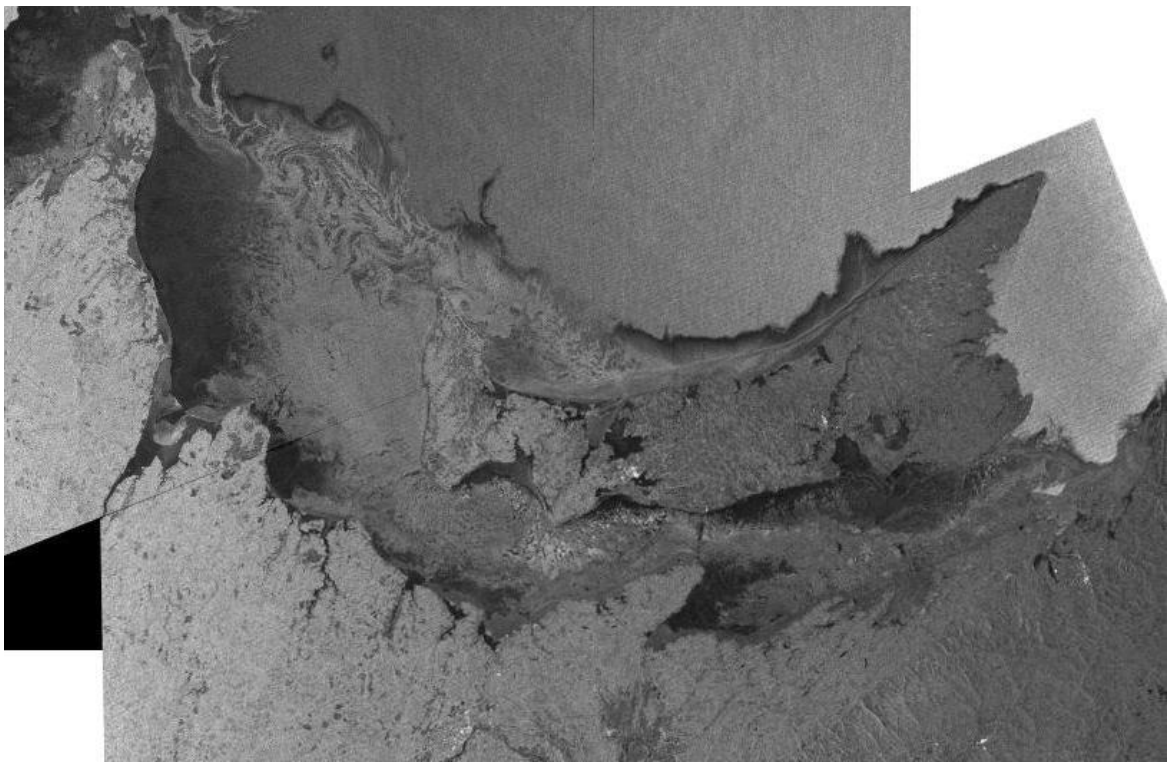


Photo 1. Image Radarsat montrant la répartition de la glace le 21 janvier 2000, à 1030 UTC.

À la plupart des endroits, la glace s'est empilée sur le littoral (photo 2 à L'Aboiteau), les têtes de plage, les quais et les ouvrages de défense marine, parfois avec des conséquences graves (photo 3, au quai de Cap-des-Caissie). La glace avait habituellement 50 cm d'épaisseur (photo 4 de Paul Noseworthy, d'Environnement

Canada, mesurant la glace à Cap-Pelé), et certains empilements atteignaient 3 à 4 mètres de hauteur (photo 5 montrant Donald Forbes, un gaillard de près de 2 mètres, de Ressources naturelles Canada, à L'Aboiteau). L'amoncellement de glace à Barachois a directement touché quelques maisons et chalets (photo 6). Des morceaux de glace se sont retrouvés dans l'intérieur des terres, portés par les eaux d'inondation, et ont jonché le paysage en divers endroits (photo 7, près de Grande-Digue). À Robichaud, la glace a réussi à traverser le quai en une seule grande nappe (probablement sur des niveaux d'eau suffisamment élevés avant que la forte pression des glaces ne débute), ce qui a aplati au sol les structures verticales (photo 8), et la glace est demeurée sur le quai quand le niveau de l'eau a baissé (photo 9). Il a fallu l'enlever à l'aide de machinerie lourde.

Photo 2 Glace sur la côte à L'Aboiteau

Photo 3 Amoncellement de glace sur le quai de Cap-des-Caissie

Photo 4 Mesure de l'épaisseur de la glace à Cap-Pelé

Photo 5 Empilement de glace à L'Aboiteau

Photo 6 Amoncellement de glace à Barachois

Photo 7 Morceau de glace sur une auto près de Grande-Digue

Photo 8 Dommages par la glace à Robichaud

Photo 9 Nappe de glace, jonchant le quai de Robichaud

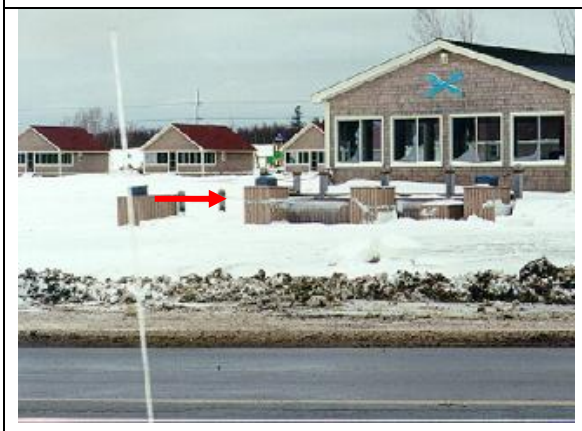


Photo 10 Ligne de résidus de glace à Shediac Bridge

Photo 11 Ligne de résidus de glace au pont à Shediac Bridge

Photo 12 Ligne de glace à Saint-Édouard-de-Kent

Photo 13 Ligne de résidus de glace sur le pont de Bouctouche, à Bouctouche

Bien que les impacts de la glace se soient fait sentir directement sur le littoral, les impacts des inondations côtières ont été beaucoup plus généralisés; en certains endroits,

ces inondations ont atteint jusqu'à un kilomètre à l'intérieur des terres. De nombreux chalets et maisons situés le long de la côte ont été inondés, certains gravement. Les crues étaient un peu moins prononcées vers le nord de la zone à l'étude, même si on a également signalé des inondations côtières, quoique moins fortes, dans la baie des Chaleurs. Le marégraphe de Belledune (données gracieusement fournies par l'autorité portuaire de Belledune) y a observé une onde de tempête de 1,3 m, qui n'était pas en phase avec la marée haute.

Les organisations des mesures d'urgence ont subséquemment administré les fonds fédéraux mis à la disposition des particuliers et des groupes touchés. Après le retrait de l'eau, un dépôt résiduel de glace et de neige laissé sur les maisons, les poteaux d'électricité et les arbres a marqué les niveaux atteints par l'eau, pendant une brève période, jusqu'à ce que le soleil le fasse fondre. On peut voir ces lignes de débris résiduels à la base des propriétés près de Shediac Bridge sur la photo 10, et des propriétés vers le fond de la baie de Bouctouche, sur la photo 11. On peut également voir cette ligne sur le bâtiment rouge sur le quai de Saint-Édouard-de-Kent, sur la photo 12, et sur les piliers du pont de Bouctouche, sur la photo 13.

L'inondation à Pointe-du-Chêne a eu lieu l'après-midi du 21 janvier, et de nombreuses photos en montrent de manière spectaculaire les impacts. Sur la photo 14, on voit les rues inondées pendant la tempête et, sur la photo 15 prise le lendemain, une maison a été déplacée de sa fondation en blocs de béton de mâchefer. À un certain moment de l'inondation, des résidents du secteur proche du stationnement de la plage Parlee ont dû être rescapés de leur maison, car la crue était devenue dangereusement haute. Le modèle altimétrique numérique (MAN) réalisé à l'aide des données recueillies pendant ce projet a permis de reproduire l'étendue de l'inondation; la confirmation de cette étendue par les résidents de l'endroit a constitué une vérification au sol des données (voir la section 4.4 du présent document).

La photo 16, prise le 22 janvier, montre l'ancien bâtiment du marégraphe, sur le quai de Pointe-du-Chêne. On voit clairement la ligne de mouillage sur la brique et Donald Forbes, de RNCan, en a subséquemment fait le relevé. La photo 17 présente une vue rapprochée du même bâtiment, avec deux morceaux de ruban noir du côté droit. Le morceau au bas, visible entre les deux morceaux de corde jaune, marque l'ancien niveau d'eau record à Pointe-du-Chêne (d'après les données de 1971-1992 sur le niveau d'eau), qui était de 2,90 m ZC, observé le 17 mars 1976. Ce niveau avait été atteint lors d'une inondation. Le morceau de ruban noir plus haut marque le nouveau niveau d'eau record, avec la tempête du 21 janvier, soit 3,62 m ZC (environ 2,55 m au-dessus du niveau moyen de la mer).

Après la tempête, Réal Daigle et Paul Noseworthy, d'Environnement Canada, se sont promenés dans la région, ont pris des photographies et ont marqué les lignes de mouillage en divers emplacements, avec des clous. Sur la photo 18, Paul Noseworthy montre l'un de ces clous, à Cap-Pelé. Par la suite, des chercheurs de RNCan et du College of Geographic Sciences (COGS) ont revisité ces sites et repéré les niveaux d'eau en utilisant des techniques d'arpentage par GPS différentiel (DGPS). La photo 19 montre David Frobel, de RNCan, établissant le niveau d'eau à l'aide du clou à Cap-Pelé, au cours d'une mission d'arpentage en novembre 2003.

La figure 49 présente les données sur les niveaux d'eau pour la tempête du 21 janvier à Charlottetown. On y trouve également le niveau d'eau record précédent, soit 3,84 m ZC, atteint lors de la tempête qui a sévi le 21 janvier 1961, et qui avait perturbé les préparatifs de la cérémonie d'assermentation de J.F. Kennedy à Washington, DC (Ludlum, 1961). La marée prévue a été corrigée pour tenir compte de l'élévation du niveau de la mer.

Il est intéressant de noter que la tempête du 21 janvier 2000 n'a pas généré l'onde de tempête la plus forte observée à Charlottetown, et qu'elle ne s'est pas produite au moment de la plus forte marée astronomique possible mais, dans les deux cas, il s'en est fallu de peu et le niveau d'eau atteint était probablement à moins de 20 cm du plus haut niveau qui aurait pu être atteint dans le climat actuel. Il en est de même pour Pointe-du-Chêne, comme nous en avons discuté précédemment. Dans l'avenir, à mesure que l'élévation du niveau de la mer se poursuivra ou même s'accélérera, et avec le passage des tempêtes dans la zone côtière, d'importantes ondes de tempête entreront en phase avec des marées suffisamment importantes pour produire des niveaux d'eau record à Charlottetown et à Pointe-du-Chêne. C'est d'ailleurs la prémisse de ce projet.

Photo 14 Rues inondées à Pointe-du-Chêne

Photo 15 Maison déplacée de sa fondation à Pointe-du-Chêne

Photo 16 Ligne de mouillage sur le bâtiment du marégraphe

Photo 17 Niveaux d'eau record à Pointe-du-Chêne

Photo 18 Marquage du niveau d'eau à Cap-Pelé

Photo 19 Récupération du niveau d'eau à Cap-Pelé

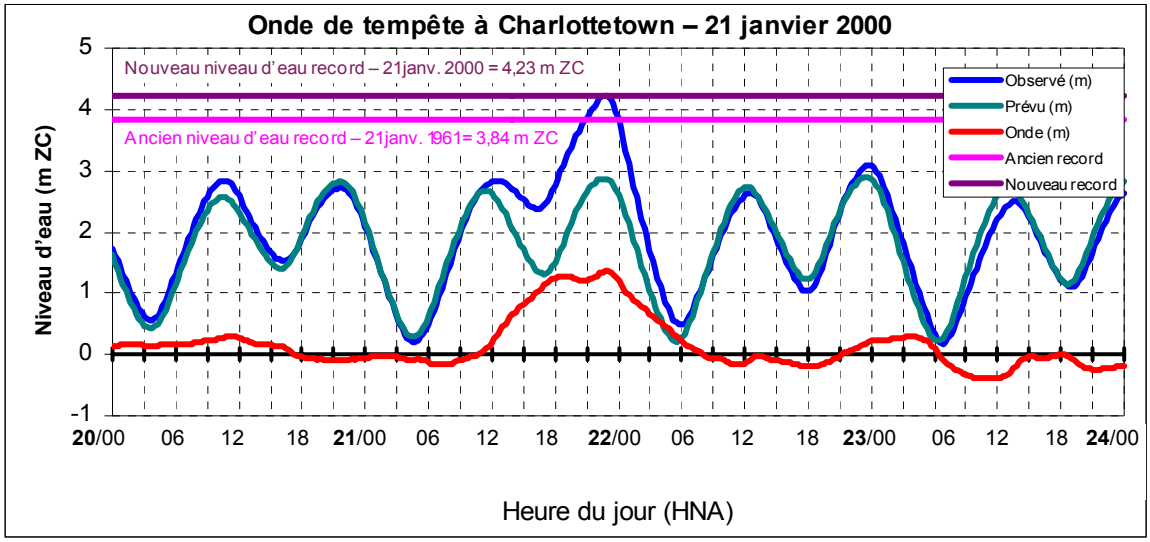


Figure 49. Données sur le niveau d'eau à Charlottetown pour la tempête du 21 janvier 2000.

4.2.9.2 La tempête du 29 octobre 2000

Tôt le 29 octobre 2000, une tempête subtropicale (Bevan, 2000) a abordé les Maritimes par le sud-sud-ouest et connu un regain d'intensité pour se situer au sud du Cap-Breton avec un centre de 979 mb (figure 50). Cette tempête intense et inhabituelle (Bowyer *et al.*, 2001), accompagnée de vents du nord-est de force tempête dans le golfe du Saint-Laurent, a provoqué d'importantes inondations côtières et des dommages sur le littoral de l'est du Nouveau-Brunswick et le nord de l'Île-du-Prince-Édouard (Forbes *et al.*, 2001a, 2001b).

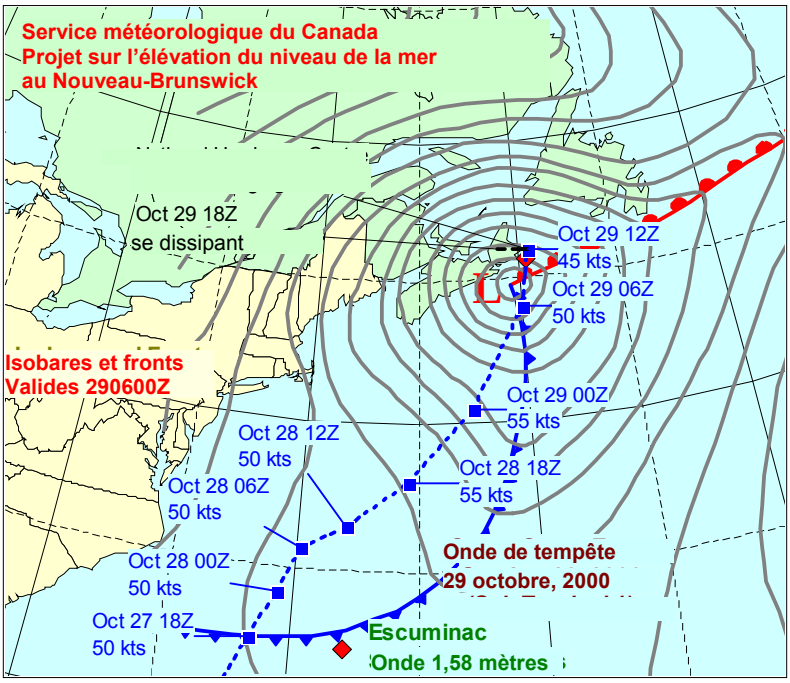


Figure 50. Carte météorologique du 29 octobre 2000, à 0600 UTC.

La figure 51 présente les données sur le niveau d'eau du marégraphe d'Escuminac, et les données sur la hauteur des vagues fournies par une bouée Waverider directionnelle (voir Manson *et al.*, 2002a pour plus d'information sur les instruments), située à 46°29,2'N 63°11,2'O dans 25 m d'eau, au large de Brackley Beach à l'Île-du-Prince-Édouard, à environ 5 km au nord-est de l'entrée du port de North Rustico. Les vents du nord-est de force tempête ont fait naître une très grosse onde de tempête de 1,52 m, d'après les données du niveau d'eau corrigées (ou 1,58 m pour les données non corrigées qui sont présentées ici), ce qui est proche du record observé à Pointe-Sapin-Escuminac. L'onde a coïncidé avec la marée haute la plus basse de la journée, pour produire un niveau de pointe de 2,42 m ZC à 0600 HNA. Cette valeur maximale est de 1 cm inférieure au record de tous les temps de 2,43 cm, établi le 21 novembre 1988. (Ce record a seulement la valeur de 2,38 m ZC dans le tableau 7, la liste des dix principaux épisodes de niveau d'eau à Escuminac, mais on doit se rappeler ici que toute l'analyse des niveaux d'eau présentés dans ce document a été faite à l'aide de données horaires seulement, tandis que, depuis plusieurs années, les données sur le niveau d'eau sont archivées à intervalles de 15 minutes. La valeur élevée de 2,43 m a été observée à un moment intermédiaire.) L'onde était en train de baisser au moment de la marée haute suivante (qui était la plus forte marée haute de la journée), mais a néanmoins produit une deuxième pointe de niveau d'eau de 2,42 m ZC, en fin d'après-midi.

Ces vents du nord-est de force tempête ont également fait lever de très grosses vagues, qui ont balayé les littoraux exposés pendant des heures. La bouée Waverider au large de Brackley Beach a enregistré des hauteurs de vagues significatives (hauteur moyenne du tiers le plus élevé des vagues) de 7 mètres, de nombreuses vagues individuelles de 11 mètres et une vague maximale de 14 mètres. Les vagues les plus importantes sont survenues pendant la première pointe du niveau de l'eau en début de matinée, mais il y

en avait encore de très fortes (4-5 mètres) pendant la deuxième pointe du niveau de l'eau, en fin d'après-midi.

Cette tempête a eu de graves conséquences sur la côte nord de l'Île-du-Prince-Édouard, touchant les plages et les infrastructures côtières (Parkes et Ketch, 2002b). Toute la côte ouest de l'Île-du-Prince-Édouard entre North Cape et West Point a également été durement frappée. Sur les côtes du Nouveau-Brunswick donnant sur le golfe, la combinaison de niveaux d'eau élevés et de fortes vagues océaniques a provoqué des inondations mineures mais généralisées le long de la côte (voir les photos 20 et 21 prises pendant la tempête, vers le fond de la baie de Bouctouche), et les vagues ont causé des dommages importants au littoral, à ses plages et aux infrastructures côtières. De la Dune de Bouctouche vers le nord, une grande partie de la côte a été gravement touchée, car la furie des vagues provenant du nord-est la frappait de plein fouet.

Il n'y avait pas de marégraphe à Pointe-du-Chêne pour mesurer les niveaux d'eau. Toutefois, les journaux (*Times & Transcript*, Moncton, 30 octobre 2000) ont signalé que l'eau, à sa hauteur maximale, était « un tiers d'un mètre au-dessus du quai, et environ 1,5 mètre au-dessus de la marque de niveau normal ». Avec une marée astronomique maximale d'environ 1,7 m ZC, cette estimation correspond à un niveau d'eau d'environ 3,2 m ZC. Le modèle d'ondes de tempête avait prévu une valeur de 2,65 m ZC, mais il sous-estimait cette tempête et, à la pièce jointe B (section 4.2.15.2), nous suggérons une valeur plus grande, soit 3,1 m ZC. Cela correspond à peu près au niveau observé lors de l'épisode Juan blanc du 19 février 2004. Des routes (dont le chemin Mackenzie) et des maisons de Pointe-du-Chêne ont été inondées ou entourées par l'eau, ce qui a obligé plusieurs familles à évacuer temporairement. On a signalé des dommages à la route menant au quai. On a également constaté des dommages à la plage Parlee, où les vagues ont charrié du sable et entamé les dunes au point où les clôtures qui avaient été érigées sur le sommet se sont retrouvées sur la plage.

La tempête a eu des conséquences importantes sur tous les littoraux, y compris les falaises, les dunes, les plages et les côtes basses. Les vagues océaniques ont entièrement submergé la Dune de Bouctouche (voir la photo 22), et en ont gravement érodé le front sableux, arrachant de grands morceaux de la passerelle de l'Éco-centre Irving (voir la photo 23). Les dommages à cet endroit ont été si importants que l'on a émis l'hypothèse que la tempête avait déstabilisé la dune au point que des tempêtes de moindre intensité, qui n'auraient normalement pas d'impact majeur, pourraient maintenant y provoquer d'importants dégâts (Forbes *et al.*, 2001a, 2001b).

On a également constaté des dommages aux infrastructures côtières à Saint-Édouard-de-Kent, Cap-Lumière, Richibucto, Cocagne et Rexton. Heureusement, la majeure partie des bateaux de pêche étaient hors de l'eau. Toutefois, dans la région, plusieurs bateaux de pêche et autres petites embarcations ont été remplis d'eau ou endommagés. On a également signalé quelques inondations à Cocagne et à Rexton, où plusieurs familles ont dû être évacuées après que la rivière Richibucto a quitté son lit.

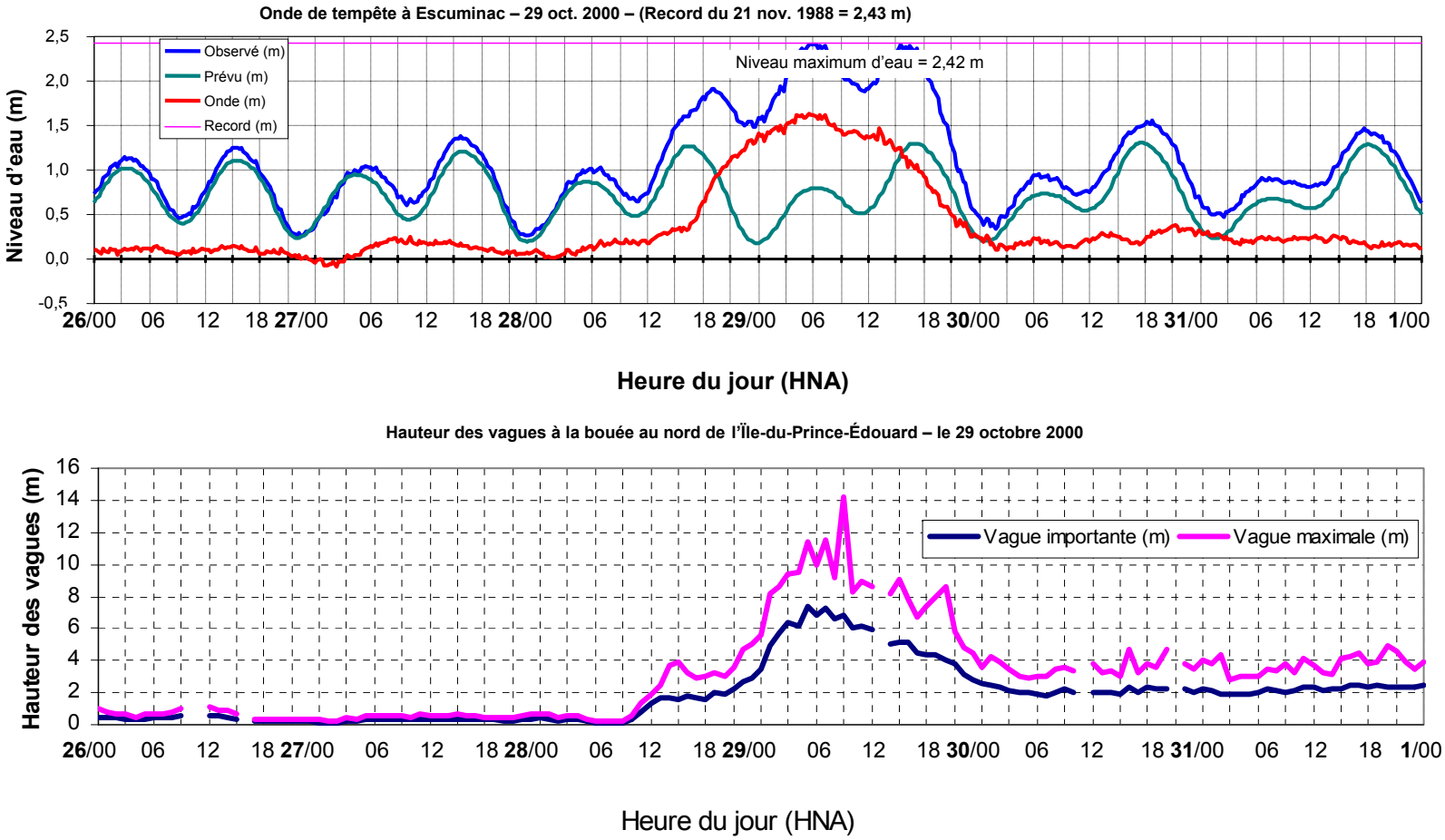


Figure 51. Données sur le niveau de l'eau à Escuminac (N.-B.) (en haut), et sur les vagues à l'Île-du-Prince-Édouard (en bas), du 26 au 31 octobre 2000 (même échelle de temps).

Photo 20 Fond de la baie de Bouctouche

Photo 21 Fond de la baie de Bouctouche

Photo 22 La Dune de Bouctouche

Photo 23 La Dune de Bouctouche

Photo 24 Quai endommagé à Escuminac

Photo 25 Érosion sur la péninsule acadienne

Des dommages importants ont été signalés dans le parc national de Kouchibouguac, où les vagues ont lessivé beaucoup de sable et profondément raviné les dunes, certains sites présentant un recul potentiellement permanent. Une grande partie des passerelles du parc a été démolie. Une brèche importante s'est ouverte dans le système dunaire, à la plage Kellys, que l'on peut encore voir aujourd'hui (voir l'image, figure 52).

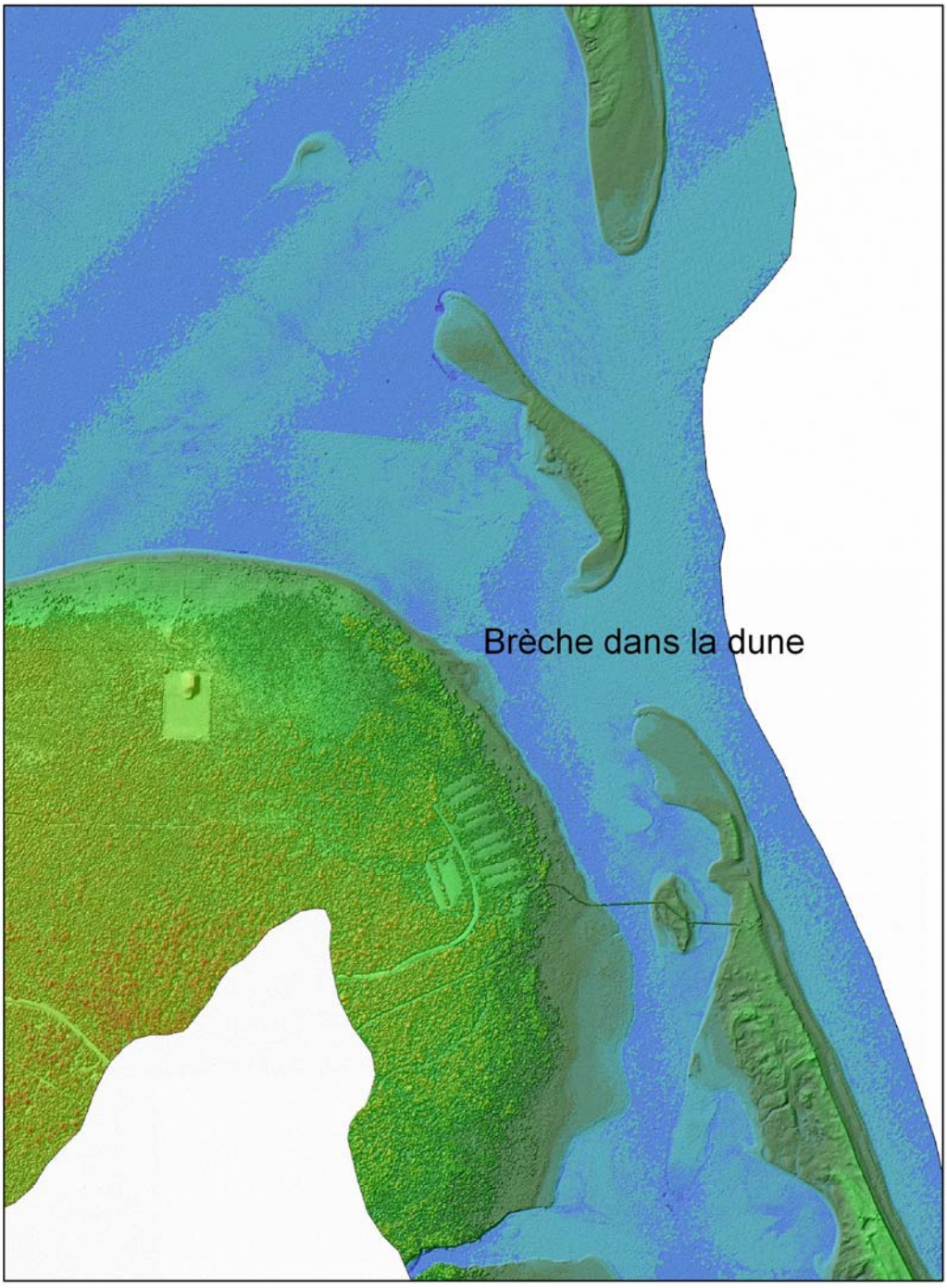


Figure 52. Image de la plage Kellys, dans le parc national de Kouchibouguac. Cartographie par LiDAR valide pour avril 2004, préparée par Applied Geomatics Research Group, Nova Scotia Community College.

Les quais d'Escuminac ont été fortement touchés. À certains endroits, la surface du quai a été entièrement arrachée et des sections entières de la structure ont été minées (photo 24). Pendant les réparations subséquentes, on a modifié la géométrie du quai.

Les effets généralisés de cette tempête sur les côtes se sont également manifestés au nord de la zone étudiée, dans la région de Miramichi, la péninsule acadienne (photo 25) et la baie des Chaleurs. Dans la baie des Chaleurs, le quai de Petit-Rocher a été gravement endommagé et une partie de la plage Beresford emportée par la mer. À Charlottetown, au sud de la zone à l'étude, l'onde de tempête n'était pas en phase avec la marée, et on a observé peu d'inondations et de dommages dans le détroit de Northumberland.

Si violente qu'ait été cette tempête, il faut se rappeler que les choses auraient pu être bien pires si elle était survenue quelques heures plus tôt ou plus tard, et avait été en phase avec la marée haute la plus haute de la journée (comme le montre la figure 51). Le niveau de l'eau aurait alors atteint environ 2,94 m ZC, au lieu des 2,42 m ZC enregistrés par le marégraphe d'Escuminac. Si la tempête avait été en phase avec la marée astronomique maximale à Escuminac (environ 1,6 m ZC), elle aurait atteint environ 3,2 m ZC. Le niveau NMM à Escuminac est d'environ 0,75 m ZC (voir la section 4.1), et le niveau d'eau maximum est donc de 2,45 m au-dessus du niveau moyen au-dessus de la mer, ce qui correspond environ à celui de la tempête du 21 janvier (en fait, 10 cm de moins). Toutefois, cette tempête était accompagnée de vagues océaniques; pendant la tempête du 21 janvier, le littoral était protégé par la glace.

Pour en savoir plus sur la tempête du 29 octobre 2000 et de ses impacts sur l'Île-du-Prince-Édouard, nous vous invitons à lire McCulloch *et al.* 2002, dans les documents scientifiques 3 (*Wind climatology*), 4 (*Wave climatology*) et 9 (*Coastal geology and shore-zone processes*). Ces documents sont illustrés.

4.2.9.3 La tempête du 6 février 2001

Le 6 février 2001, une dépression à 980 mb s'est régulièrement déplacée vers le nord-est en suivant la crête de la Nouvelle-Écosse, pour ensuite traverser Terre-Neuve le 7 février. Ce système, qui s'est manifesté en période de marées de printemps, était accompagné de vents du nord-est de force coup de vent à tempête dans la zone à l'étude, vents qui sont redevenus des vents coups de vent du nord-ouest quand le système s'est éloigné. La tempête a généré une onde de 1 m au marégraphe d'Escuminac, et elle a, jumelée à une marée haute de 1,45 m, produit un niveau d'eau de 2,41 m ZC (Figure 53). Ce niveau d'eau se classe au 4^{e} rang dans la base de données sur les niveaux d'eau de Pointe-Sapin-Escuminac (données sur 43 ans), et il n'était que de 1 centimètre inférieur au niveau d'eau causé par la tempête du 29 octobre 2000 (section 4.2.9.2 ci-dessus), qui avait tellement endommagé la côte.

Le modèle des ondes de tempête de l'université Dalhousie exécuté à Environnement Canada a bien prévu l'onde de tempête, et le Centre météorologique des Maritimes a émis à l'avance des avertissements d'ondes de tempête (MacAfee *et al.*, 2001). Des installations de pêche ont été inondées dans l'ouest de l'Île-du-Prince-Édouard, et il y a eu des inondations mineures tout le long du littoral de la zone à l'étude (voir les photos 26 et 27 du fond de la baie de Bouctouche). Bien que le niveau d'eau ait été le même que lors de la tempête du 29 octobre 2000 (on peut comparer la photo 28 du pont

de Bouctouche prise le 6 février 2001 à la photo 29 prise le 29 octobre 2000), la glace protégeait le littoral contre l'impact des vagues océaniques et, lorsque l'eau s'est retirée, il y avait peu de dommages. Cet épisode illustre bien la nature très protectrice de la glace de mer.

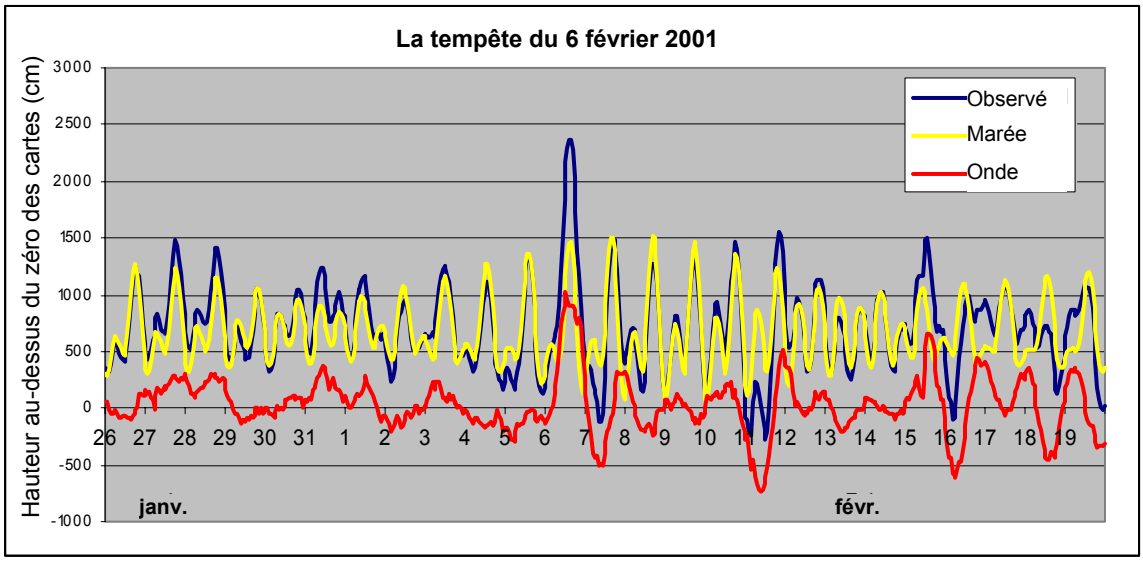


Figure 53. Données sur le niveau de l'eau à Escuminac pendant la tempête du 6 février 2001.

Photo 26 Baie de Bouctouche, 6 févr. 2001

Photo 27 Baie de Bouctouche, 6 févr. 2001

Photo 28 Pont de Bouctouche, 6 févr. 2001

Photo 29 Pont de Bouctouche, 29 oct. 2000

4.2.9.4 Juan blanc – 19 février 2004

Le 19 février 2004, les Maritimes ont été frappées par une tempête phénoménale, un blizzard qui a tout paralysé. De nombreuses régions ont reçu 70 à 90 cm de neige fraîche et il y a eu de nombreuses pannes de courant, ce qui a conduit à une déclaration de l'état d'urgence par les provinces de la Nouvelle-Écosse et de l'Île-du-Prince-Édouard et à une longue corvée de nettoyage. La tempête a été surnommée le Juan blanc parce qu'elle est survenue relativement peu de temps après l'ouragan Juan, qui était encore présent dans les mémoires. La tempête, qui se déplaçait relativement lentement en passant au sud de la Nouvelle-Écosse (figure 54), était très intense et a donné une longue période de vents de force coup de vent et tempête sur le golfe du Saint-Laurent et un épisode prolongé d'ondes de tempête. L'onde, qui atteignait 1,1 m à Escuminac et était déphasée par rapport à la marée, a quand même produit un niveau d'eau de 2,40 m ZC, soit la cinquième hauteur jamais enregistrée (tableau 10). La glace a protégé le rivage contre la puissance des vagues et, de bien des façons, les impacts ici ont été semblables à ceux de la tempête du 6 février 2001. À Pointe-du-Chêne, l'onde de tempête de 1,6 m était presque en phase avec la marée, ce qui a donné un niveau d'eau de 3,08 m ZC, le plus élevé jamais enregistré par un marégraphe et le deuxième de tout l'enregistrement. Des parties de la ville ont été inondées. À Charlottetown et dans tout le détroit de Northumberland, l'onde était en phase avec la marée, et on a signalé des inondations généralisées. À Charlottetown même, l'onde de tempête atteignait 1,3 m, ce qui la place au troisième rang dans un enregistrement de 95 ans des niveaux d'eau. Bien que le front de mer de Charlottetown ait été inondé à un certain point, l'Organisation des Mesures d'Urgence ne pouvait pas le confirmer sur le moment « à cause de toute la neige ».

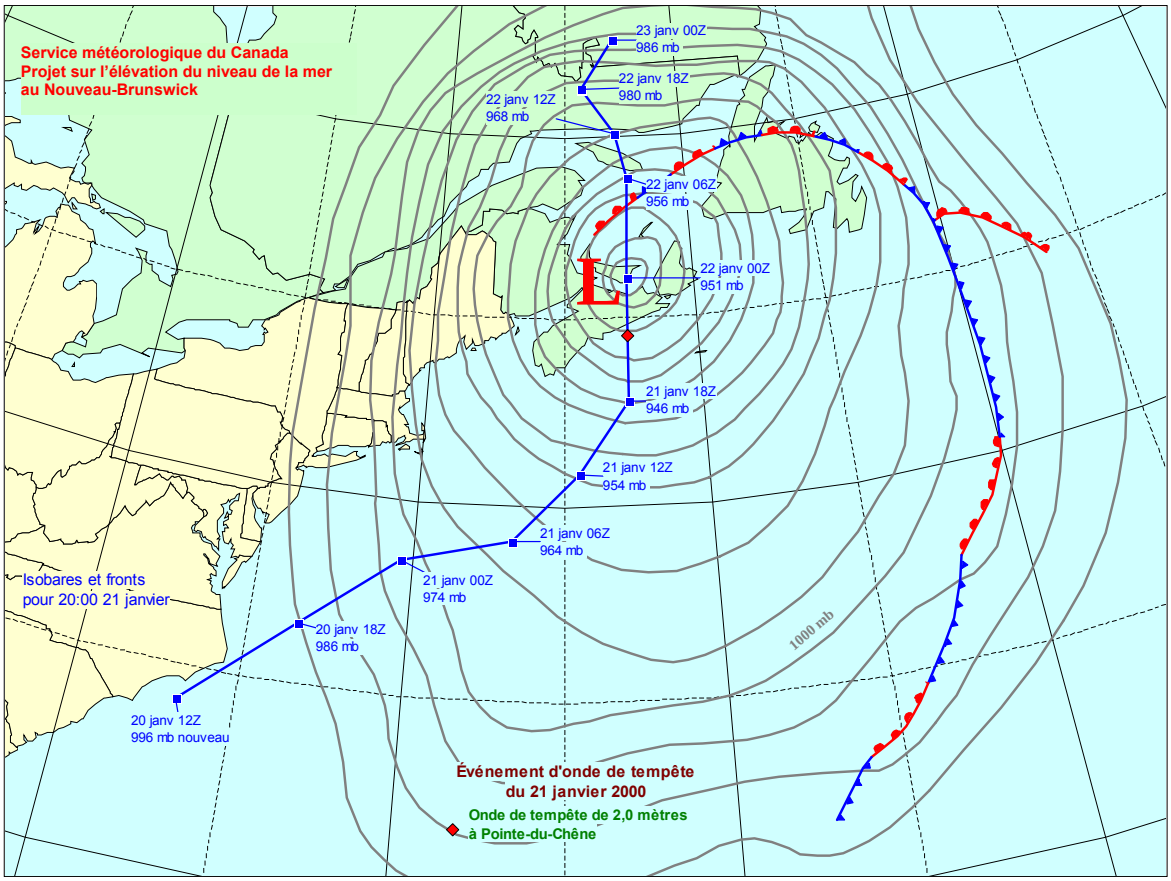


Figure 54 Carte météorologique du 24 février 2004, à 0000 UTC.

La figure 55 montre la visualisation de Pointe-du-Chêne pendant la tempête de neige du Juan blanc. La ligne rouge marque l'extension maximale de l'inondation. Une grande partie du quai et certains quartiers de la ville sont inondés. Le modèle d'onde de tempête avait bien prédit l'événement, et des avertissements d'onde de tempête avaient été émis la veille. Les responsables de l'OMU du Nouveau-Brunswick étaient donc sur place à Pointe-du-Chêne pour assister les évacuations et coordonner les interventions.

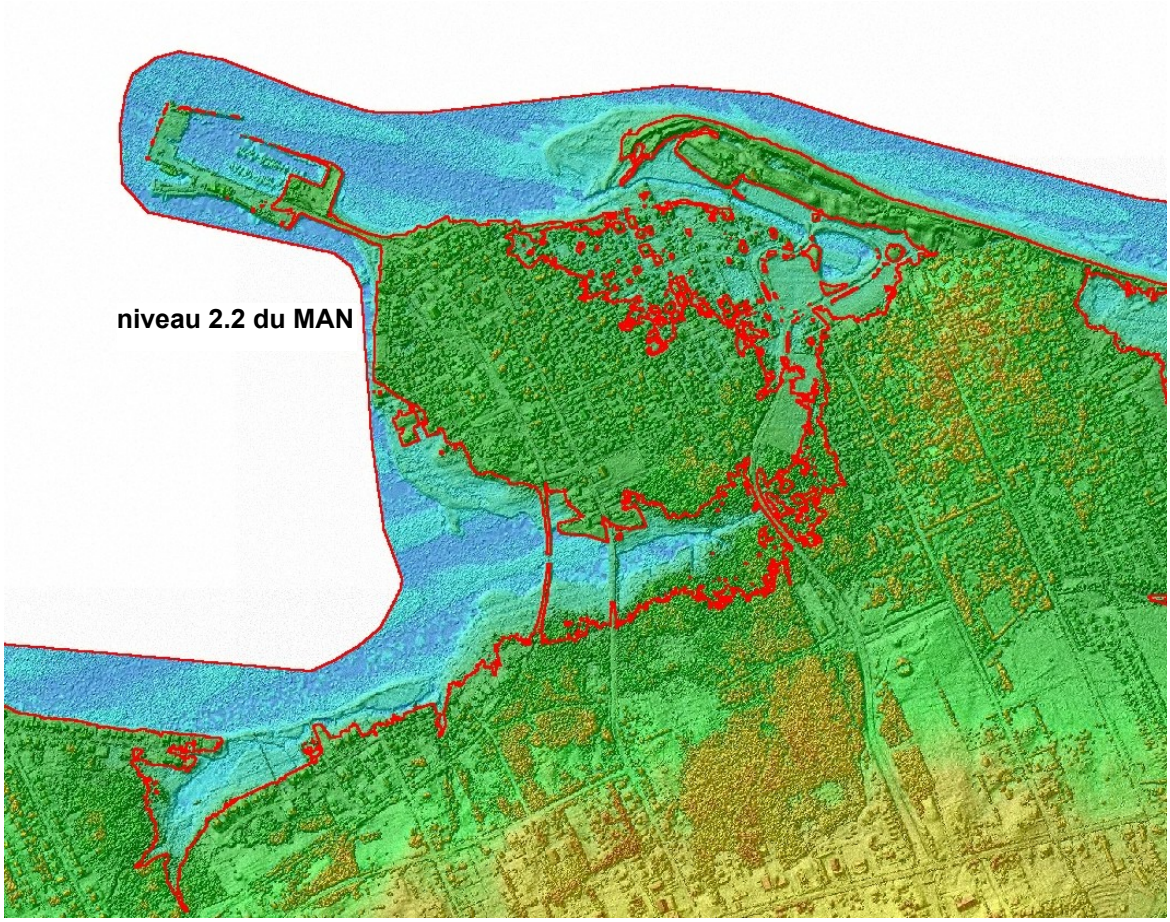


Figure 55. Extension de l'inondation du Juan blanc du 19 février 2004 à Pointe-du-Chêne. Cartographie par LiDAR valide pour mai 2003, preparée par Applied Geomatics Research Group, Nova Scotia Community College.

4.2.9.5 La tempête du 27 décembre 2004

Dans l'après-midi du 27 décembre 2004, une très intense dépression de 969 mb est passée à l'est de l'île du Cap-Breton en direction de Terre-Neuve (figure 56). Il s'agissait encore d'une autre forte tempête de neige sur les Maritimes. Ce système, combiné à une crête anticyclonique sur le Québec, a soulevé une longue période de vents de force tempête soufflant d'abord du nord-est puis du nord sur le golfe du Saint-Laurent. Les pannes d'électricité ont été monnaie courante, et ce blizzard avait de nombreuses ressemblances avec la tempête de neige du Juan blanc mentionnée plus haut. La différence la plus notable était que, la tempête survenant tôt en hiver, il n'y avait pas encore de glace pour assurer une protection contre les vagues océaniques, ce qui a eu des impacts énormes sur les côtes.

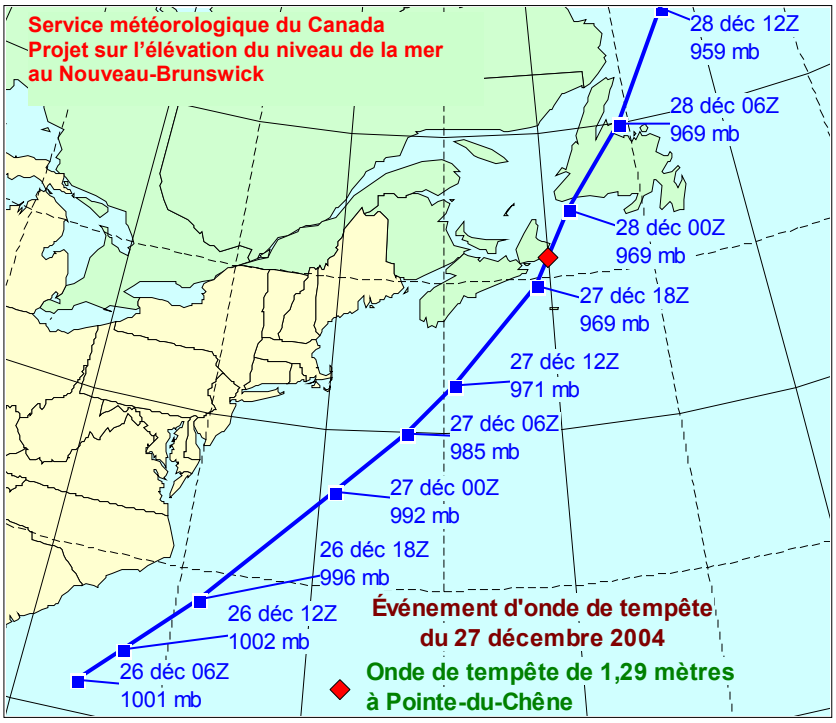


Figure 56. Trajectoire de la tempête du 27 décembre 2004.

La tempête est survenue en période de grande marée d'apogée (la lune était pleine le 26 décembre et à son apogée le 27), le lendemain du tsunami de Sumatra (26 décembre), un événement qui a secoué les océans de la planète. Celui-ci a été enregistré au marégraphe d'Halifax (Rabinovich, 2005) sous la forme d'une série d'excursions en dents de scie, d'une amplitude d'environ 15 cm. Il est cependant difficile de trouver un signal de tsunami aux marégraphes du golfe du Saint-Laurent.

Les impacts de cette tempête ont été ressentis à de nombreux endroits du sud du golfe du Saint-Laurent. On a signalé des inondations, de l'érosion des côtes et des dommages à l'infrastructure côtière dans les comtés de Pictou et d'Antigonish et le long des rives des hautes terres du Cap-Breton. Des dommages de même nature, certains graves, ont été signalés sur la côte est du comté de Kings, dans l'Île-du-Prince-Édouard et tout le long de la côte nord, dont au parc national de l'Île-du-Prince-Édouard.

À Escuminac, une onde de tempête de 87 cm s'est combinée à la marée haute et a donné un niveau d'eau de 2,42 m ZC (2,47 m selon les données aux 15 minutes), le troisième en importance du tableau 10. C'est environ le niveau atteint dans la tempête du 29 octobre 2000, mais la contribution de l'onde de tempête était beaucoup plus faible et, donc, les vagues océaniques très certainement moins hautes. À Pointe-du-Chêne, une onde de tempête de 1,29 m s'est combinée à la marée haute pour amener le niveau de l'eau à 2,95 m ZC, également au troisième rang au tableau 10. À Charlottetown, l'onde de tempête a coïncidé avec la marée basse, et on n'y a signalé aucun impact, non plus que dans d'autres parties du centre du détroit de Northumberland, qui étaient à l'abri des vagues les plus hautes.

Au parc national Kouchibouguac, il n'y a pas eu de dommages à l'infrastructure, mais l'eau a franchi nombre de dunes, qui se sont retrouvées par la suite jonchées de morceaux de glace. Sur le côté sud de la plage Kellys, l'eau a pénétré jusqu'à 45 mètres à travers les dunes et, pendant la tempête, il s'est formé un petit chenal reliant la mer à la lagune (photo 30). Une fois les eaux de l'inondation retirées, le chenal est resté à sec, mais les agents du parc craignaient qu'il ne se transforme en brèche permanente lors de tempêtes subséquentes.

À la Dune de Bouctouche, les vagues ont complètement traversé la dune en certains endroits, laissant des dépôts de bouillies de glace et de sable sur des zones précédemment couvertes de végétation. Les sections de la passerelle de l'Éco-Centre Irving qui avaient été détruites par la tempête du 29 octobre 2000 et reconstruites plus loin du rivage sont restées intactes, mais deux autres sections (plus proches du centre d'interprétation) ont été sapées (photo 31). On remarque aussi sur la photo 31 les marques de nouvelle érosion sur la face principale de la dune.

Plus au sud, on a signalé des inondations à divers endroits, dont Grand Barachois et Pointe-du-Chêne. L'inondation à Pointe-du-Chêne se situait au niveau 2.1 du MAN, soit à une dizaine de centimètres de moins que celle du Juan blanc, survenue plus tôt dans l'année (figure 55).

Cette fois encore, le modèle d'onde de tempête avait bien prévu le système, et des avertissements d'ondes de tempête avaient été émis à l'avance.

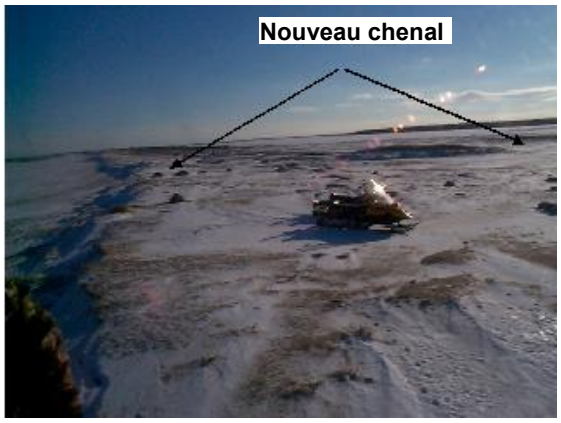


Photo 30 Changements de la dune à Kouchibouguac

Photo 31 Dommages à la Dune de Bouctouche

4.2.9.6 Ouragan Gladys – 21 octobre 1968, et tempête du 19 décembre 1963

Ces deux tempêtes passées (tirées des données de Pointe-Sapin) se remarquent au tableau 10, dans les niveaux d'eau maximums observés (à partir des données horaires de niveau d'eau) à Pointe-Sapin-Escuminac. L'ouragan Gladys se classe au premier rang pour le niveau de l'eau, le 21 octobre 1968; sa trajectoire est présentée à la figure 57.

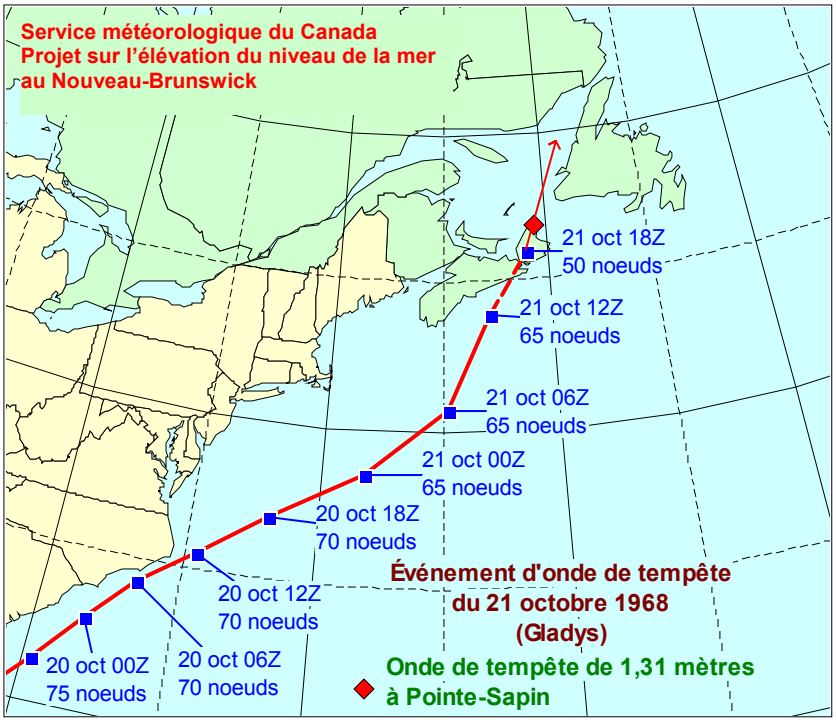


Figure 57. Trajectoire de l'ouragan Gladys, octobre 1968.

Dans la base de données HURDAT du U.S. National Hurricane Centre, la tempête est déclarée extratropicale le 21 octobre à 12Z. Les cartes météorologiques en surface de cette date montrent dans le quadrant nord-ouest un vaste champ de vent qui n'est pas sans ressemblance avec celui de la tempête subtropicale du 29 octobre 2000.

Selon Kindervater (1984) dans son rapport *Flooding Events in New Brunswick, an historical Perspective,* « dans le comté de Gloucester, l'île Shippigan a été coupée du continent lorsque le pont-jetée a été inondé par la forte marée. Un tronçon de route de un mille entre les communautés de Shippigan et d'Inkerman a aussi été recouvert par la marée. À Newcastle, on signale que la rivière Miramichi est montée à environ 6 pieds au-dessus du niveau normal; les eaux ont menacé un certain nombre d'immeubles et sont passées par-dessus les quais. Six familles de la région de Richibucto ont été chassées de leurs maisons lorsque les fortes pluies ont gonflé la Richibucto, dont le niveau est monté à huit pieds au-dessus de la normale. Le quai public et nombre de rues du village ont été inondés ». (traduction libre)

La tempête du 19 décembre 1963 se classe au 6^{e} rang au tableau 10. Il s'agissait aussi d'une tempête de début d'hiver, comme celle du 27 décembre 2004, qui est survenue alors qu'il n'y avait pas de glace ou presque pour protéger le rivage contre les impacts

des vagues. Les deux systèmes ont atteint à peu près le même niveau d'eau. L'onde de tempête du 19 décembre 1963 a atteint 1,07 m, comparativement à 0,87 m le 27 décembre 2004. Les vagues océaniques ont donc pu être du même ordre de hauteur ou plus hautes en 1963.

4.2.9.7 Grandes tempêtes et inondations du passé

Notre analyse des deux tempêtes précédentes, à la section 4.2.9.6 ci-dessus, nous rappelle que l'inondation et l'érosion des côtes dans la région à l'étude sont des phénomènes courants et que les dommages aux infrastructures côtières ne sont rien de nouveau. Nous revoyons ici d'autres indications mettant en lumière des épisodes importants de tempête et d'inondation sur la côte de la zone à l'étude, dont un bon nombre sont antérieurs aux données marégraphiques.

Robichaud et Bégin (1997) ont, dans leur étude des marges forestières côtières juste à l'est de la baie de Shediac, colligé une liste de tempêtes qui ont eu de forts impacts sur la côte. Les dates des tempêtes sont issues de diverses sources, dont des archives de journaux locaux et des entrevues avec des résidents âgés. La classification des tempêtes était basée sur les dommages aux infrastructures côtières, sur les marqueurs côtiers, sur les niveaux d'immersion de la côte et sur les enregistrements de la hauteur des vagues et de la vitesse du vent. Les données de niveau d'eau de Pointe-du-Chêne (1972-1990) ont aussi été consultées.

Kindervater (1984) a compilé un historique des inondations au Nouveau-Brunswick, qui concerne surtout les inondations à l'intérieur des terres, mais qui aborde aussi des épisodes d'inondation côtière. Parmi ses sources figurent des rapports et enregistrements gouvernementaux et des archives de journaux. Les épisodes d'inondation côtière visent souvent Newcastle et la Miramichi plutôt que les régions situées plus au sud. Cet état de choses est probablement dû essentiellement à l'emplacement et aux centres d'intérêt des éditeurs de journaux, comme la *Chatham Gazette* (Chatham) et le *North Shore Leader* (Newcastle), et un bon nombre de ces tempêtes ont probablement touché aussi la zone à l'étude.

La liste de tempêtes de Robichaud et Bégin (1997) est reproduite au tableau 11, dans les colonnes 2 à 6. Les vitesses du vent proviennent des stations d'observation météorologique de Moncton. Les ouragans sont marqués d'un « X ». Nous constatons que la tempête numéro 6, ainsi marquée, ne figure pas dans la base de données HURDAT et que les tempêtes 4 et 9 (marquées « xx ») y sont indiquées comme des cyclones tropicaux. Le tableau donne aussi le rang de l'épisode en termes de niveaux d'eau aux sites marégraphiques de Charlottetown (YYG), Escuminac-Pointe-Sapin (WPJ) et Pointe-du-Chêne (CHE). Les classements de plus de 10 ne sont pas le rang réel des données de niveau d'eau mesurées, mais celui des données ramenées à 1977. Un « M » indique des données manquantes. Les tempêtes mentionnées par Kindervater (1984) sont marquées d'un « K » dans la colonne 10. La tempête numéro 10, du 31 mars 1962, est mentionnée par Kindervater (1984), mais en tant qu'épisode d'inondation due à une forte pluie.

Bien que le document de Robichaud et Bégin (1997) ne donne pas beaucoup de détails sur les dommages, il indique cependant que la tempête 8, du 27 novembre 1951, a inondé une partie de la ville de Shediac. Les auteurs mentionnent aussi que la

tempête 22, du 21 novembre 1988, a causé beaucoup de dommages aux infrastructures sur la côte.

Tableau 11. Principales tempêtes survenues dans la zone à l'étude, selon Robichaud et Bégin (1997). Les ouragans sont marqués d'un « X ». Nous constatons que la tempête numéro 6, ainsi marquée, ne figure pas dans la base de données HURDAT et que les tempêtes 4 et 9 (marquées « xx ») y sont indiquées comme des cyclones tropicaux. Un « M » indique des données manquantes. Les tempêtes mentionnées par Kindervater (1984) sont marquées d'un « K » dans la colonne 10.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Vent							
	Date	Direc-tion	Vitesse maximum	Inondation	Oura-gan	YYG	WPJ	CHE	
1	7 sept. 1899	NO	Fort	?		M	M	M	
2	15 sept. 1904	?	Fort	?	X	M	M	M	
3	20 oct. 1917	?	Fort	?		?	M	M	
4	1er oct. 1923	?	Très fort	?	xx	M	M	M	
5	25 oct. 1930	?	70	?		M	M	M	
6	25 nov. 1938	NE	Très fort	Catastrophique	(X)	197	M	M	
7	17 sept. 1940	NE	130-145	?	X	174	M	M	K
8	27 nov. 1951	?	Très fort	Catastrophique		35	M	M	
9	19 juin 1959	NE	102	Grave	xx	528	M	M	K
10	31 mars 1962	?	Très fort	Grave		?	M	M	K
11	8 oct. 1962	?	128	Grave	X	400 +	M	M	
12	30 oct. 1963	?	136	Grave	X	80	47	M	
13	19 déc. 1963	?	160	Modérée		165	6	M	K
14	Automne 1971	N	Très fort	Grave		128 ?	57?	36?	
15	20 oct. 1974	NE	130	Grave		11	46	13	
16	26 nov. 1974	?	112	Grave		406	9	15	
17	17 mars 1976	NE	?	Catastrophique		5	44	5	
18	12 juin 1976	?	Fort	Grave		75	10	12	
19	7 déc. 1977	?	Très fort	Grave		58	8	9	
20	22 nov. 1986	NNE	130	Catastrophique		200	49	6	
21	12 nov. 1987	NE	85	Grave		219	74	10	
22	21 nov. 1988	NE,N	101	Catastrophique		126	7	7	
23	21 nov. 1989	N	89	Grave		279	90	11	

Kindervater (1984) donne des détails sur nombre de cas d'inondations passées sur la côte du golfe, au Nouveau-Brunswick. Par exemple :

- Septembre 1884. Les grandes marées ont inondé des rues à Newcastle.

- 3-4 novembre 1897. Des rues et des maisons de Newcastle ont été inondées, dit-il, à la suite de pluies abondantes, de grandes marées et de vents forts du nord-est.

- 8-9 mai 1926. Des quais ont été inondés à Newcastle à la suite « d'un coup de vent de l'est et de grandes marées ».

- 24-25 août 1927 (tempête A de 1927 dans HURDAT). Il y a eu des inondations sur le bord du détroit de Northumberland entre le cap Little et le cap Shediac, à la suite « de vents forts et de grosses mers ». Dans la baie de Shediac, des débris de bateaux, de flotteurs et de quais jonchaient le rivage sur des milles. À Pointe-du-Chêne, on a signalé que certains de ces débris avaient été emportés sur les terres jusque dans les « fossés de la rue Pleasant ».

- 20 novembre 1937. De nombreux sous-sols ont été inondés à Newcastle, ainsi que des terres agricoles à Nelson-Miramichi, à cause « des grandes marées et de la pluie ».

- 17-20 septembre 1940. Un fort coup de vent (en fait un cyclone tropical) a causé des inondations côtières à Bathurst, à Chatham-Newcastle et ailleurs le long de la Miramichi. On a signalé des dommages aux quais à Burnt Church et à Oak Point, et plusieurs bateaux ont été perdus sur la côte d'Escuminac. Un pont routier a été emporté Bouctouche et au moins une maison inondée jusqu'à l'étage. La grande route de Cocagne a été endommagée par les eaux d'inondation. À Upper Cape et à Baie Verte, le rivage a été érodé sur une longueur atteignant 25 pieds et plusieurs chalets ont été endommagés.

- 8-9 avril 1950. Le long de la Miramichi, on a signalé des inondations côtières dues à de grandes marées et des vents de force coup de vent.

- 20 juin 1959. La catastrophe d'Escuminac (que Kindervater date à tort du 26 juin 1959). De nombreux bateaux ont fait naufrage à Escuminac, avec de nombreuses pertes de vie. On signale que les eaux d'inondation ont recouvert les quais à Newcastle.

- 15-16 novembre 1962. Des vents de force coup de vent et de grandes marées ont causé des inondations mineures dans le sud-est du Nouveau-Brunswick, recouvrant les quais et les routes et isolant des maisons. La région la plus durement touchée est celle comprise entre Bouctouche et Shediac. À proximité de Bouctouche, une route a été inondée, et l'eau a atteint cinq pieds dans quelques sections. Le quai à Saint-Édouard-de-Kent a été recouvert et endommagé. Les quais de Shediac, Pointe-du-Chêne et Cape Bauld ont été partiellement inondés, mais n'ont subi que peu de dommages.

- 26-27 mai 1967. Pluies abondantes, grandes marées et vents du nord-est de force ouragan. Des parties du centre-ville de Newcastle ont été inondées et les débris éparpillés le long du rivage.

Robichaud et Bégin (1997), tout comme Kindervater (1984), sont conscients des difficultés liées aux genres de relevés qu'ils ont entrepris et du fait que leurs bases de données peuvent ne pas être complètes ni homogènes. Cet état de choses devient apparent quand on compare les deux rapports; en effet, des tempêtes importantes dans l'un, par exemple les tempêtes du 26-27 août 1927 et l'ouragan Gladys, du 21 octobre 1968, présents dans l'ouvrage de Kindervater (1984), ne figurent pas dans celui de Robichaud et Bégin (1997), alors que les inondations dites « catastrophiques » du 25

novembre 1938 et du 27 novembre 1951 sont omises par Kindervater (1984). Cependant, de nombreuses grandes tempêtes figurent dans les deux documents, dont certaines qui ont été d'intensité égale voire supérieure aux épisodes « repères » présentés ici, pour ce qui est des vagues destructrices superposées à des niveaux d'eau élevés, bien qu'aucune n'ait probablement dépassé les niveaux d'inondation dus à la tempête du 21 janvier 2000.

4.2.10 Climatologie des vents et des vagues

4.2.10.1 Introduction

Dans les sections qui suivent, nous examinons des relevés de mesure et de simulation rétrospective de la vitesse et de la direction des vents ainsi que de la hauteur et de la période des vagues (et de leur direction, lorsque les données sont accessibles) dans les buts suivants : identifier les vents et les phénomènes éoliens qui contribuent le plus à la formation des vagues influant sur le littoral sud du golfe du Saint-Laurent, dresser des profils climatologiques permettant de dégager des tendances dans la fréquence des tempêtes passées et établir les profils à prévoir jusqu'en 2100 au chapitre des vents, des vagues et de la fréquence des phénomènes météorologiques.

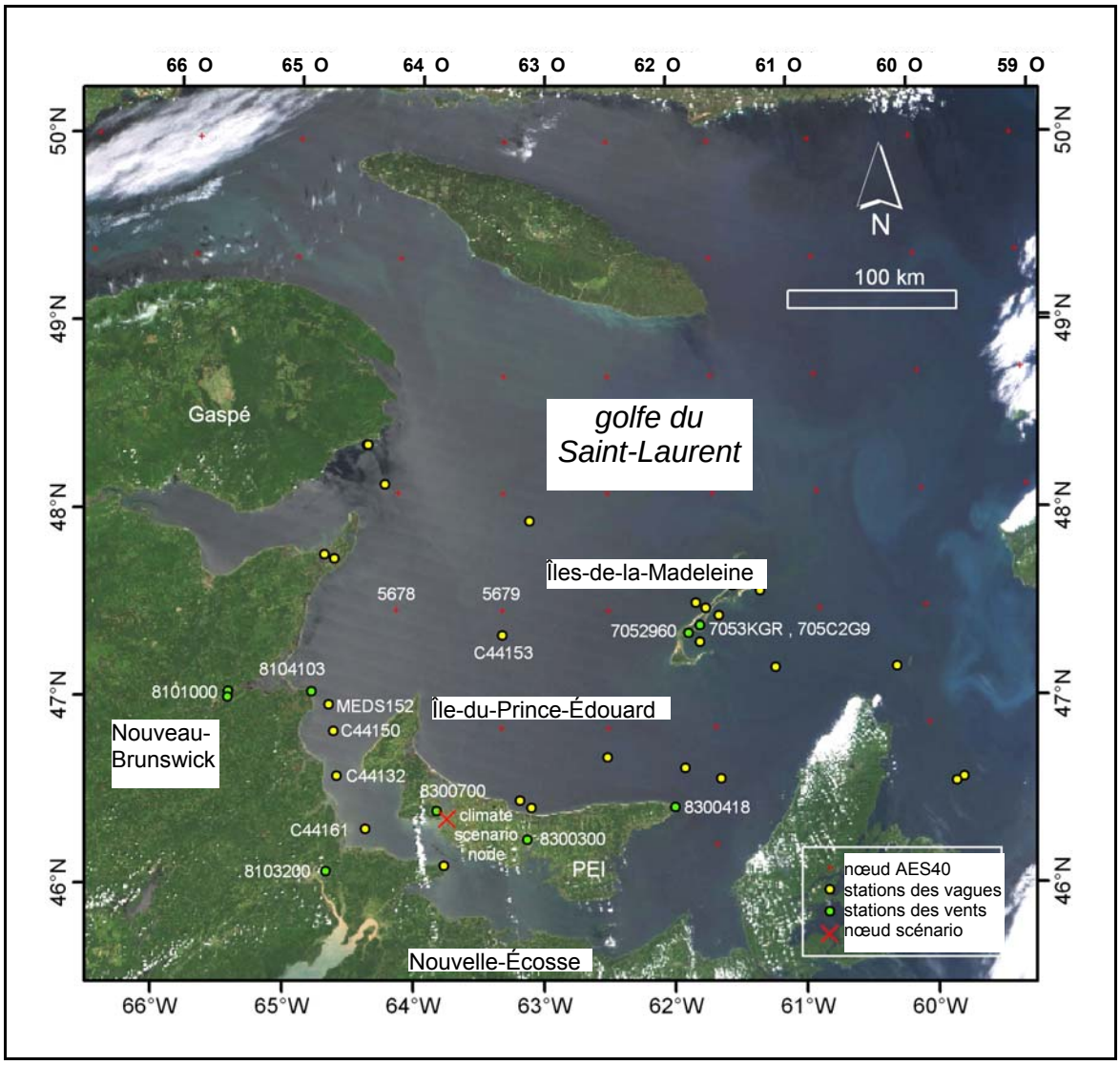


Figure 58. Emplacements des stations de mesure du vent, des bouées à vague, des nœuds de reconstruction et du nœud de prévision selon le scénario applicable, dans le sud du golfe du Saint-Laurent. Image SeaWifs gracieusement fournie par la U.S. National Aeronautics and Space Administration.

4.2.10.2 Tempêtes de vent

4.2.10.2.1 Processus des tempêtes de vent

Les conditions météorologiques dans le golfe du Saint-Laurent sont habituellement régies par de l'air froid provenant du continent, et qui se déplace vers l'est pour rencontrer l'air humide et chaud provenant de la mer des Caraïbes. La cyclogenèse se produit dans les creux ou sur les fronts où les masses d'air se rencontrent, ce qui donne lieu à la formation de cyclones extratropicaux dans lesquels l'air circule en sens antihoraire autour des centres de basse pression. Les cyclones extratropicaux les plus intenses se forment à la fin de l'automne et pendant l'hiver, lorsque la différence de température relative entre les masses d'air est la plus grande (Sanders and Gyakum, 1980; Canavan, 1996). Les

cyclones extratropicaux qui touchent les provinces des Maritimes peuvent se former au large du sud-est des États-Unis, sur le continent à l'est des Rocheuses, ou plus au nord dans l'Arctique (Gyakum *et al.*, 1996). En hiver, les plus communs sont les cyclones extratropicaux qui se forment au large du sud-est des États-Unis et qui remontent vers le nord-est, en direction des Maritimes. Certains de ces cyclones connaissent un creusement explosif et deviennent des tempêtes très intenses.

Pendant la saison tropicale dans l'Atlantique (juin à novembre), les cyclones tropicaux (c.-à-d. les ouragans et les tempêtes tropicales) se formant dans les zones tropicales et subtropicales de l'Atlantique Nord peuvent incurver leur trajectoire vers le nord-est le long de la côte est des États-Unis, et passer juste au sud des Maritimes ou au-dessus. Habituellement, ces cyclones s'affaiblissent et perdent alors leurs caractéristiques tropicales, parce qu'ils croisent les eaux plus froides du plateau continental, au nord du mur du Gulf Stream, et ils en sont souvent aux derniers stades de leur cycle de vie. Toutefois, il arrive qu'ils conservent leurs caractéristiques tropicales, reprennent de la vigueur et touchent terre sur les Maritimes. Parmi les ouragans qui ont récemment touché la côte est du Canada figurent Luis, à Terre-Neuve en 1995, Hortense, en Nouvelle-Écosse en 1996, et Juan, en Nouvelle-Écosse en 2003.

Lorsque les tempêtes tropicales passent à la phase post-tropicale, le noyau des vents les plus forts a tendance à se dilater autour d'un centre serré, et les systèmes ressemblent alors plus à des tempêtes extratropicales ou à des systèmes météorologiques extratropicaux plus faibles. Le National Weather Service et le National Hurricane Center des États-Unis décrivent ces systèmes post-tropicaux comme des systèmes extratropicaux; les météorologistes canadiens utilisent le terme « post-tropical » pour tenter de conserver une distinction entre les systèmes tropicaux en transition et les véritables cyclones extratropicaux. La région de transition la plus courante se trouve entre 35^{o}N et 45^{o}N, et aux plus élevées de ces latitudes à la fin de la saison des cyclones tropicaux (Hart and Evans, 2001). C'est également à l'automne (octobre à novembre) que de telles tempêtes peuvent connaître un regain d'intensité, pendant la transition (Abraham *et al.*, 1999 ; Bowyer *et al.*, 2001).

Les vents violents contribuent à la formation à la fois d'ondes de tempête et de vagues de tempête. Il est important de répertorier les périodes de vent et les tempêtes historiques dans les enregistrements des vents, car des sous-ensembles de ces épisodes ont donné lieu à des ondes de tempête et à des vagues de tempête qui ont causé de l'érosion et des inondations côtières. En connaissant la variabilité et les impacts passés des tempêtes, on peut mieux prévoir la fréquence et la gravité futures des inondations et de l'érosion dans différents scénarios de changement climatique. C'est pourquoi nous étudions dans cette section la climatologie des vents AES40 pour le nœud le plus proche du sud-est du Nouveau-Brunswick, afin de trouver dans les enregistrements des vents, les périodes pendant lesquelles les tempêtes de vent étaient plus fréquentes et de décrire les régimes de vent et les épisodes de tempête qui ont contribué à la formation de vagues et d'ondes de tempête.

4.2.10.2.2 Épisodes de vent depuis 1953

Méthodes et sources de données

Les vitesses et les directions du vent mesurées ont été obtenues du Service météorologique du Canada, pour les stations se trouvant près de la zone à l'étude, dont Moncton A (8103200), Miramichi A/Chatham A (8101000), Pointe Escuminac Auto (8104103), Summerside A (8300700), Charlottetown A (8300300), East Point (8300418), Cap-aux-Meules (7052960), Îles-de-la-Madeleine Auto (7053KGR), et Îles-de-la-Madeleine A (705C2G9) (figure 58). Il existe des enregistrements numériques depuis 1953 pour Moncton, Miramichi-Chatham, Pointe Escuminac, Summerside et Charlottetown, mais soit ils contiennent des « lacunes » soudaines et irréconciliables dans les vitesses de vent, probablement parce que l'anémomètre a été déplacé ou que de nouvelles structures ont été construites à proximité, soit ils sont considérés comme trop éloignés de la côte pour représenter vraiment les vents marins. L'enregistrement de Pointe Escuminac est probablement le plus représentatif des vents marins, mais il couvre une période trop courte (1986-2002) pour permettre l'élaboration d'une climatologie. Un enregistrement composite de longue durée provenant des stations des Îles-de-la-Madeleine a été construit (Manson *et al.*, 2002), mais on le juge trop éloigné de la zone à l'étude. Les données de vent provenant de la bouée à vague Irving Whale (C44153) ont été obtenues du Service des données sur le milieu marin (section 4.2.10.5).

Les vents ont également été mesurés par deux bouées à vague pendant la période de l'étude : Pointe-Sapin (C44150) et Cap-des-Caissie (C44161). Les bouées à ces stations ont été déployées et récupérées par le NGCC *Opilio* et le NGCC *Terry Fox*. En 2003, la bouée de Pointe-Sapin (C44150), une bouée Watchkeeper dans 28 m d'eau, a fonctionné de juillet à décembre. En 2004, une bouée Discus de 3 m à Pointe-Sapin (C44150) a été déployée dans 28 m d'eau à la fin de mai et récupérée à la fin de décembre, et la bouée Watchkeeper à Cap-des-Caissie (C44161) a été déployée à la fin de mai dans 11 m d'eau et récupérée au début de janvier. En 2004, seule la bouée Watchkeeper de Pointe-Sapin a été déployée dans 28 m d'eau, cette fois-ci au début de juin, et elle a été récupérée à la fin de décembre. Les données sont illustrées à la figure 59.

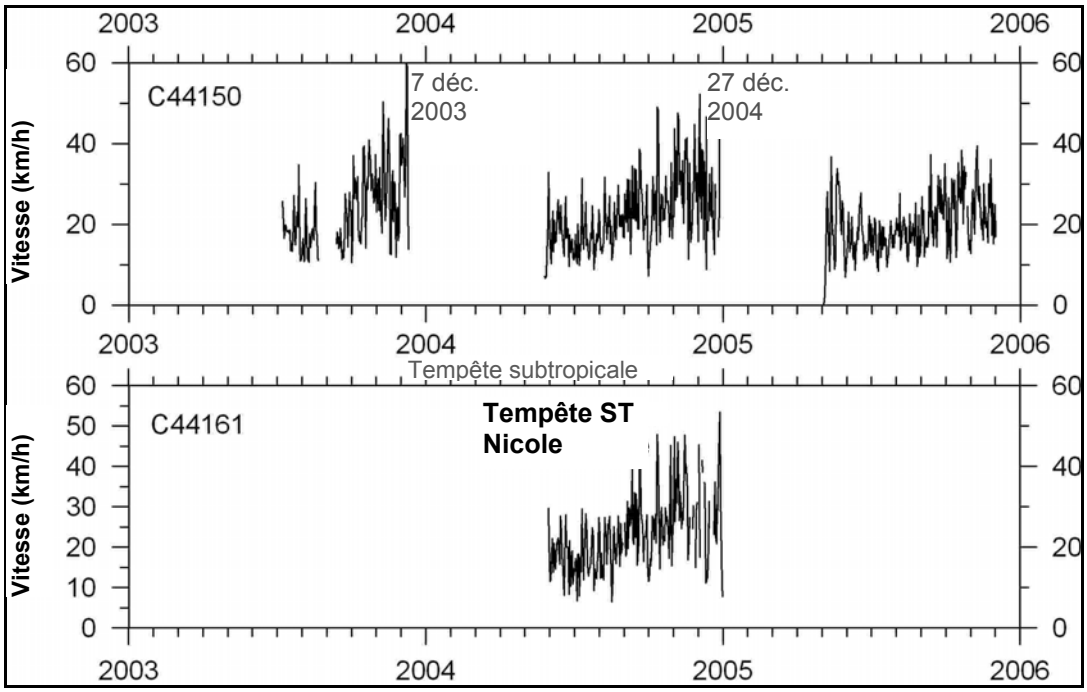


Figure 59. Vents mesurés par les bouées à vague déployées pour l'étude.

Deux nœuds de reconstruction AES40 (Swail *et al.*, 1998; Swail *et al.*, 2000) à l'entrée ouest du détroit de Northumberland (nœuds 5678 et 5679; figure 58) peuvent donner une meilleure estimation des vents marins locaux que l'enregistrement composite des Îles-de-la-Madeleine. De plus, il n'y a pas de données manquantes et les mesures reconstruites sont régulièrement espacées, ce qui élimine les erreurs systématiques dans la recherche des tempêtes. Nos analyses porteront sur le nœud 5678. Nous validerons les nœuds 5678 et 5679 en les comparant aux données mesurées par les bouées.

Résultats

La figure 59 présente plusieurs importants épisodes de vents qui ont produit des ondes de tempête et des vagues de tempête pendant l'étude : l'épisode du 7 décembre 2003, où les vents ont atteint 63 km/h provenant de 50°, enregistrés par la bouée de Pointe-Sapin (C44150); la tempête subtropicale Nicole les 11 et 12 octobre 2004, où les vents à la bouée de Pointe-Sapin ont atteint 63 km/h provenant de 33°, et les vents à Cap-des-Caissie (C44161) ont atteint 64 km/h provenant de 26°; un épisode qui s'est produit lorsqu'une dépression en transition a traversé la zone à l'étude le 27 décembre 2004, et où les vents ont atteint 55 km/h provenant de 45° à Pointe-Sapin, et 58 km/h provenant de 26° à Cap-des-Caissie. Cet épisode a rompu les amarres de la bouée de Cap-des-Caissie, qui est partie à la dérive. Il y a lieu de noter que tous ces épisodes étaient du nord-est et se sont produits à l'automne. Les analyses subséquentes porteront sur les épisodes automnaux du nord-est.

Les données reconstruites pour le nœud 5679 AES40 sont présentées par rapport aux données mesurées par la bouée Irving Whale (figure 60). L'accord est très bon, tant pour la direction du vent (r^2 = 0,76) que pour la vitesse du vent (r^2 = 0,97). La valeur r^2 relativement faible pour la direction est le résultat de la rotation complète de 0 à 360° (grappes à 360° sur chaque axe), ce qui modifie la valeur de r^2, une statistique simple.

On peut effectuer un test similaire pour le nœud 5678 et les données mesurées par la bouée de Pointe-Sapin (C44150) (figure 61). En raison de la plus grande distance entre les données reconstruites et les mesures, l'accord est moins bon (r^2 = 0,52 pour la direction, et 0,79 pour la vitesse). La faible corrélation pour la direction est attribuable aux vents du sud enregistrés à Pointe-Sapin, pour des raisons qui ne sont pas claires encore, en corrélation avec des vents d'ouest à 5678, auxquels s'ajoute la rotation totale par le nord, comme l'illustre la figure 60. Cela signifie que, même si la reconstruction donne de bons résultats aux nœuds, on ne peut la transférer géographiquement, tout comme les mesures à un endroit ne peuvent être transférées à un endroit éloigné. Les analyses subséquentes sont donc pertinentes pour le nœud 5678, mais non pour l'emplacement de la bouée de Pointe-Sapin.

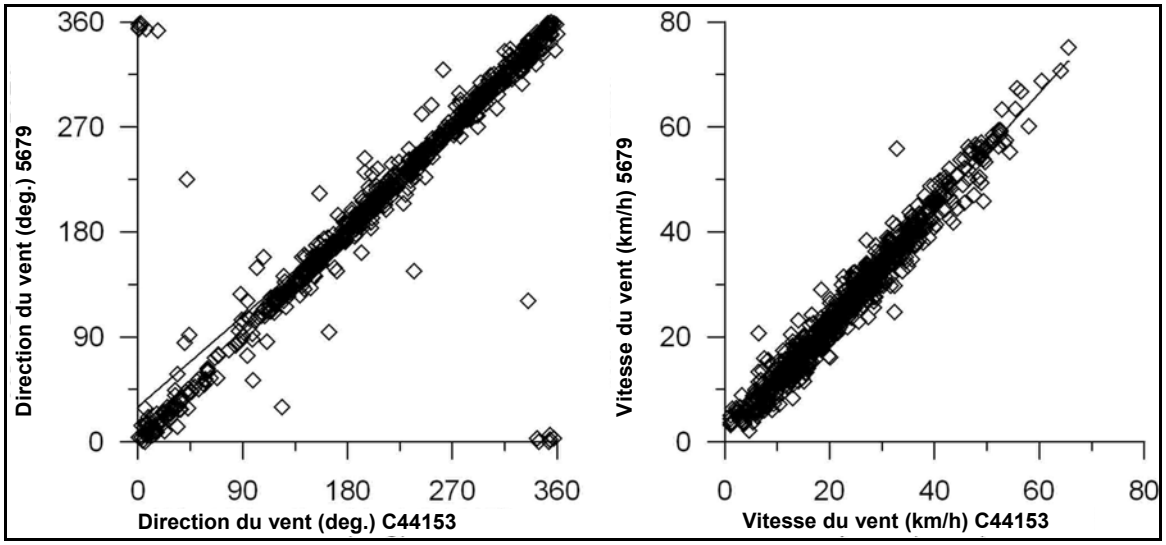


Figure 60. Vitesse et direction du vent au noeud de reconstruction 5679 comparées aux données mesurées par la bouée Irving Whale (C44153).

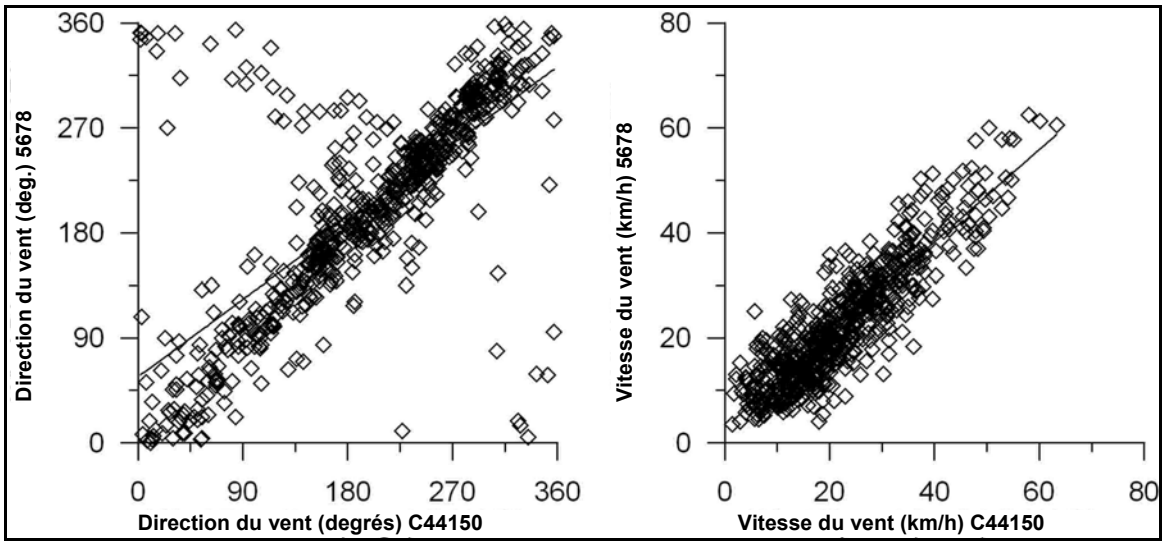


Figure 61. Vitesse et direction du vent au noeud de reconstruction 5678 comparées aux données mesurées par la bouée de Pointe-Sapin (C44150).

La figure 62 présente un graphique temporel du pourcentage de temps pendant lequel les vents soufflaient à plus de 40 km/h au noeud de reconstruction 5678. On constate des périodes notables de dépassement par des vents du nord-est en automne (septembre-décembre) : 1960, 1962-1966, 1967-1968, 1970, 1974-1982, 1985, 1987-1989, 1991, 1993, 1998-2001 et 2004. Ces périodes correspondent très bien aux périodes de vagues hautes (Section 4.2.10.5.2), ce qui était à prévoir, car les vagues sont reconstruites à partir des vents AES40.

Nous avons compilé une liste des épisodes de vents supérieurs ou égaux à 40 km/h au noeud de reconstruction 5678. La liste complète des 1 264 épisodes a été réduite à 165 épisodes avec une orientation moyenne du nord-est, puis à 58 épisodes automnaux du nord-est (septembre-décembre). L'occurrence annuelle de ces 58 épisodes est illustrée à la figure 63, qui montre une tendance à l'augmentation (moyenne mobile sur 7 ans de r^2 = 0,65), surtout depuis la fin des années 1980. Avant la fin des années 1980, les épisodes étaient sporadiques et, pendant de nombreuses années, il n'y en a pas eu. D'autres années, ils ont été fréquents (p. ex., 1970 et 1981). Après la fin des années 1980, on constate qu'il y a au moins un épisode par année, mais jamais plus de trois la même année (1996).

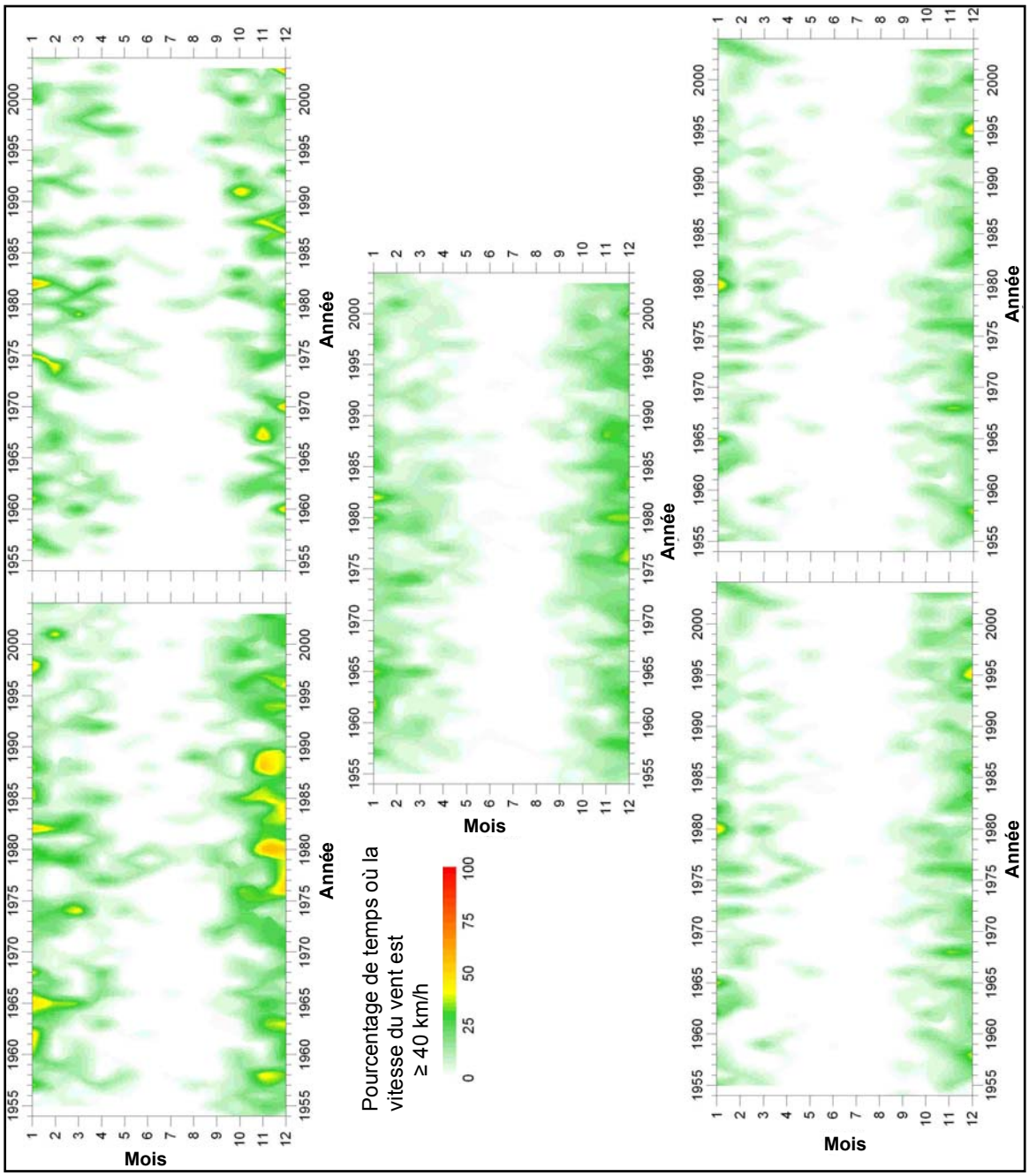


Figure 62. Graphique temporel du pourcentage de temps, pour chaque direction, pendant lequel le vent souffle à plus de 40 km/h au noeud de reconstruction 5678 AES40.

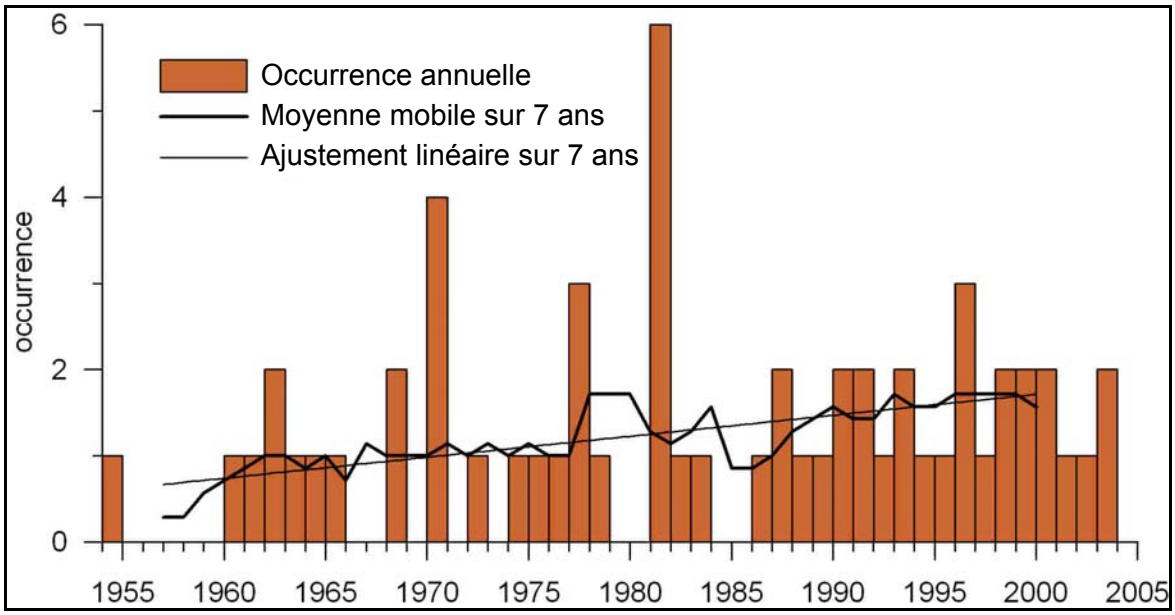


Figure 63. Occurrence annuelle des épisodes de vents automnaux du nord-est soufflant à au moins 40 km/h pendant au moins 6 heures au nœud 5678.

4.2.10.2.3 Épisodes de vent d'ici 2100

Méthodes et sources de données

Nous avons utilisé le logiciel SDSM V.3.1 (Wilby *et al.*, 2002) de réduction d'échelle statistique des vents, disponible gratuitement, conjointement avec les moyennes quotidiennes du scénario du climat du MCCG1 obtenues du Canadian Institute for Climate Studies (Boer *et al.*, 2000), pour effectuer une réduction d'échelle statistique des valeurs moyennes quotidiennes de la vitesse et de la direction des vents AES40 au nœud 5678. Nous utilisons les données de scénario d'un nœud de grille du modèle situé à 46°39'N, 63°75'O, près de Summerside (figure 58). La réduction d'échelle statistique change les scénarios élaborés à partir de modèles de climat, en l'occurrence la passe GES+A du MCCG1. Les données des stations, dans ce cas-ci les vents AES40 semi-modélisés au nœud 5678, sont utilisées pour étalonner certaines variables de modèle. Le scénario GES+A du MCCG1 ne couvre pas l'intervalle de 2000 à 2010.

Résultats

On a constaté, par corrélation et régression multiple, que les vitesses du vent étaient mieux représentées par les variables de scénario que sont la vitesse du vent en surface et la vitesse au niveau 800 hPa. Collectivement, ces données représentent 80 % de la variabilité observée de 1961 à 1990 au point 5678. Les moyennes quotidiennes des vitesses du vent AES40, ramenées à l'échelle entre 1961 et 1990, n'étaient pas très différentes ($\alpha = 0,05$) et les variances ne présentaient pas non plus de différence significative ($\alpha = 0,1$), bien que la figure 64 indique que la variance n'est pas bien représentée dans les prévisions. On n'a pas pu faire de réduction d'échelle des directions du vent. Le meilleur résultat a été obtenu avec, comme variables de scénario, la direction et la divergence du vent en surface et au niveau de 800 hPa. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec les variables relatives à la direction des vents et à la divergence en

surface ainsi qu'avec une pression atmosphérique de 800 hPa; cependant, ce scénario n'explique que 53 % de la variabilité directionnelle au point 5678. Les valeurs moyennes modélisées de la direction et de la dispersion entre les directions du vent AES40 se sont révélées différentes à tous les niveaux de signification, et n'ont donc pas été analysées plus à fond. Les vitesses du vent réduites à l'échelle entre 1961 et 2100 sont illustrées à la figure 64.

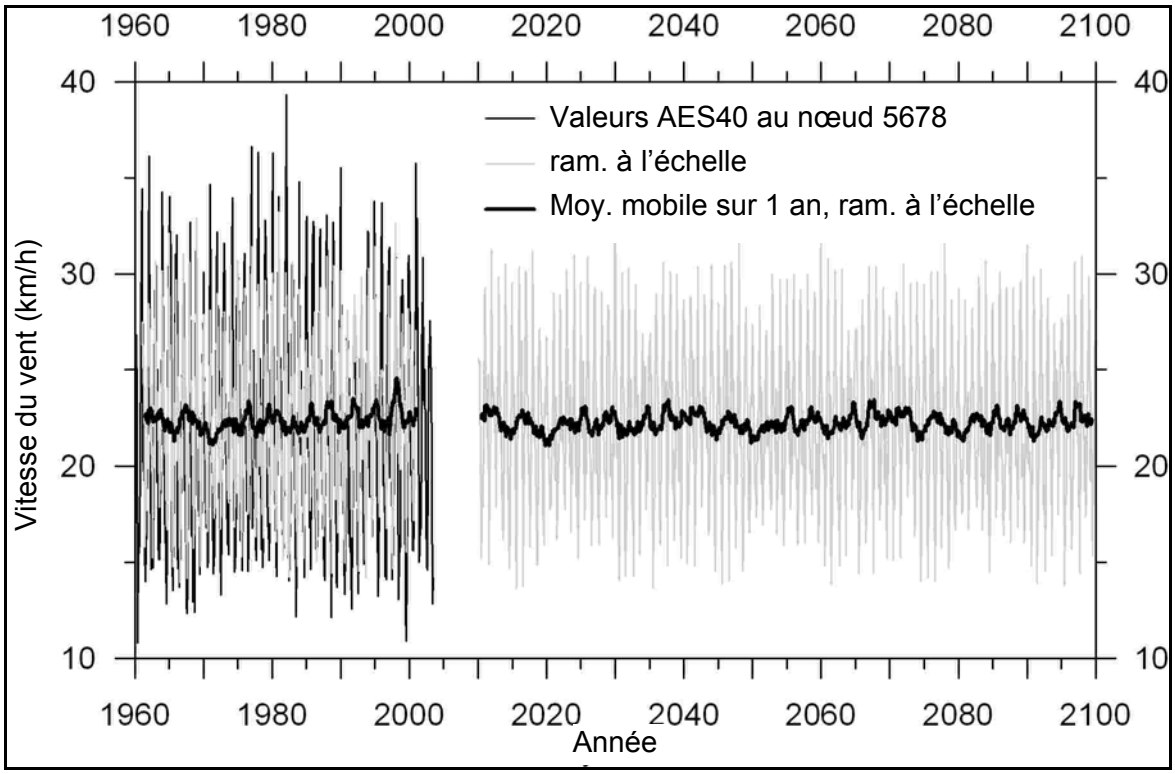


Figure 64. Vitesses du vent moyennes mensuelles ramenées à l'échelle entre 1961 et 2100, avec les vitesses du vent moyennes mensuelles AES40 entre 1960 et 2003. Les vitesses du vent ramenées à l'échelle reflètent exactement les moyennes, mais la variabilité est sous-estimée. Les épisodes extrêmes ne sont donc pas bien prévus.

La figure 64 montre que, dans cette analyse, aucune modification future de la vitesse moyenne mensuelle du vent n'est prévue. Toutefois, l'occurrence des épisodes extrêmes est plus importante que les moyennes mensuelles. Comme la variance n'est pas bien représentée dans la réduction d'échelle, on ne peut pas déterminer l'occurrence des épisodes extrêmes. Certaines recherches précédentes sur l'occurrence des tempêtes dans l'hémisphère Nord (Lambert, 1995, 2004) ont montré que la fréquence globale des cyclones devrait décroître légèrement, mais on ne prévoit aucun changement significatif de la trajectoire des tempêtes, et l'augmentation des épisodes intenses (c.-à-d. dans la tranche supérieure de 5 %) pourrait atteindre 17 % d'ici 2100. On peut conclure de ces résultats qu'il y aura une augmentation de la fréquence d'occurrence des épisodes automnaux du nord-est dans le sud du golfe du Saint-Laurent.

4.2.10.3 Vagues

4.2.10.3.1 Formation, influence du fond et déferlement des vagues

De l'avis général, les vagues sont la principale cause d'érosion du littoral et de dommages aux infrastructures côtières. Les vagues se forment au large pendant les tempêtes de vent et transportent l'énergie jusqu'au littoral, où elles sont absorbées ou réfléchies par les systèmes côtiers naturels et les ouvrages construits. Lorsqu'elles sont superposées à des niveaux d'eau plus élevés que la normale pendant les ondes de tempête, les grosses vagues peuvent causer l'érosion des côtes, accroître la mobilité des sédiments et endommager les infrastructures.

Le fetch est la distance sur laquelle le vent agit pour former les vagues. Cette distance est habituellement établie depuis la terre, du côté au vent, mais, dans le golfe du Saint-Laurent, la glace de mer peut également agir pour limiter le fetch. Un fetch plus long, et donc une durée plus grande pendant laquelle le vent agit sur l'eau, donne des vagues plus hautes (distance verticale entre la crête et le creux), plus longues (distance horizontale entre deux crêtes), et des périodes plus grandes (temps entre deux crêtes). Les vagues longues se déplacent plus rapidement que les courtes, et sont moins atténuées. Elles se propagent donc plus loin et peuvent quitter les environs immédiats d'une tempête. Les vagues longues peuvent précéder sous forme de houle une tempête qui s'approche mais, si la tempête se déplace rapidement, il peut y avoir de la houle et des vagues courtes formées localement dans ce que l'on appelle une mer entièrement levée. Il y a dans le golfe du Saint-Laurent de longues houles qui entrent par le détroit de Cabot, mais elles sont moins communes que les vagues courtes de formation locale.

À mesure que les vagues approchent de la côte, elles finissent par rencontrer le fond marin à une profondeur généralement égale à environ la moitié de leur longueur d'onde. Aux profondeurs d'un quart de longueur d'onde, des changements substantiels se produisent. Les vagues de tempête dans le golfe du Saint-Laurent peuvent avoir une longueur d'onde atteignant 200 m, ce qui permet de croire qu'elles subissent une transformation importante à des profondeurs de 50 m ou plus. Elles prennent de l'amplitude, et leur longueur d'onde et leur période raccourcissent. Sur un fond irrégulier, les parties de la vague qui sont dans les eaux peu profondes se déplacent plus lentement que celles qui sont dans les eaux plus profondes; la vague est alors réfractée et diffractée, ce qui modifie sa hauteur et sa direction, ainsi que le transport de sédiments.

À mesure que monte le fond marin, la hauteur de la vague augmente et sa longueur d'onde diminue, et certaines parties de la vague commencent à se briser. Cela se produit habituellement quand la hauteur de la vague non brisée atteint environ 78 % de la profondeur de l'eau (Komar, 1998). En maints endroits de la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, il y a des barres près de la côte, de sorte que les vagues peuvent se briser, se reformer dans les creux en arrière de la barre, puis se briser sur une autre barre plus proche du littoral, et on observe souvent, sur ce type de littoral, des bandes de vagues déferlantes. Avec chaque bris de la vague, il y a dissipation d'énergie. Quand une vague se brise sur la plage, le résultat varie selon la pente que lui offre la plage. Sur les plages peu pentues (pente inférieure à ~ 0,025), on a plutôt des déferlements à déversement, qui dissipent leur énergie sur une grande largeur de plage. Sur les plages plus pentues (pentes supérieures à ~ 0,10), on observe des déferlements à volute qui dispersent leur énergie sur une très faible largeur de littoral (Galvin, 1968; Gaughan et Komar, 1975).

Les déferlements à volute peuvent provoquer l'érosion de la partie supérieure des plages, des dunes ou du pied des falaises, et endommager les infrastructures côtières, lorsque les vagues sont superposées aux niveaux d'eau qui sont plus élevés que la normale et qui accompagnent les ondes de tempête.

Le dernier stade de la rupture d'une vague est le jet de rive, quand la nappe de la vague brisée s'étale sur la plage. La hauteur du jet de rive est exprimée sous la forme d'intervalle de dépassement, qui est habituellement décrit comme une fonction empirique de la hauteur et de la longueur de la vague en eau profonde, de la hauteur de la vague se brisant et de la pente de la plage (Battjes, 1974; Komar, 1998; Kraus, 1990; Smith et). Kraus, 1990). Pendant les tempêtes accompagnées d'ondes de tempête, le jet de rive peut recouvrir d'eau les plages et les structures côtières, transporter des débris et causer des inondations importantes à l'intérieur des terres.

4.2.10.3.2 Vagues depuis 1954

Méthodes et sources de données

Nous avons obtenu du Service des données sur le milieu marin (SDMM), de Pêches et Océans Canada, diverses données que nous avons compilées dans une base de données : données historiques sur la hauteur et la période des vagues, parfois leur direction, parfois avec les données météorologiques associées (p. ex., vitesse et direction du vent), provenant de 22 bouées à vague différentes situées dans le sud du golfe du Saint-Laurent (figure 58). La collecte de ces données a commencé au début des années 1970, mais les enregistrements d'une bouée particulière sont souvent courts, rarement plus d'un été, et contiennent rarement des épisodes significatifs. Parmi les stations qui ont enregistré des épisodes notables figurent Irving Whale (C44153) et Pointe-Sapin (MEDS152) (figure 65).

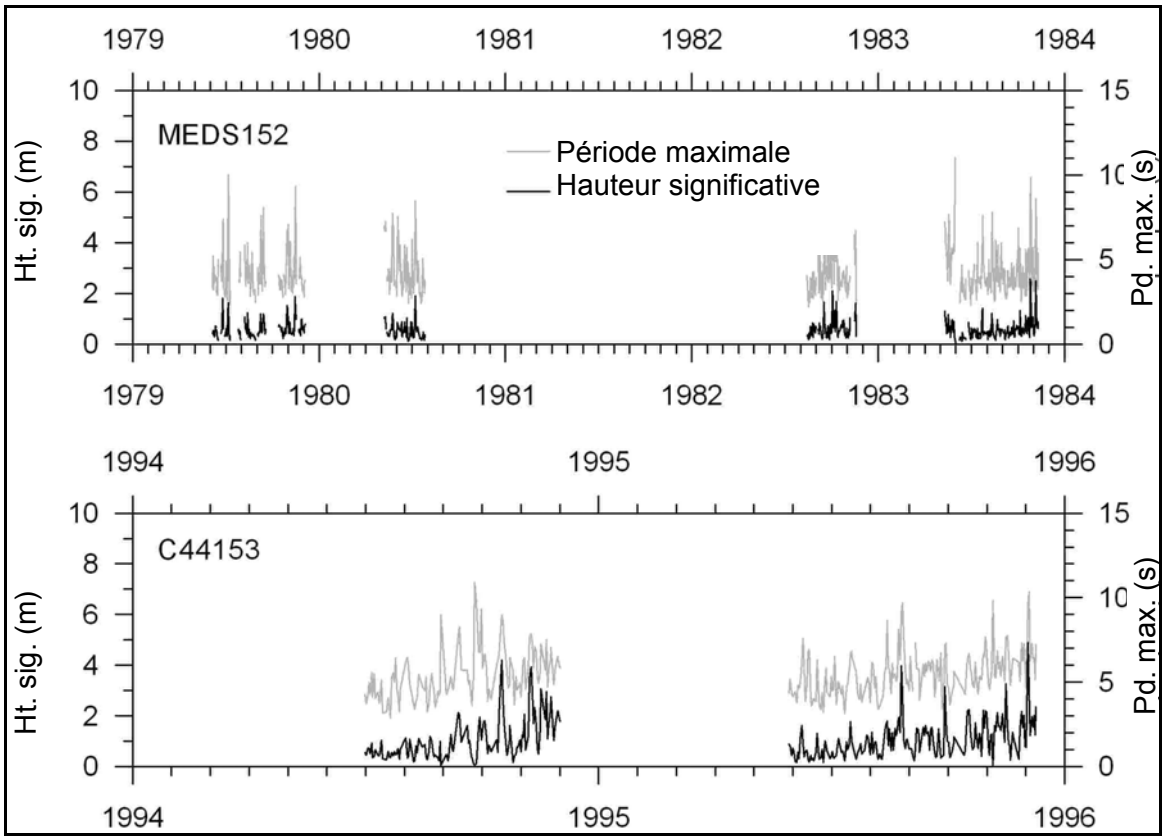


Figure 65. Moyennes quotidiennes des vagues mesurées par les stations Irving Whale (C44153) et Pointe-Sapin (MEDS152).

Trois stations étaient opérationnelles pendant le projet : Pointe-Sapin (C44150), Gros-Cap (C44132) et Cap-des-Caissie (C44161). Les bouées à ces stations ont été déployées et récupérées par les navires NGCC *Opilio* et NGCC *Terry Fox*. En 2003, deux bouées ont été déployées. La bouée de Pointe-Sapin (C44150), une Watchkeeper déployée dans 28 m d'eau, a fonctionné de juillet à décembre, mais une bouée Waverider Triaxys à Gros-Cap a été heurtée par un navire et les données n'ont pas pu être récupérées. En 2004, trois bouées ont été déployées. La bouée Discus de 3 m à Pointe-Sapin (C44150) a été déployée dans 28 m d'eau à la fin de mai et a été récupérée à la fin de décembre, la bouée Waverider Triaxys à Gros-Cap (C44132) a été déployée dans 14 m d'eau à la mi-septembre et récupérée à la fin de décembre, et la bouée Watchkeeper à Cap-des-Caissie (C44161) a été déployée à la fin de mai dans 11 m d'eau et récupérée au début de janvier. En 2005, seule la bouée Watchkeeper de Pointe-Sapin a été déployée, dans 28 m d'eau, cette fois au début de juin, et elle a été récupérée à la fin de décembre. Les données enregistrées sont présentées à la figure 66.

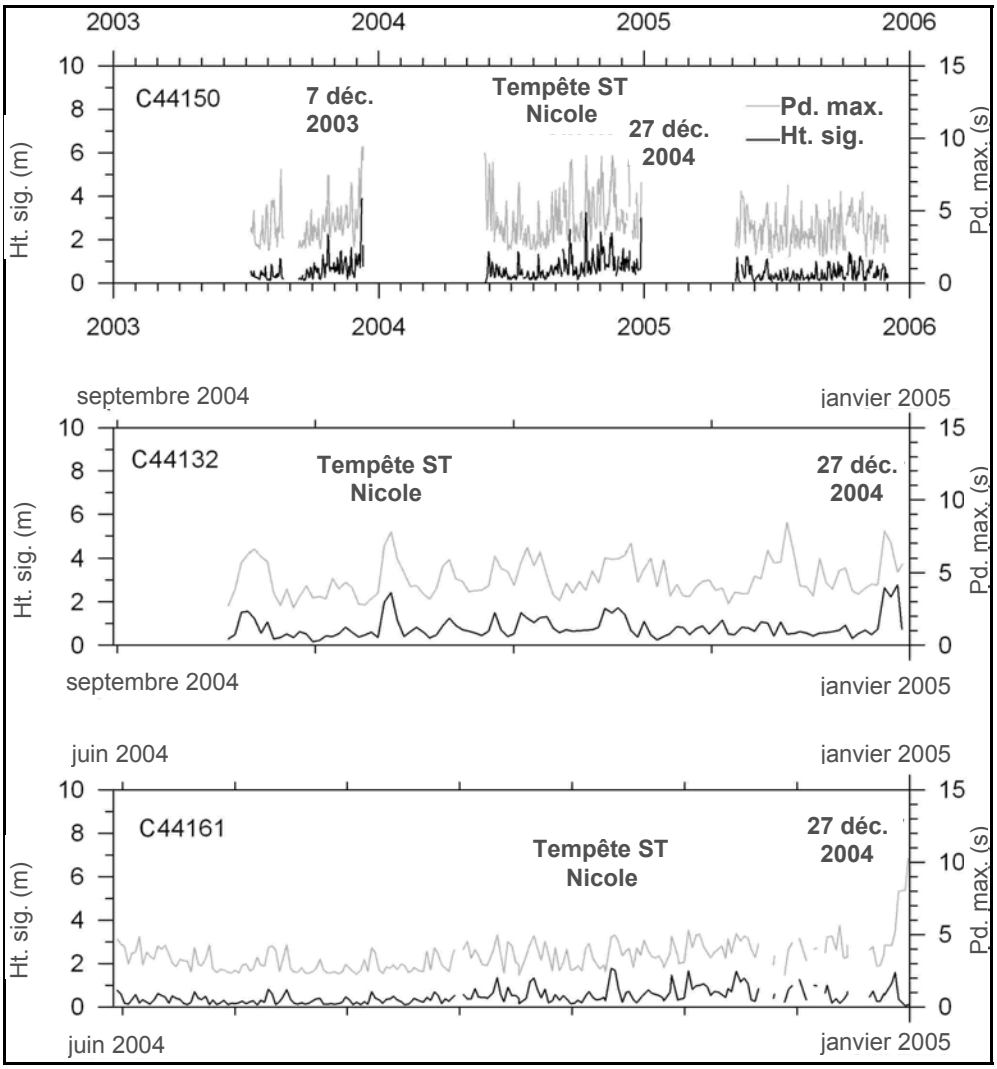


Figure 66. Hauteur significative moyenne quotidienne et période maximale des vagues mesurées dans le cadre de la présente étude.

Outre les vagues mesurées, on dispose également de données sur les vagues reconstruites AES40 dans le sud du golfe du Saint-Laurent (Swail *et al.*, 1998; Swail *et al.*, 2000). Cet ensemble de données comprend, entre autres variables, des valeurs horaires reconstruites sur 6 heures pour la hauteur, la période et la direction des vagues, ainsi que pour la vitesse et la direction du vent. On a incorporé les glaces de mer dans la reconstruction à partir de 1972. En raison de la longueur et de la cohérence de cet enregistrement, la majeure partie des analyses des vagues porteront sur deux nœuds de reconstruction adjacents à la zone à l'étude (5678 et 5679; figure 58). Les données mesurées seront utilisées pour valider la reconstruction.

Résultats

Les bouées à vague déployées pendant cette étude ont enregistré plusieurs épisodes de vagues importantes (figure 67), particulièrement en 2004 quand la tempête subtropicale

(TST) Nicole est passée dans la zone à l'étude les 11 et 12 octobre, et une dépression hivernale intense est passée le 27 décembre 2004. Ces données sont résumées au tableau 12. La TST Nicole a déplacé la bouée de Gros-Cap d'environ 30 m vers le sud-est (on ne sait pas trop si cela était dû à l'allongement des câbles d'amarrage ou au déplacement du poids d'amarrage); l'épisode du 27 décembre a rompu l'amarrage de la bouée de Cap-des-Caissie, qui est partie à la dérive.

La disposition des bouées en 2004 montre le régime variable des vagues sur la côte sud-est du Nouveau-Brunswick. Pendant la TST Nicole et probablement pendant la dépression du 27 décembre, les hauteurs des vagues significatives les plus grandes ont été enregistrées à Pointe-Sapin, puis elles ont diminué en direction sud-est vers Cap-des-Caissie. Les valeurs maximales de hauteur et de période des vagues présentaient des tendances similaires, sauf qu'elles ne semblent pas avoir été mesurées de manière comparable par la bouée Triaxys de Gros-Cap. Il faut noter que les estimations des valeurs maximales des vagues sont plus sujettes à des erreurs. Les vents maximaux de tempête étaient comparables à Pointe-Sapin et à Cap-des-Caissie, et présentaient des origines similaires, soit le nord-est, de sorte que les différences dans les vagues de tempête étaient probablement attribuables au fait que le fetch du nord-est est moindre dans les parties sud-est de la zone à l'étude. Le tableau 12 présente également un épisode datant du 7 décembre 2003, qui a été mesuré seulement par la bouée de Pointe-Sapin. Aucun épisode significatif n'a été enregistré dans le sud du golfe du Saint-Laurent en 2005.

La bouée Irving Whale (C44153) et le noeud de reconstruction 5679 AES40, étant assez proches l'un de l'autre (15 km), permettent de valider les reconstructions AES40. La hauteur des vagues significatives est correctement prévue ($r^2 = 0,89$), tandis que la période maximale est mal prévue ($r^2 = 0,32$). On croit que cette piètre performance est attribuable essentiellement à la difficulté de mesurer la période des petites vagues, car les valeurs aberrantes de longue période dans la figure 67, pour la bouée C44153, concernent exclusivement des petites vagues.

Tableau 12. Statistiques des épisodes de vagues mesurés pendant cette étude.

Épisode	Station	Hauteur significative (m)	Hauteur maximum (m)	Période maximum (s)	Vitesse vent maximum (km/h)	Direction vent pointe (deg.)
7 déc. 2003	C44150	4,7	10,4	9,9	63	50
TST Nicole	C44150	4,8	11,6	9,9	63	33
TST Nicole	C44132	3,3	6,9	10,0	s.o.	50*
TST Nicole	C44161	3,2	10,8	6,4	64	26
27 déc. 2004	C44150	3,8	8,1	7,4	55	45

27 déc. 2004	C44132	3,6	6,7	9,5	s.o.	45*
27 déc. 2004	C44161	2,4**	4,5**	5,3**	58	26

* Direction des vagues : contrairement à la convention océanographique, nous indiquons la provenance des vagues et non leur direction de propagation, afin de les comparer aux vents. **Données manquantes à la hauteur des tempêtes.

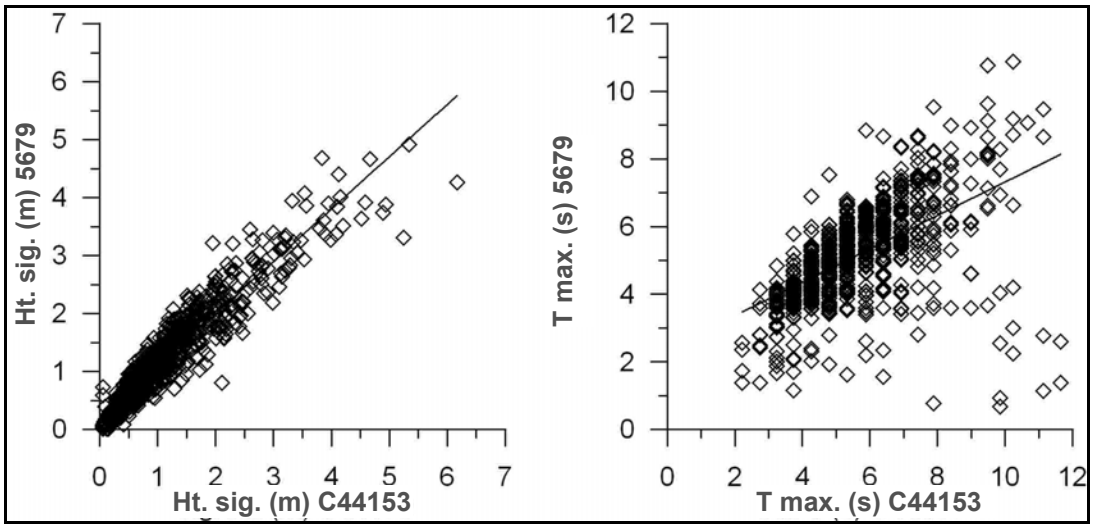


Figure 67. Mesures correspondantes de la hauteur des vagues significatives et de la période maximale par la bouée Irving Whale (C44153), par rapport à la reconstruction de la hauteur des vagues significatives et de la période maximale au nœud 5679 AES40.

On peut faire un test similaire pour le nœud 5678 et les stations de Pointe-Sapin (MEDS153 et C44150), mais, comme la distance entre les mesures et les positions reconstruites (69 km) donne des fetchs différents et des moments d'arrivée légèrement différents pour les vagues de tempête, on constate un accord moindre entre les hauteurs des vagues significatives ($r^2 = 0,55$) et la période maximale ($r^2 = 0,23$) (figure 68). De nouveau, la période maximale est particulièrement mal corrélée. Dans ce cas-ci, il est manifeste qu'aucune période de moins de 2 s n'a été mesurée, ce qui semble confirmer que les périodes des petites vagues ne sont pas mesurées, ou encore que les données correspondantes sont annulées en raison d'un contrôle de qualité excessif.

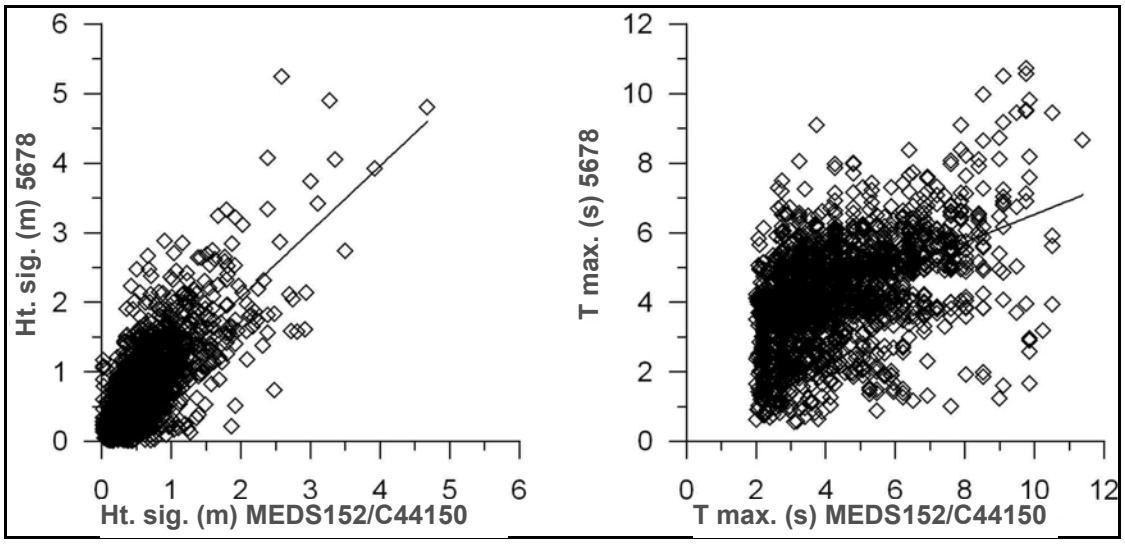


Figure 68. Mesures correspondantes de la hauteur des vagues significatives et de la période maximale par la bouée de Pointe-Sapin (MEDS152 et C44150), par rapport aux valeurs reconstruites de la hauteur des vagues significatives et des périodes maximales au nœud 5678 AES40.

Bien que l'accord entre les données reconstruites du nœud 5678 et celles de la bouée de Pointe-Sapin soit faible, la bonne concordance entre celles du nœud 5679 et de la station Irving Whale indique que les données reconstruites sont localement exactes. On pouvait s'y attendre, parce que les données de vent mesurées sont utilisées pour entraîner les prévisions de vent dans AES40, lesquelles servent ensuite à reconstruire les vagues. Plus un noeud de reconstruction est proche d'un site où le vent est mesuré, plus exactes sont les prévisions à ce nœud. Les analyses subséquentes porteront sur le nœud 5678, en présumant que le nœud 5678 est aussi exact que le nœud 5679 pour prévoir la hauteur de vague significative locale et que la position rapprochée du nœud 5678 pour étudier la zone reflète mieux son régime de vague, et en reconnaissant que les hauteurs horaires des vagues significatives au nœud 5678 reflètent seulement un peu plus de la moitié de la variabilité de la hauteur des vagues significatives à la station de Pointe-Sapin.

Les graphiques temps-temps du pourcentage mensuel de fois où la hauteur reconstruite des vagues significatives au nœud 5678, dépassant 3 m, sont présentés à la figure 69. Les cinq panneaux présentent la hauteur des vagues significatives par mois et par année, ce qui illustre la variabilité saisonnière. Ces données sont présentées dans le panneau du centre pour toutes les directions (c.-à-d. le pourcentage de temps où les vagues sont supérieures ou égales à 3 m, toutes directions confondues), et dans les quatre autres panneaux pour chaque quadrant directionnel (c.-à-d. le pourcentage de temps où les vagues du nord-est sont supérieures ou égales à 3 m).

Comme le montre la figure 69, les vagues supérieures à 3 m sont le plus souvent du nord-est, les vagues du nord-est le plus souvent à l'automne (septembre à décembre), et il y a plusieurs périodes de durée variable pendant lesquelles il y a eu plus fréquemment

des vagues du nord-est en automne, à savoir : 1960-1966, 1968,1970, 1974, 1977-1981, 1986-1988, 1991, 1998-2000 et 2003-2004.

Nous avons analysé les vagues reconstruites au nœud 5678, afin de trouver les épisodes d'amplitude égale ou supérieure à 3 m pendant au moins 6 heures. Les 206 épisodes identifiés ont été réduits à ceux dont l'orientation moyenne des vagues était du NE (90 épisodes), et ce nombre a encore été réduit en un sous-ensemble d'épisodes avec direction moyenne du vent du NE et survenant à l'automne (septembre-décembre). Ce sous-ensemble final contenait 53 épisodes. La figure 70 présente une série chronologique d'occurrences annuelles. Ces épisodes sont survenus particulièrement dans les périodes 1960-1966, 1968, 1970, 1974, 1977-1978, 1981, 1983, 1986-1987, 1991, 1993,1995, 1998-2000 et 2004, qui correspondent assez bien aux périodes de vagues du NE plus fortes, à la figure 69.

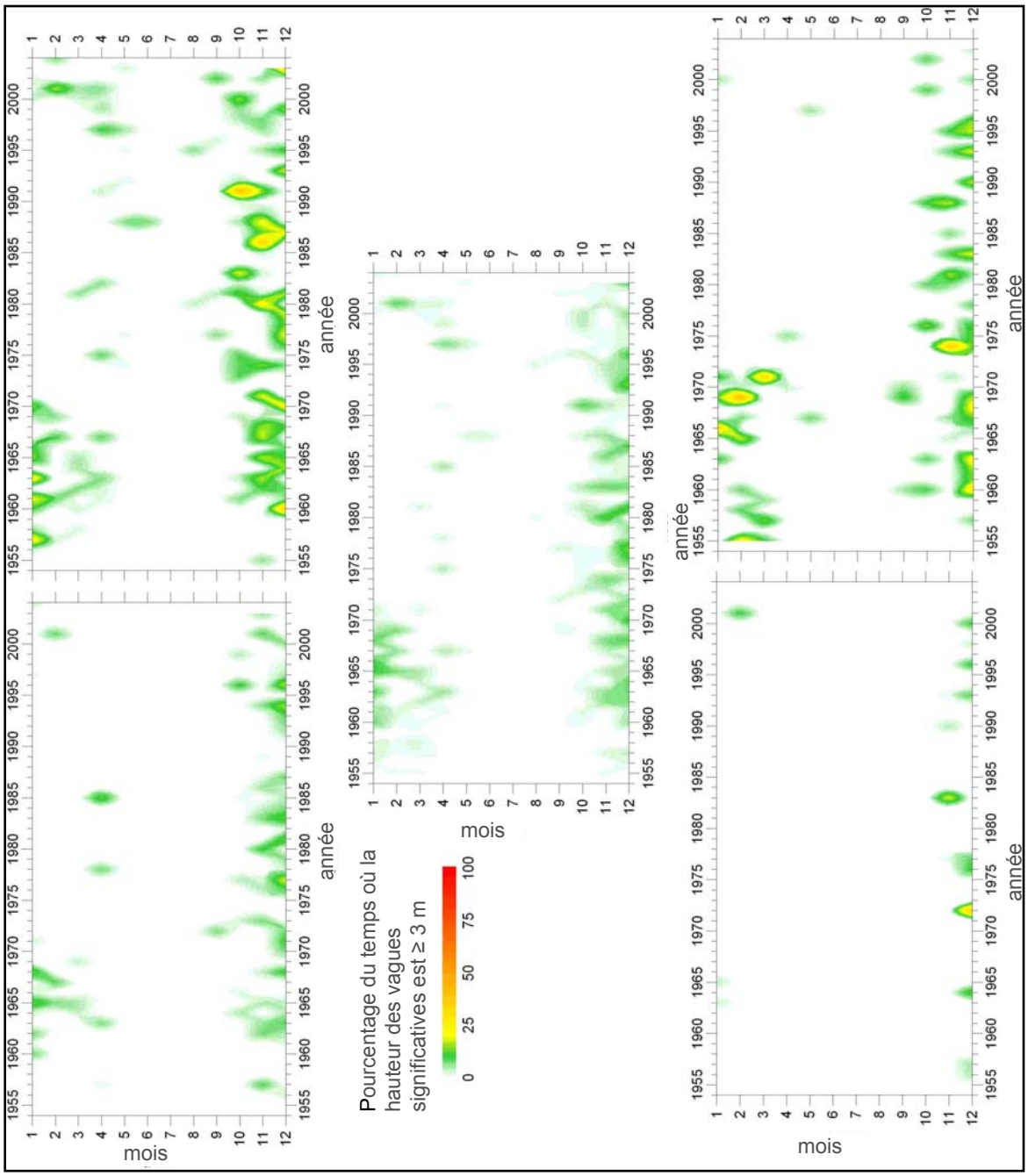


Figure 69. Graphiques temps-temps du pourcentage moyen de dépassement de la hauteur des vagues significatives de 3 m, au nœud 5678 de reconstruction AES40. La glace n'était pas incluse dans les reconstructions avant 1972.

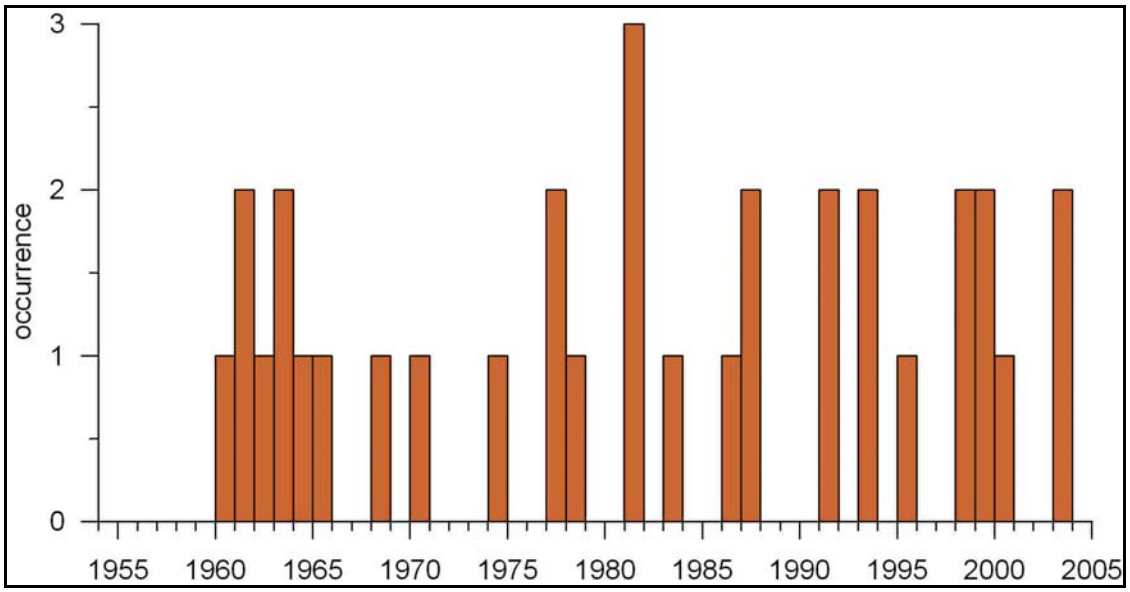


Figure 70. Occurrence automnale des épisodes de vagues au nœud 5678 dont les hauteurs significatives sont supérieures ou égales à 3 m pendant au moins 6 heures et dont la provenance moyenne est le nord-est.

4.2.10.3.3 Vagues d'ici 2100

Méthodes et sources des données

Nous avons utilisé le logiciel SDSM V.3.1 (Wilby *et al.*, 2002) de réduction d'échelle statistique des vents, disponible gratuitement, conjointement avec les moyennes quotidiennes du scénario du climat MCCG1 pour le nœud de grille 46°39'N, 63°75'O obtenues du Canadian Institute for Climate Studies (Boer *et al.*, 2000), pour effectuer une réduction d'échelle des valeurs moyennes quotidiennes de la vitesse et de la direction des vents AES40 au nœud 5678 (voir la section 4.2.10.2.3 pour plus de détails). La relation entre la vitesse du vent et la hauteur des vagues significatives pour la reconstruction de 1954 à 2004 (figure 71) a ensuite servi à calculer la hauteur future des vagues pour la période 2000 à 2100.

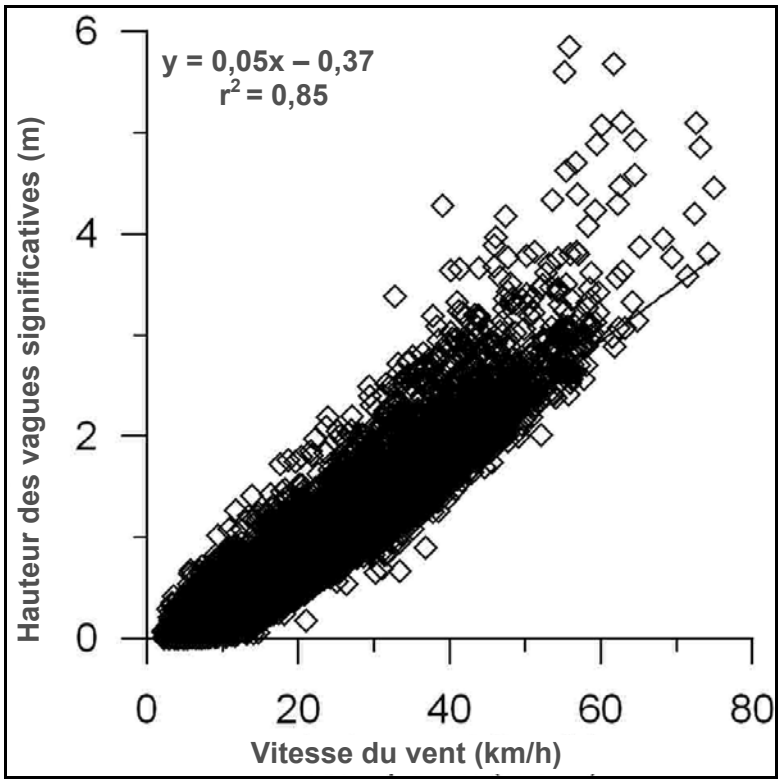


Figure 71. Valeurs moyennes quotidiennes de la hauteur des vagues significatives par rapport à la vitesse du vent au nœud 5678, 1954 à 2004.

Résultats

La figure 72 montre que les vagues ramenées à l'échelle ne présentent pas la variabilité des vagues reconstruites. Cela est attribuable au fait que les vents à réduction d'échelle ne reflètent pas la variabilité des vents reconstruits. Tout comme pour les vents, on ne constate aucune tendance future. La comparaison montre néanmoins que, dans les vagues reconstruites d'après 1971, la hauteur des vagues devient nulle en hiver (janvier-avril), ce qui laisse supposer qu'en l'absence de glace, les vagues ne seraient pas différentes dans l'avenir de ce qu'elles sont aujourd'hui.

Toutefois, il y a de nos jours de la glace, qui restreint le fetch et la hauteur des vagues hivernales (voir la figure 69). Le principal problème associé au changement climatique et qui touche le sud-est du Nouveau-Brunswick peut donc être l'absence de glace ou la quasi-absence dans le sud du golfe du Saint-Laurent, où des vagues d'hiver peuvent se former et donc prolonger la saison d'érosion active.

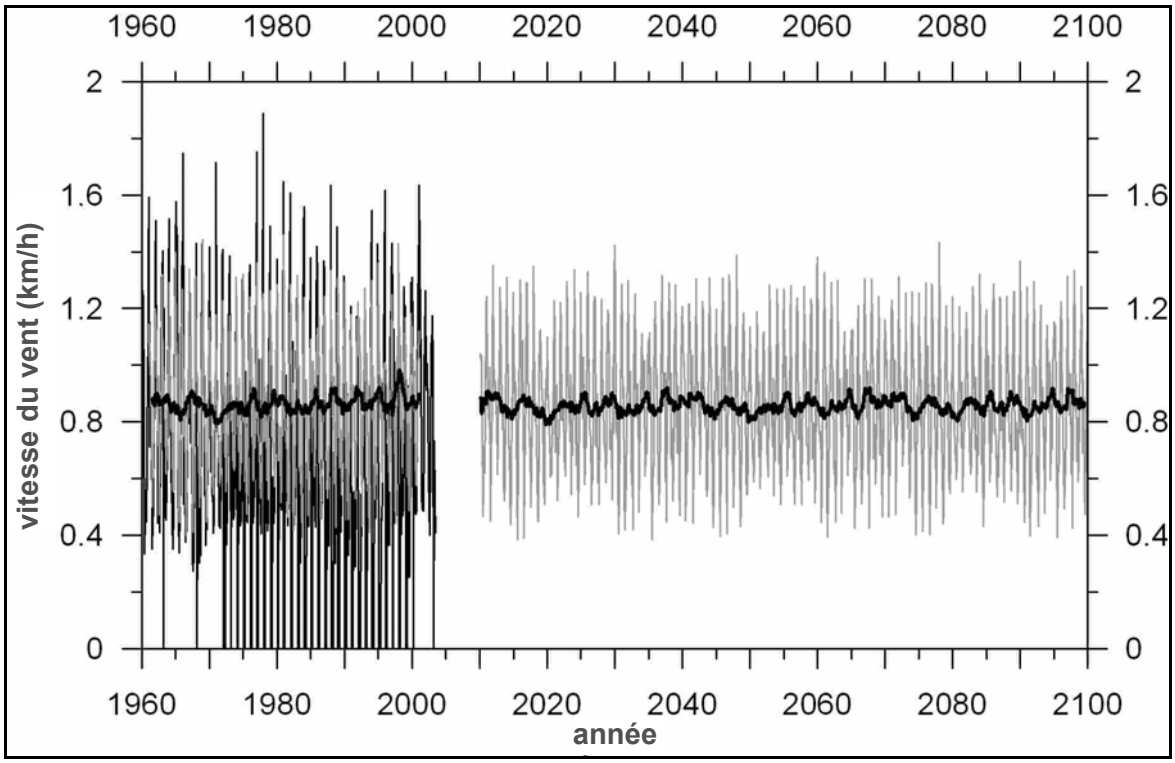


Figure 72. Valeurs moyennes mensuelles de la hauteur des vagues significatives ramenées à l'échelle pour 1961 à 2100, avec valeurs correspondantes AES40 entre 1960 et 2003. Tout comme pour les vents, les épisodes extrêmes ne sont pas bien prévus. Les reconstructions AES40 pour avant 1972 ne comprennent pas de glace, ni de vagues dérivées des vents à réduction d'échelle.

4.2.11 Climatologie des glaces de mer

La fonte des glaciers et des glaces de mer annoncée dans l'Arctique par différents scénarios du changement climatique sera en partie responsable de la hausse du niveau de la mer prévue dans le golfe du Saint-Laurent dans l'avenir. De plus, on sait que la présence des glaces de mer dans le golfe du Saint-Laurent a un effet modérateur sur les vagues et sur les impacts reliés aux effets des vagues associés avec les ondes de tempête. On s'attend à ce que l'érosion des côtes s'accentue si les glaces de mer dans le golfe devaient fondre, comme le prévoient les scénarios du changement climatique pour l'avenir.

En 2002, dans le cadre d'une étude similaire des incidences du changement climatique et de la hausse du niveau d'eau sur la côte de l'Île-du-Prince-Édouard, le Service canadien des glaces (SCG) avait réalisé une mise à jour de la climatologie des glaces de mer dans le golfe du Saint-Laurent. On a étudié la variabilité de la couverture glacielle d'une décennie à l'autre et d'une année à l'autre, et on a dérivé un indice de la sévérité des conditions des glaces. Cette information est requise pour des études quantitatives de l'effet des glaces de mer sur les vagues et les ondes de tempête.

Pour la présente étude qui porte sur la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, on applique la même climatologie des glaces de mer pour le golfe du Saint-Laurent. On dérive de nouveaux indices de la sévérité des conditions des glaces et l'on inclut la variabilité d'une année à l'autre pour la région préoccupante.

4.2.11.1 Climatologie actuelle des glaces de mer dans le golfe du Saint-Laurent

Le Service canadien des glaces surveille les conditions des glaces dans le golfe du Saint-Laurent depuis la fin des années 1950, en appui aux activités maritimes. Des cartes quotidiennes des glaces représentant les concentrations et l'épaisseur des glaces sont préparées à l'aide d'observations visuelles effectuées depuis la rive ou à bord d'embarcations et à l'aide de données de reconnaissance aérienne et (plus récemment) de télédétection, acquises par des capteurs aéroportés et des capteurs aérospatiaux. Depuis 1968, le SCG prépare également des cartes régionales hebdomadaires des glaces représentant les conditions glacielles dans le golfe et pour la côte est canadienne. Dans le cadre de la présente étude, on utilise ces cartes régionales hebdomadaires des glaces pour la période de 1971 à 2000 pour décrire la climatologie actuelle des conditions des glaces dans le golfe du Saint-Laurent.

4.2.11.1.1 Produits climatiques et base de données de cartes numériques du SCG

Les cartes régionales hebdomadaires des glaces du SCG pour la période de 1971 à 2000 ont été numérisées en format vectoriel et un progiciel SIG a été utilisé pour générer un ensemble de produits statistiques hebdomadaires. On présente ici un sous-ensemble de ces produits hebdomadaires utilisés pour décrire la climatologie des glaces de mer dans le golfe du Saint-Laurent :

- Cartes des dates d'englacement et de débâcle (figures 73 et 74)
- Ces cartes montrent les dates de formation des glaces, soit de la première apparition de la glace dans le golfe jusqu'à la formation de la couverture maximale, et de la désintégration de la glace, soit de la couverture maximale de glace jusqu'à sa disparition complète. On considère qu'il y a formation de glace lorsque la concentration est de 1/10 ou plus (c.-à-d., que 10 % ou plus de la superficie de la région est couverte de glace). On considère qu'il y a désintégration de la glace lorsque la concentration de la glace diminue par rapport à sa valeur maximale.
- Cartes de la concentration totale (figures 75A à 82A)
- Ces cartes montrent la concentration médiane de glace dans le golfe pour diverses dates, du début de la saison des glaces à la fin de celle-ci.
- Cartes du type de glace prédominant (figures 75B à 82B)
- Ces cartes représentent les valeurs médianes du type de glace prédominant lorsqu'il y a de la glace dans le golfe du Saint-Laurent, pour les mêmes dates que celles mentionnées ci-haut, du début à la fin de la saison des glaces.

Un examen des figures 73 à 82 nous permet de décrire la climatologie des glaces dans le golfe du Saint-Laurent.

4.2.11.1.2 Formation normale de glace

Au début ou à la mi-décembre, les glaces commencent à se former dans le fleuve Saint-Laurent et dans l'estuaire du Saint-Laurent ainsi que dans les eaux côtières peu profondes du Nouveau-Brunswick; au cours de la deuxième moitié de décembre, les glaces se forment dans les zones côtières du détroit de Northumberland, qui se trouve entièrement couvert de glace à la fin du mois. À la fin du mois de décembre, la glace se forme également dans le détroit de Belle Isle ainsi que le long de la rive nord du golfe du Saint-Laurent. En janvier, la formation de glace dans le golfe progresse plus rapidement vers l'est qu'elle ne le fait en direction sud depuis la rive nord et à la fin de janvier, elle couvre la majeure partie du golfe, à l'exception de la partie sud de la côte ouest de Terre-Neuve. À la fin du mois de février, le golfe est entièrement couvert de glace.

4.2.11.1.3 Concentrations normales de glace et épaisseur

Dès le 1er janvier, on trouve généralement des concentrations de 9-9+ de glace grise dans le détroit de Northumberland. Le 15 janvier, la glace grise s'étend jusqu'à la rive nord de l'Île-du-Prince-Édouard et la glace présente dans le détroit de Northumberland devient blanchâtre. À la fin du mois de janvier, les concentrations de glace sont de 9-9+ dans la majeure partie du golfe (à l'exception de la partie sud de la côte ouest de Terre-Neuve) et la glace est alors blanchâtre dans sa partie sud, tandis que de la glace de première année apparaît dans le détroit de Northumberland. L'épaisseur de la glace continue d'augmenter en février et à la fin du mois, toute la moitié sud du golfe est couverte de glace de première année et les concentrations sont de 9-9+ dans tout le golfe.

4.2.11.1.4 Fonte normale de la glace

Au début du mois de mars, les concentrations commencent à diminuer, tout d'abord dans le fleuve Saint-Laurent et ensuite, dans l'estuaire et la partie nord-ouest du golfe à la mi-mars. Au cours de la deuxième moitié de mars, les concentrations de glace diminuent dans le milieu du golfe. Dans le détroit de Northumberland, la couverture glacielle diminue pendant la dernière semaine de mars et, au début d'avril, on trouve de faibles concentrations de glace. À la mi-avril, la majeure partie du golfe est libre de glace, à l'exception de la baie Northern Arm, où il y aura de la glace jusqu'à la troisième semaine de mai. À noter que les formes de glace les plus minces fondent en premier et que les autres formes de glace plus épaisses sont prédominantes, comme on peut l'observer sur les cartes.

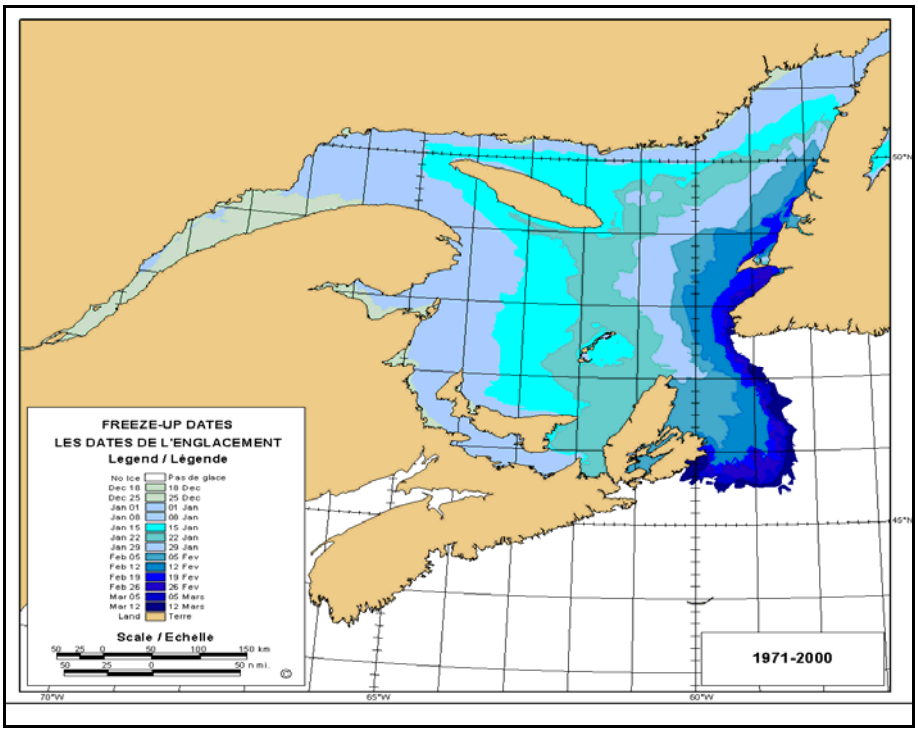


Figure 73. Dates d'englacement normal

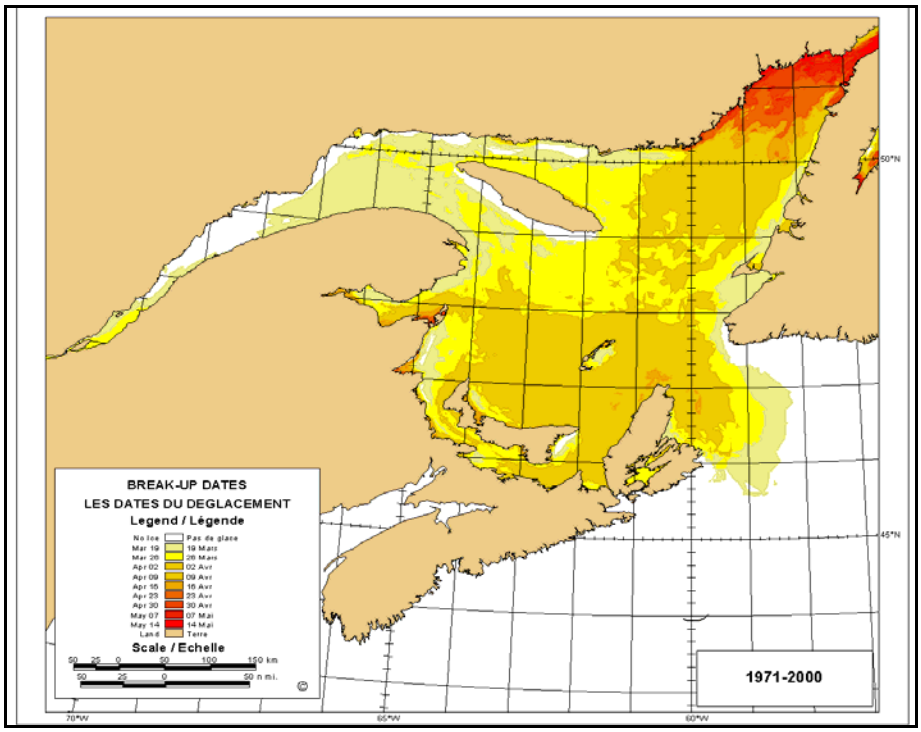


Figure 74. Dates de déglacement normal

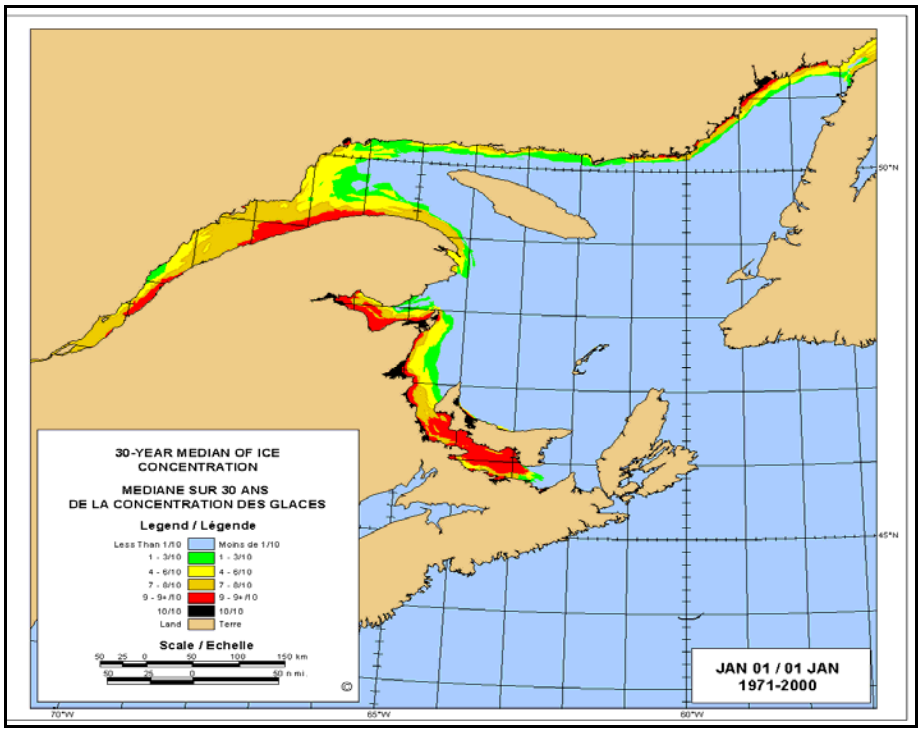


Figure 75A. Médiane sur 30 ans de concentration totale (1971-2000) – 01 janvier

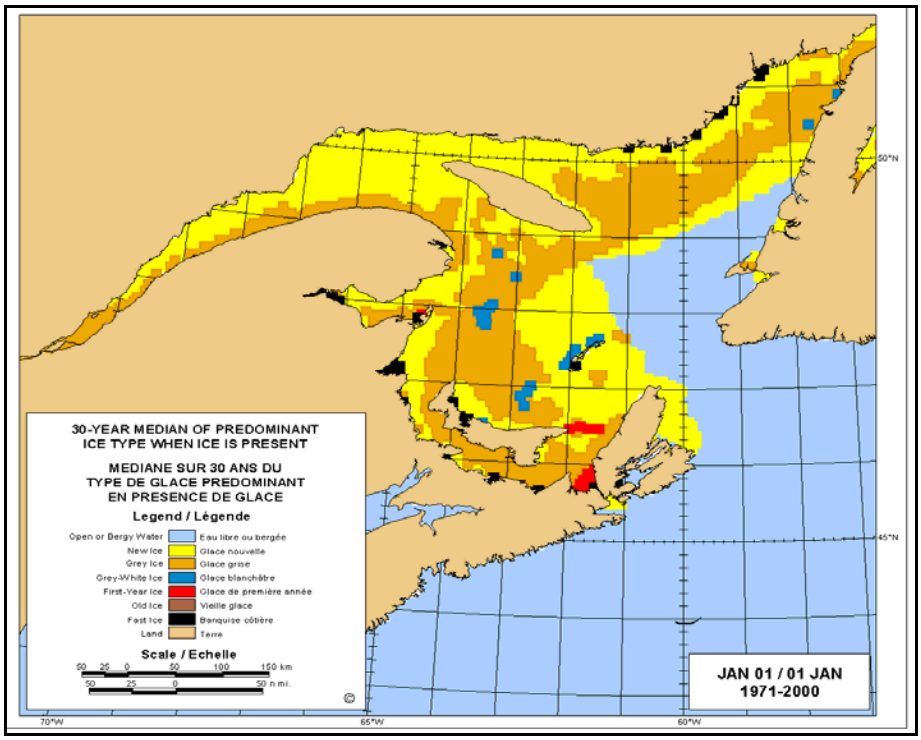


Figure 75B. Médiane sur 30 ans du type prédominant en présence de glace (1971-2000) – 01 janvier

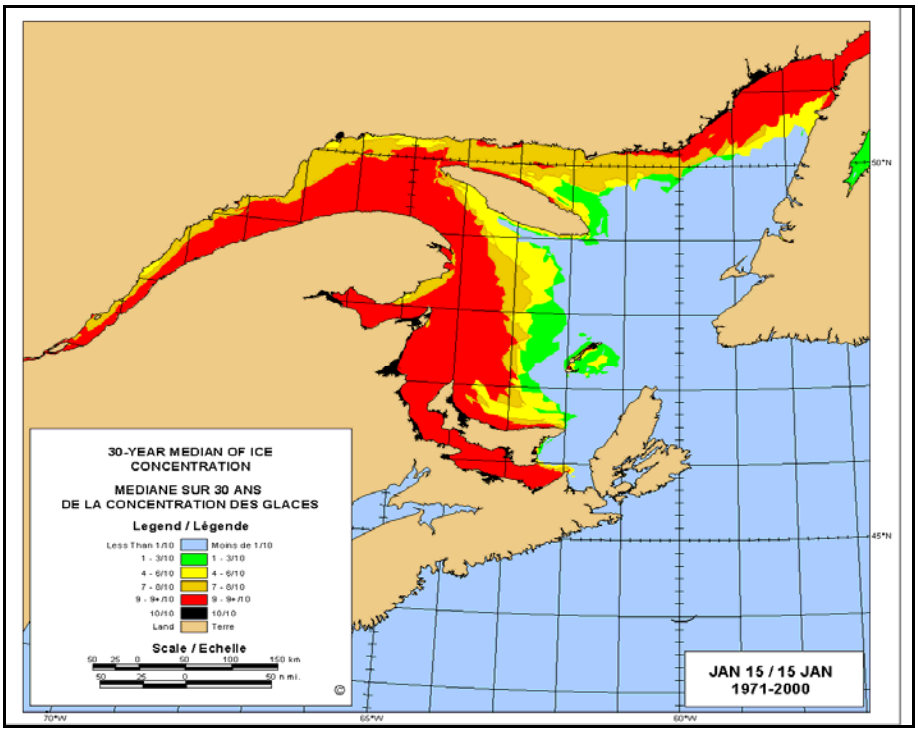


Figure 76A. Médiane sur 30 ans de concentration totale (1971-2000) – 15 janvier

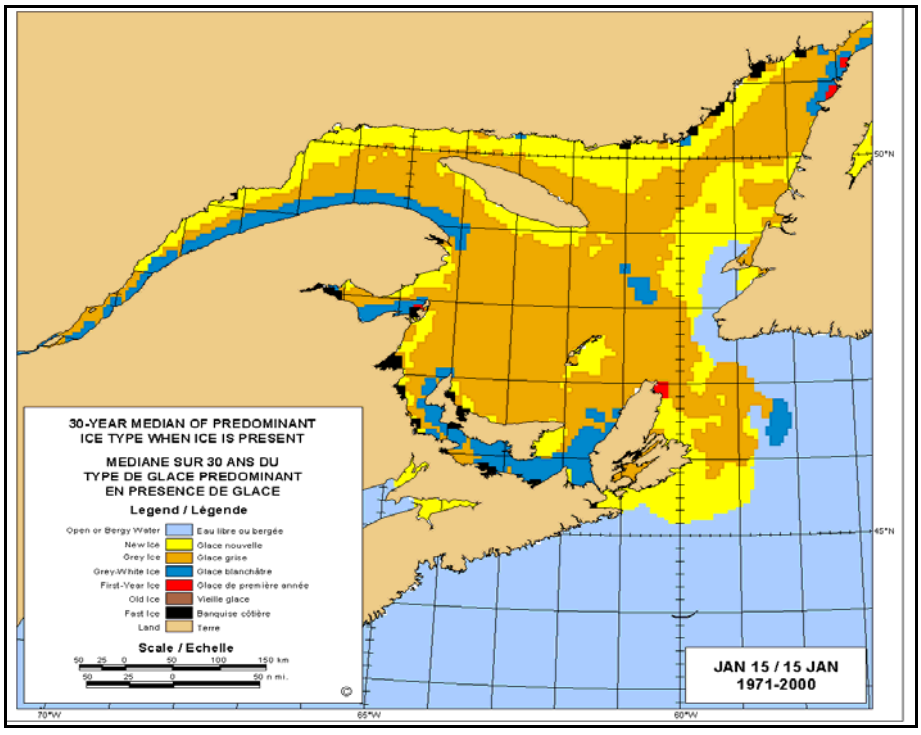


Figure 76B. Médiane sur 30 ans du type prédominant en présence de glace (1971-2000) –15 janvier

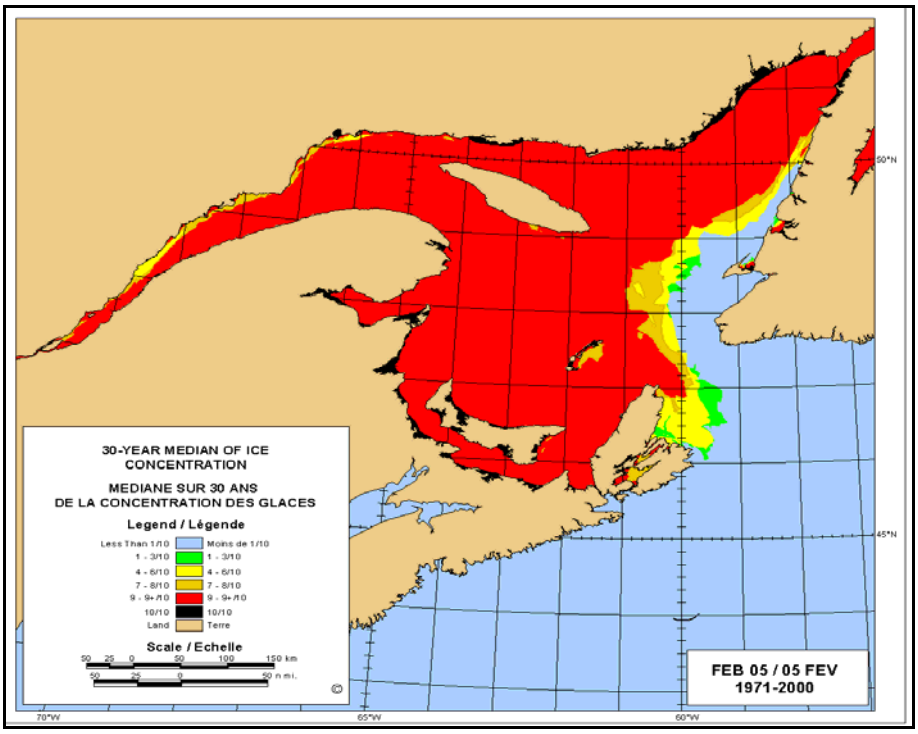


Figure 77A. Médiane sur 30 ans de concentration totale (1971-2000) – 05 février

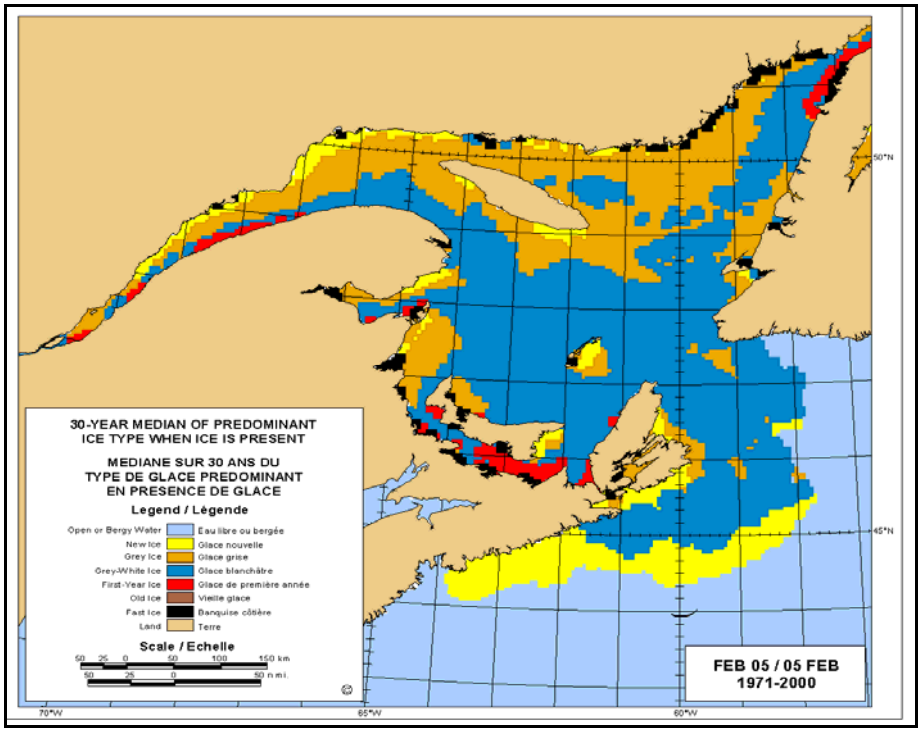


Figure 77B. Médiane sur 30 ans du type prédominant en présence de glace (1971-2000) – 05 février

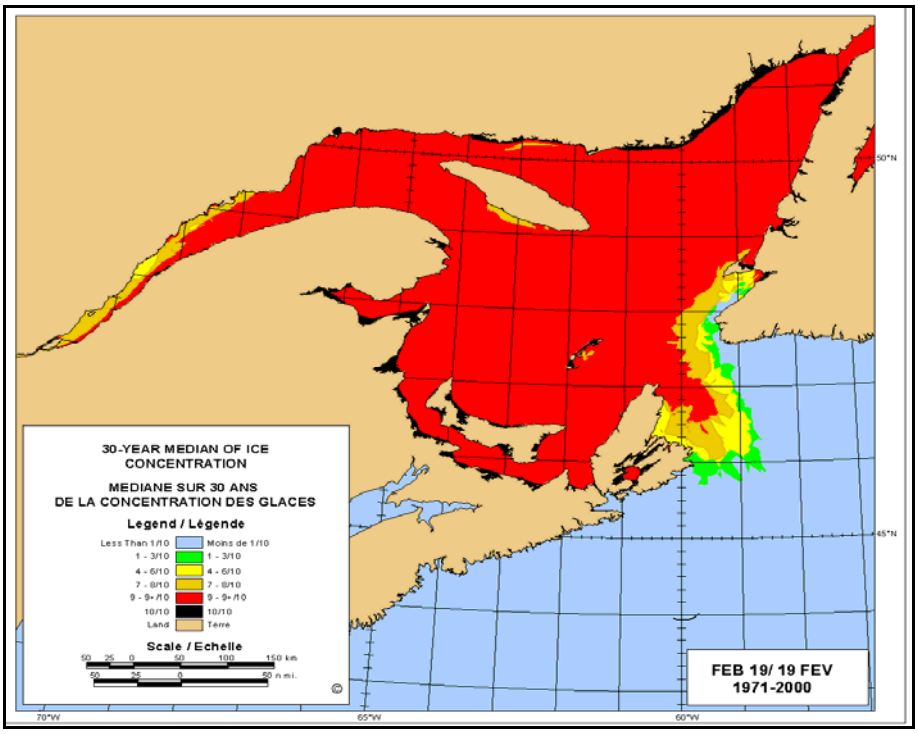


Figure 78A. Médiane sur 30 ans de concentration totale (1971-2000) – 19 février

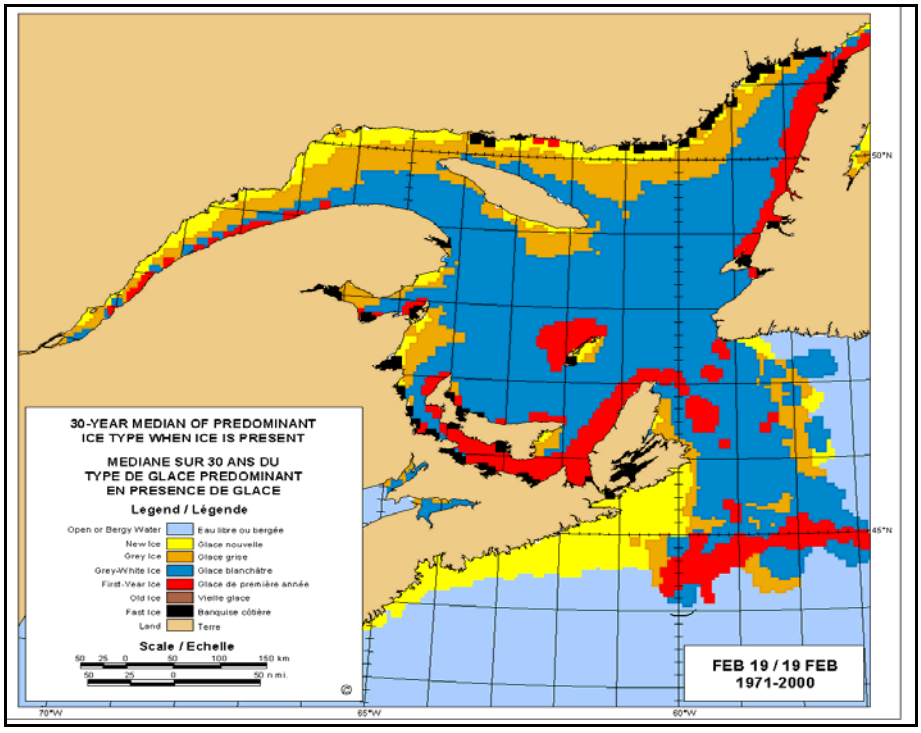


Figure 78B. Médiane sur 30 ans du type prédominant en présence de glace (1971-2000) – 19 février

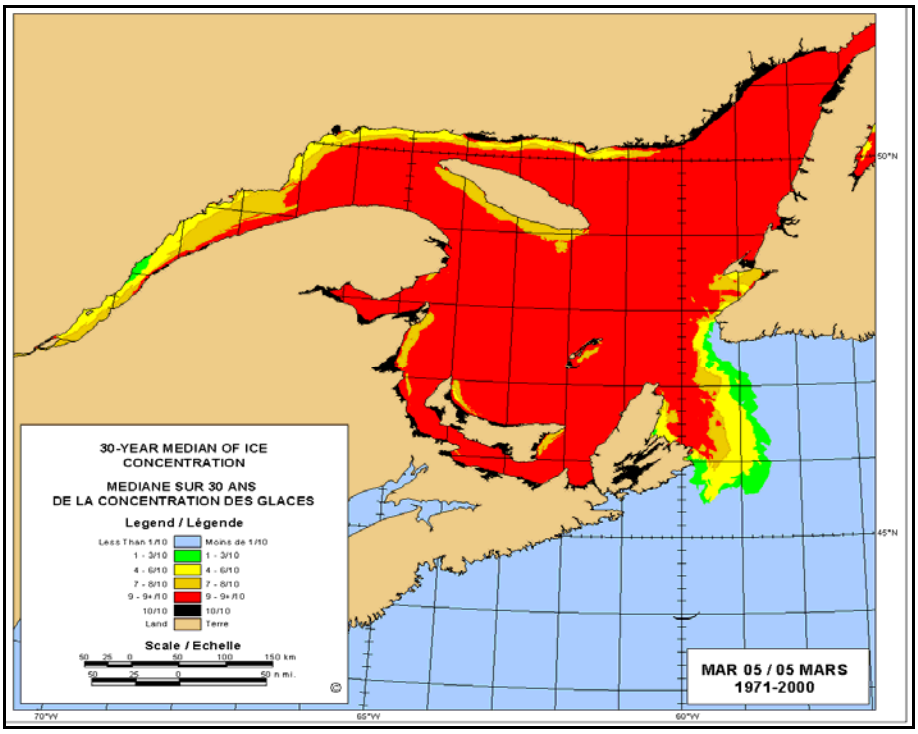


Figure 79A. Médiane sur 30 ans de concentration totale (1971-2000) – 05 mars

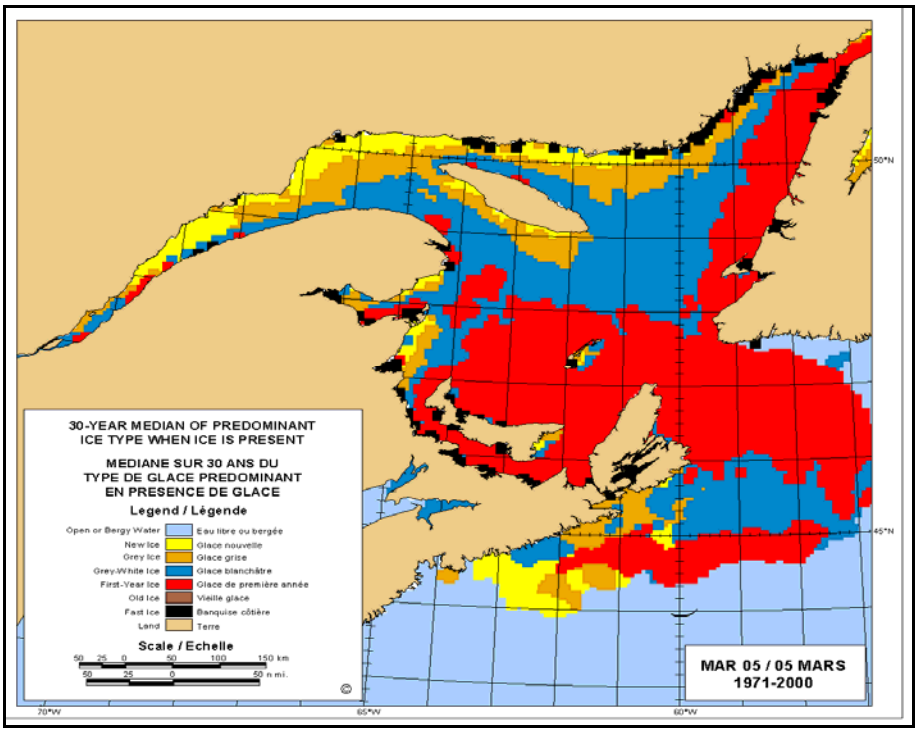


Figure 79B. Médiane sur 30 ans du type prédominant en présence de glace (1971-2000) – 05 mars

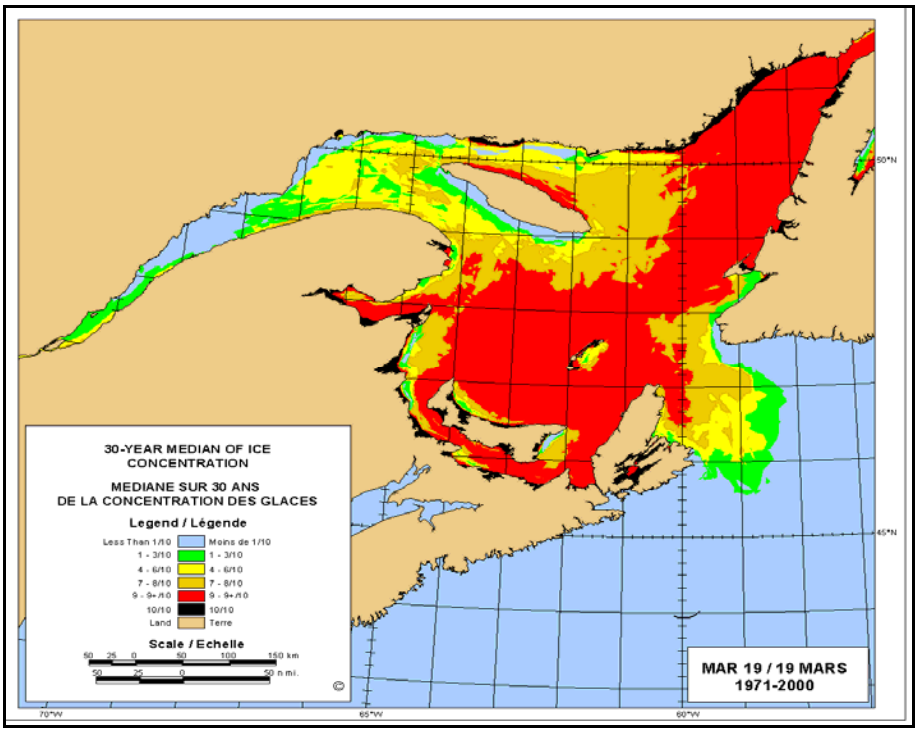


Figure 80A. Médiane sur 30 ans de concentration totale (1971-2000) – 19 mars

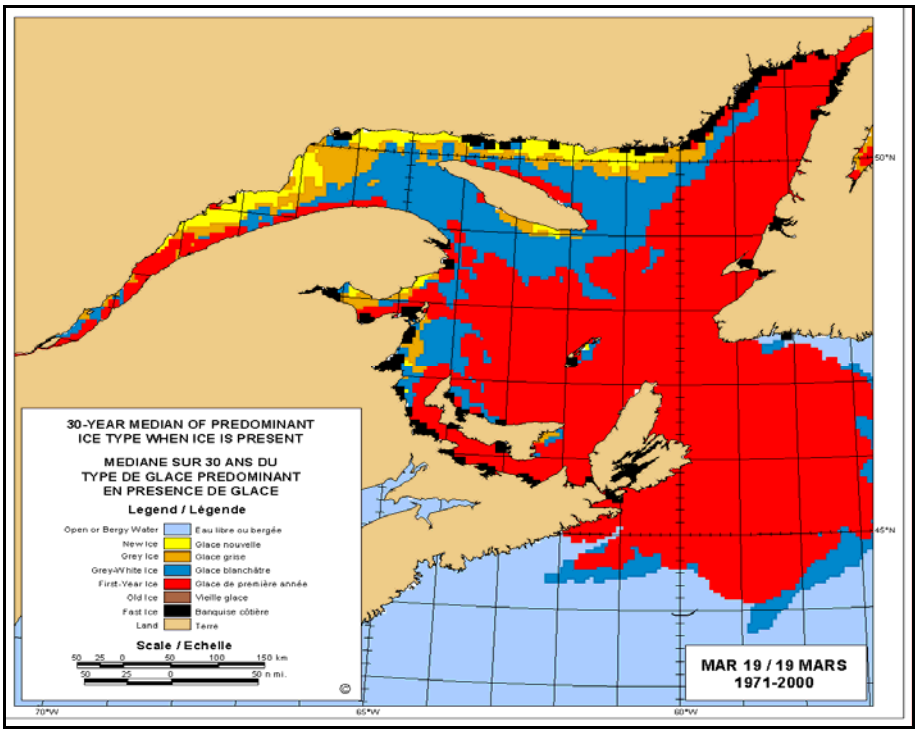


Figure 80B. Médiane sur 30 ans du type prédominant en présence de glace (1971-2000) – 19 mars

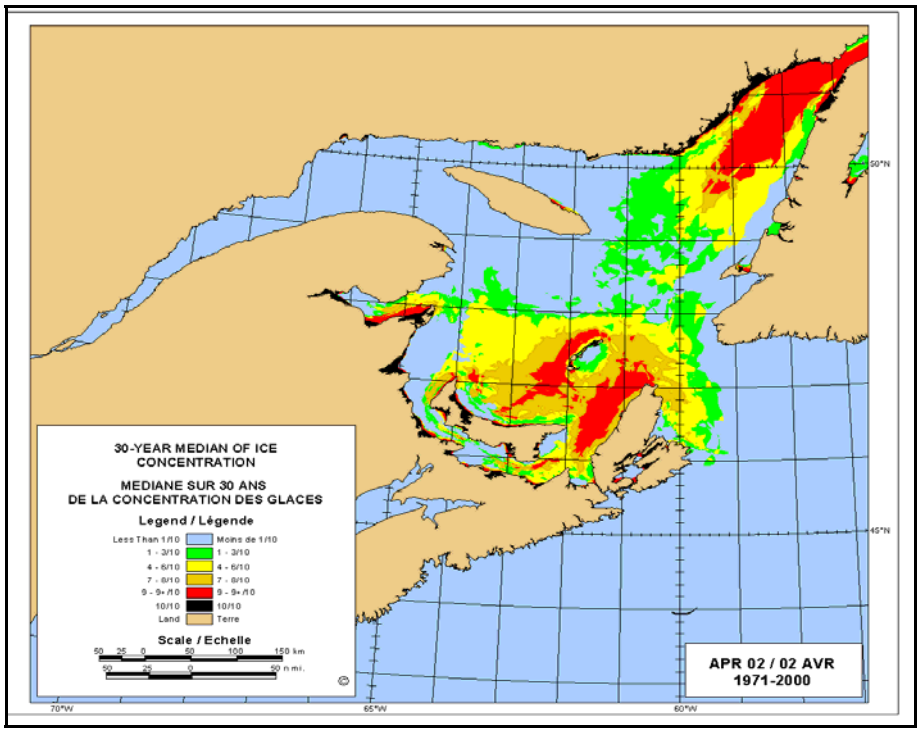


Figure 81A. Médiane sur 30 ans de concentration totale (1971-2000) – 02 avril

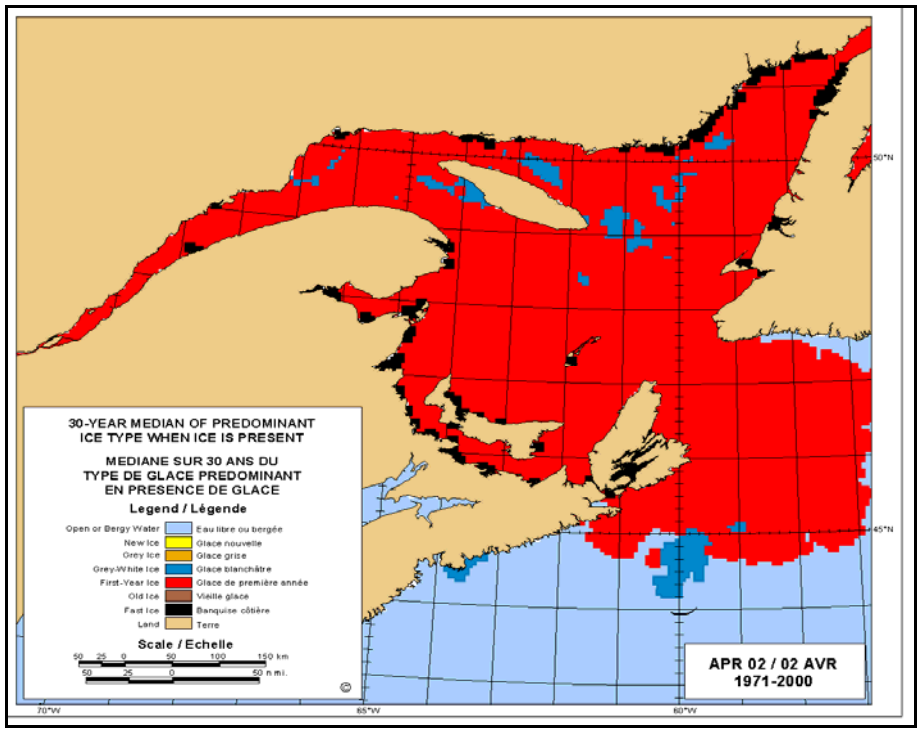


Figure 81B. Médiane sur 30 ans du type prédominant en présence de glace (1971-2000) –02 avril

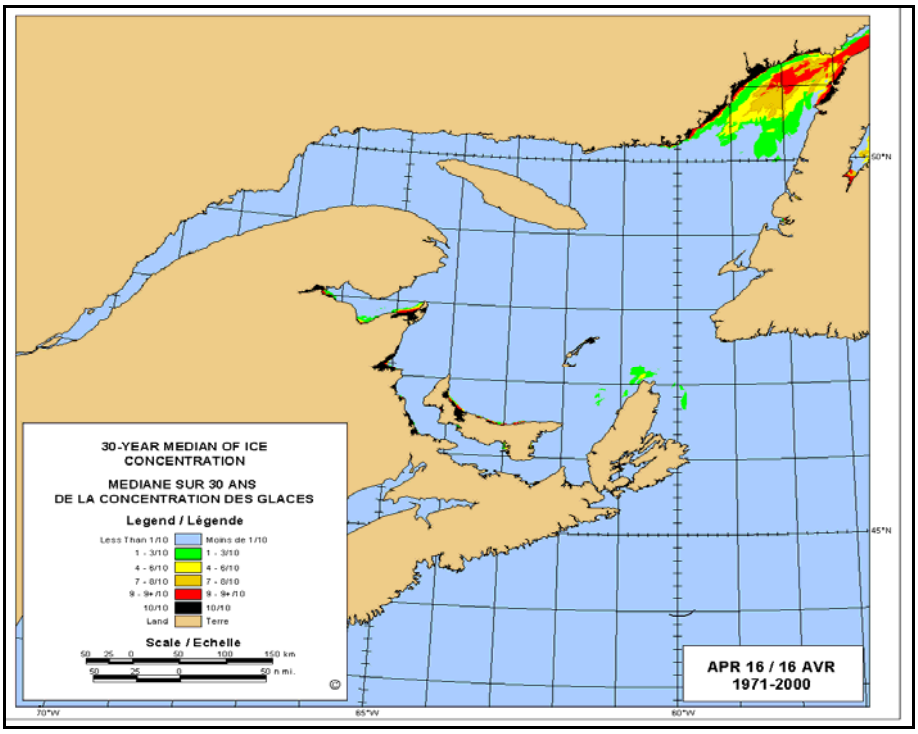


Figure 82A. Médiane sur 30 ans de concentration totale (1971-2000) – 16 avril

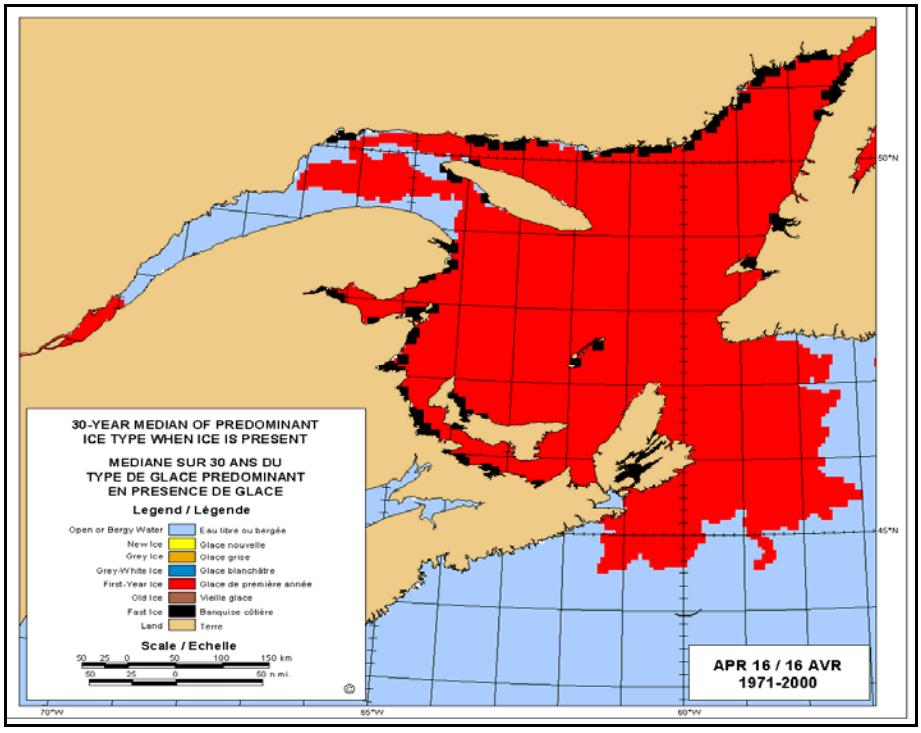


Figure 82B. Médiane sur 30 ans du type prédominant en présence de glace (1971-2000) - 16 avril

4.2.11.2 Variabilité de la couverture glacielle d'une année à l'autre et d'une décennie à l'autre

L'information sur les glaces présentée ci-haut décrit les conditions médianes ou normales des glaces au cours de la période à l'étude de 30 ans, soit de 1971 à 2000; toutefois, la couverture glacielle varie grandement d'une année à l'autre, comme on peut le voir à la figure 83 qui représente le total accumulé de la couverture de glace (TAC) dans le golfe pour chacune des années de la période allant de 1971 à 2005. Le TAC est exprimé en pourcentage de la région couverte de glace. Pour le calculer, on additionne toutes les données hebdomadaires sur la couverture de glace (superficie en kilomètres carrés x concentration moyenne) du début à la fin de la saison (du 26 novembre au 16 juillet pour les régions au sud), puis on les normalise.

Le TAC peut servir d'indice de la sévérité des conditions des glaces pour toute la saison. Un coup d'œil rapide à la figure 83 montre les valeurs extrêmes, qui vont de 7,5 % (1999-2000) à presque 20 % (1989-1990). On observe également que les années 1998 à 2000 ont été des années au cours desquelles il y a eu peu de glace. On avait connu une situation similaire au début des années 1980. Le TAC a toutefois recommencé à augmenter depuis 2000.

Même si on dispose d'un petit nombre d'années, la figure 83 semble également indiquer la présence de cycles dans la variabilité du TAC, pour des périodes appropriées de 15 à 20 ans et des valeurs maximales au milieu des années 1970 et, une autre fois, au début des années 1990. Ces cycles des conditions régionales des glaces et leur lien avec l'oscillation nord-atlantique (NAO) et l'événement El-Niño ont déjà fait l'objet d'examen dans le passé (Mysak et coll., 1996; Prinsenberg et coll., 1997). Mysak et coll. ont observé que des événements simultanés de la NAO et d'El-Niño ont tendance à être associés avec une étendue supérieure à la moyenne de la glace de mer dans la mer du Labrador. Le Service canadien des glaces a étudié les corrélations entre la couverture glacielle dans le golfe et divers paramètres environnementaux (Ballicater, 2000). Dans le cadre de cette étude préliminaire, on a étudié des liens possibles entre divers paramètres de la glace et des paramètres environnementaux comme la NAO, le flux solaire et les éruptions volcaniques. Au cours de cette dernière étude, on a observé une certaine corrélation entre la CTGA dans le golfe du Saint-Laurent et la NAO. On a observé une plus forte corrélation entre la NAO et la glace de rive, mais on préfère le TAC en raison de l'incertitude entourant l'observation de la glace de rive.

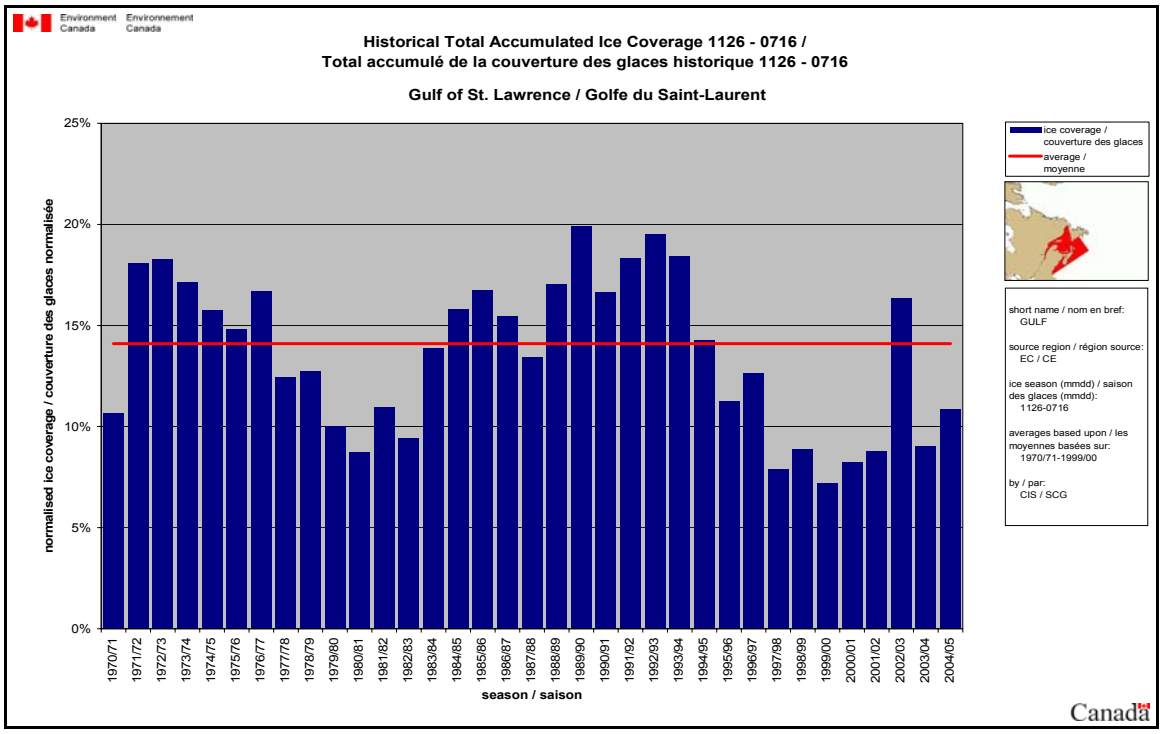


Figure 83. Total accumulé de la couverture de glace - Golfe St-Laurent 1971-2005

4.2.11.3 Incidences de la glace sur les vagues et les ondes de tempête

On s'entend généralement pour dire que la présence de glace de mer aurait un effet modérateur sur l'action des vagues ainsi que sur l'inondation causée par les vagues lors des niveaux élevés de l'eau attribuables aux ondes de tempête. L'impact précis que la glace exerce sur la magnitude des ondes de tempête n'est pas entièrement compris, et fait l'objet de débats dans la documentation; son impact n'est pas cependant considéré être bien important dans la majorité des cas. Lors de l'étude menée en 2002 pour l'Île-du-Prince-Édouard, (McCulloch et al., 2002) nous avons tenté de montrer ce lien en calculant les couvertures hebdomadaires de glace pour la période de 1971 à 2000 pour quatre régions : golfe du Saint-Laurent, plateau madelinien, rive nord de l'Île-du-Prince-Édouard et détroit de Northumberland.

Dans l'étude menée en 2002, la couverture était calculée en incluant tous les types de glace et les concentrations de 1/10 et plus. On supposait également que l'effet modérateur des glaces pouvait être observé seulement dans des conditions particulières de la couverture de glace (glace de première année ou concentrations de 3/10, 5/10 ou plus, banquise côtière, volumes de glace, etc.). Cette hypothèse devait être étudiée davantage lors d'études subséquentes. De plus, il semble que ce ne sont pas toutes les tempêtes d'intensité similaire qui causeront les mêmes hausses de niveau, dans les mêmes conditions glacielles. D'autres travaux sont requis pour clarifier la climatologie des tempêtes avant d'être en mesure de mener des études appropriées de l'incidence des glaces.

Pour la présente étude, nous avons ciblé la région du détroit de Northumberland et le mois de janvier pour nos calculs des couvertures de glace hebdomadaires. De plus, nous

avons aussi divisé la couverture glacielle en fonction du type de glace parce que nous croyons qu'il n'y a pas seulement la couverture, mais également l'épaisseur de la glace, qui jouent un rôle important dans l'effet modérateur. Les figures 84 à 88 montrent les couvertures historiques de glace, par type, pour les années 1969 à 2005 pour les 1er, 8, 15, 22 et 29 janvier respectivement. Une grande variabilité de couverture de glace est observée pendant la première semaine de janvier. Il est aussi intéressant de noter que même si la région est presque couverte de glace à 100 % le 29 janvier de la plupart des années, les types de glace peuvent varier grandement. Les tentatives visant à établir des liens entre les ondes de tempête et la présence de glace de mer devraient tenir compte de ces types de glace.

Bien que la présente étude n'ait pas visé à établir la corrélation exacte de la glace avec les ondes de tempête et l'érosion causée par les vagues, il est évident que la présence de glace a un effet modérateur. En conséquence, en raison du changement climatique qui devrait faire en sorte qu'il n'y aura plus de glace, ou très peu, dans le golfe, on s'attend à ce que les ondes de tempête et l'érosion causée par les vagues soient plus graves.

D'autres incidences de la glace, qui n'ont pas été traitées dans le cadre de la présente étude, incluent :

- les dommages directs causés par la glace qui est transportée sur la côte par la tension du vent et la pression des glaces;
- les conséquences d'un futur réchauffement climatique qui ferait en sorte qu'il n'y aura plus de glace, ou très peu, dans le golfe, ce qui entraînera la perte de la barrière de protection saisonnière contre l'érosion causée par les vagues qu'offrent les complexes de pied de glace et de glace de rive.

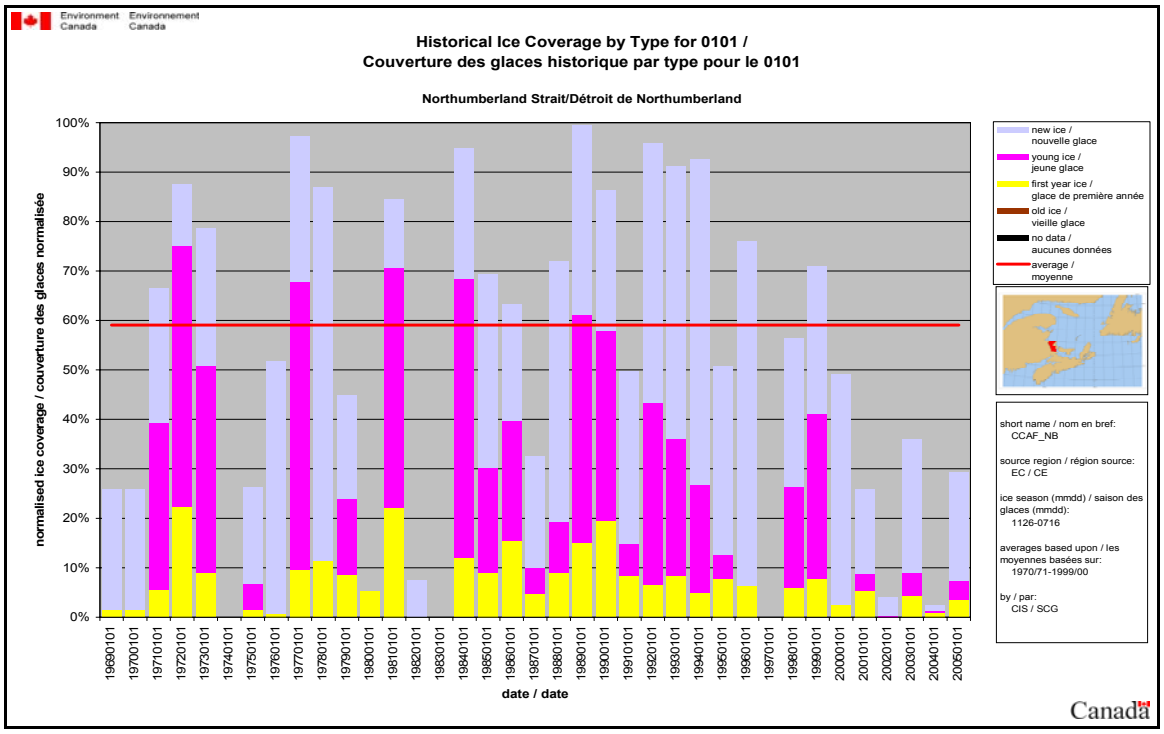


Figure 84. Couverture de glace historique par type 1er janvier

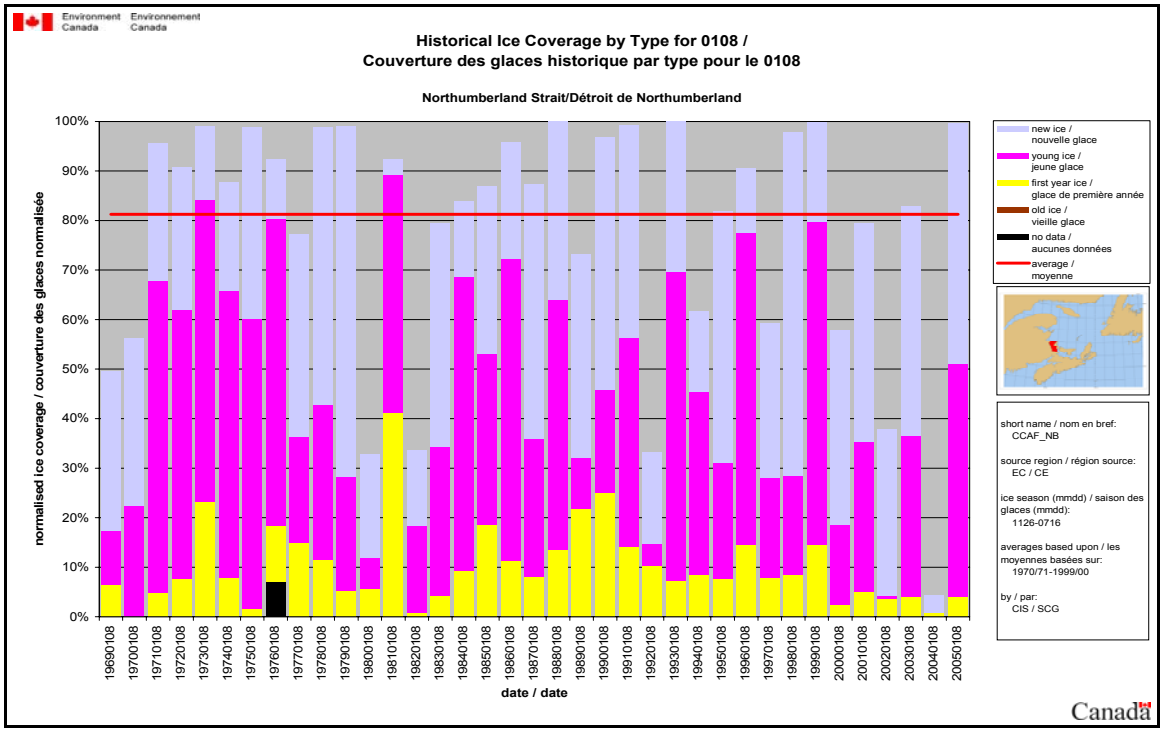


Figure 85. Couverture de glace historique par type 8 janvier

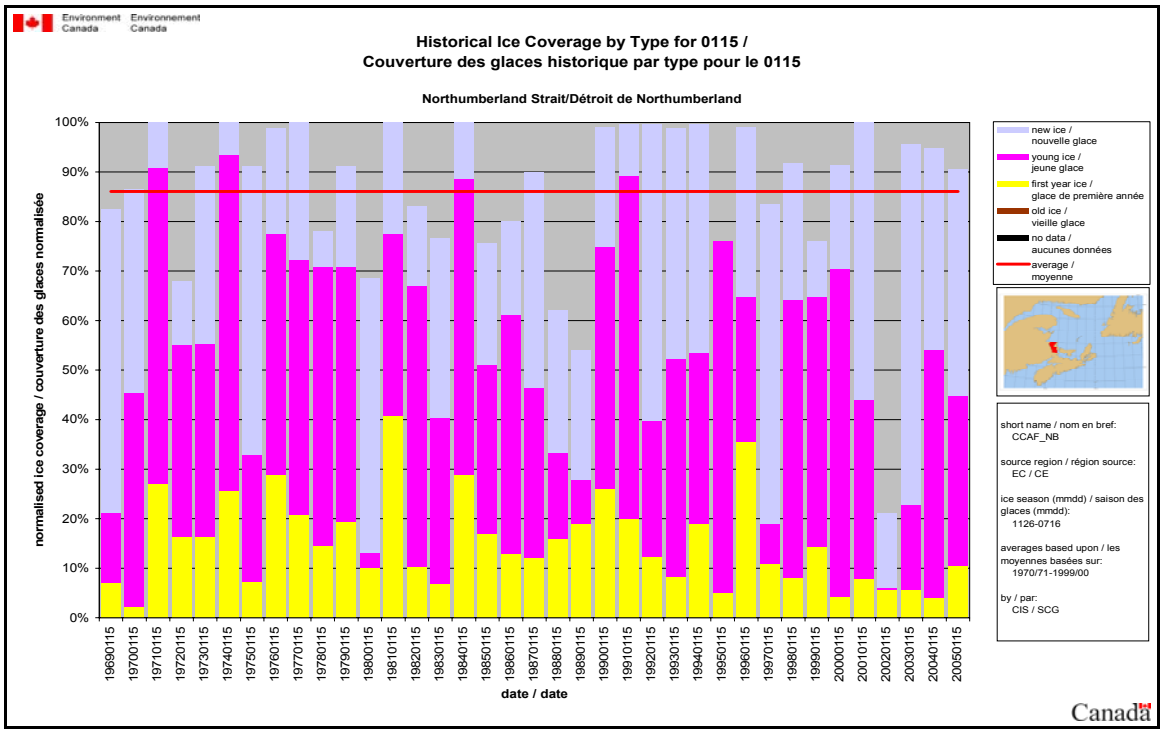


Figure 86. Couverture de glace historique par type 15 janvier

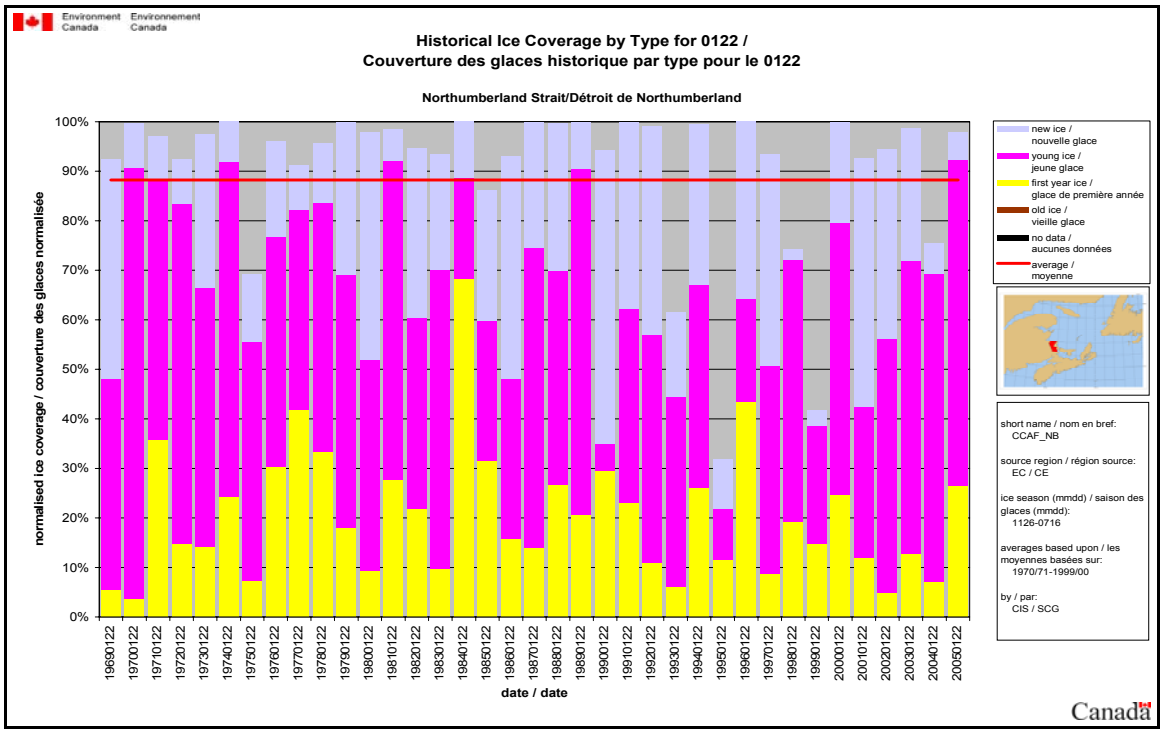


Figure 87. Couverture de glace historique par type 22 janvier

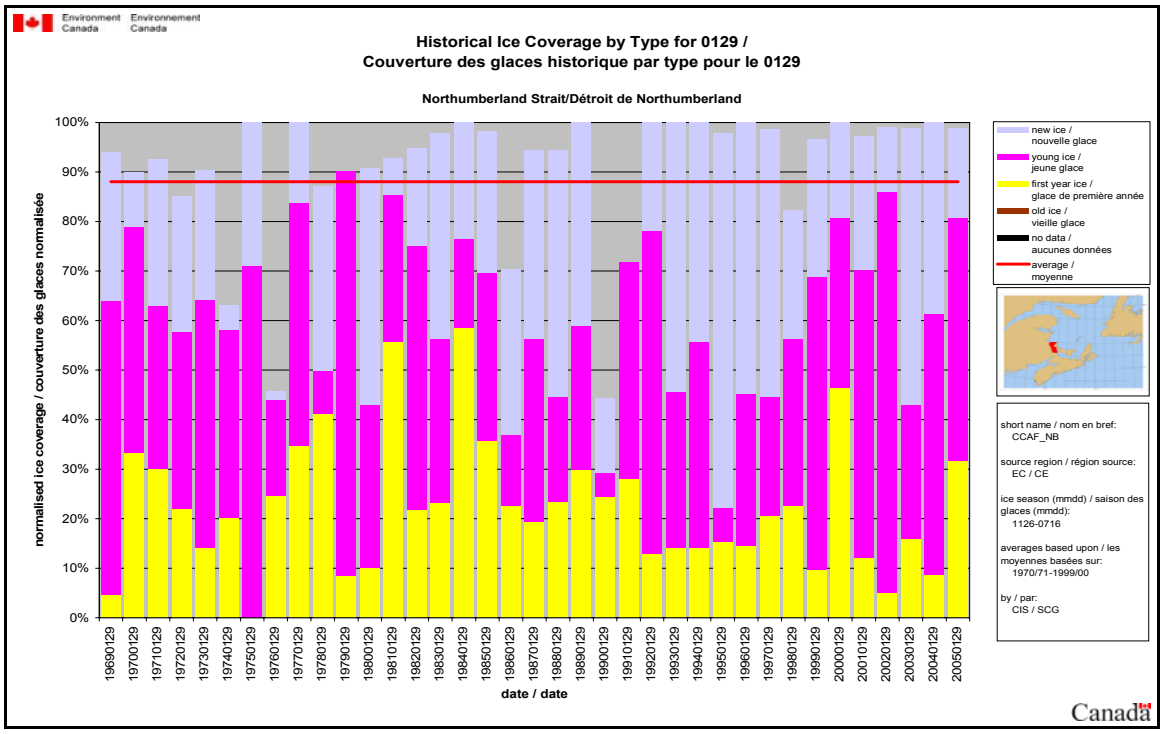


Figure 88. Couverture de glace historique par type 29 janvier

4.2.11.4 Tendances et climatologie future des glaces

Les derniers résultats du modèle canadien du climat du globe indiquent que, d'ici l'année 2050, l'étendue des glaces dans l'hémisphère nord sera limitée aux plus hautes latitudes et que le golfe sera libre de glace (Flato et Boer, 2001). D'autres recherchistes ont cependant argumenté que ce modèle n'aurait peut-être pas la résolution nécessaire pour adéquatement résoudre l'étendue future des glaces dans le golfe du Saint-Laurent et que de nouvelles évidences suggèrent que la diminution de la glace serait plus prononcée dans la partie nord que dans la partie sud (Francois Saucier, *comm. pers.).* Lors de l'étude menée en 2002, nous avons tenté, à l'aide de la couverture totale de glace accumulée, d'établir l'existence de certaines tendances et avons trouvé une légère diminution du TAC pour la période de 1971 à 2000 (ce qui n'est toutefois pas statistiquement significatif). L'étude de Ballicater (2000) menée à l'aide de données allant de 1969 à 1998 a également relevé les tendances à court et à long terme de la couverture glacielle dans le golfe du Saint-Laurent et a révélé une légère diminution des conditions des glaces. Ces résultats contradictoires démontrent que le nombre d'années de données dont on dispose demeure statistiquement inadéquat et que l'ajout de simplement deux années de données peut changer les résultats.

Pour la présente étude, nous avons étendu notre période pour le calcul du TAC et elle couvre maintenant la période allant de 1971 à 2005, ce qui est représenté à la figure 89 où l'on observe encore une tendance négative pour le TAC.

L'étude menée par Ballicater (2000) montre également qu'il est possible de prévoir les conditions des glaces à court terme; un modèle de régression statistique représentant les paramètres environnementaux (NAO, flux solaire, degrés-jours de gel, anomalie

volcanique) et les conditions des glaces de l'année en cours. Cette étude peut être utilisée pour modéliser la tendance lente et les cycles observés des conditions des glaces à court terme.

Nous avons également étendu la période jusqu'à 2005 pour tenter d'établir les tendances pour la durée de la saison des glaces, tel qu'indiqué à la figure 90. La date du début de la saison est définie comme la date à laquelle la couverture glacielle atteint 10 % de la superficie totale et la date de la fin de la saison est définie comme la date à laquelle la couverture glacielle représente moins de 10 % de la superficie totale. La figure 90 montre une légère réduction de la durée de la saison des glaces, mais encore une fois, ce n'est pas statistiquement significatif.

En résumé, nos dossiers montrent de légères tendances de la diminution des conditions glacielles dans le golfe du Saint-Laurent, mais elles ne sont pas aussi marquées que celles dans l'Arctique. On ne peut pas utiliser ces tendances pour prévoir les conditions glacielles à long terme, ce qui signifie que nous n'avons pas encore commencé à observer la diminution prévue de la couverture glacielle dans le golfe comme c'est le cas pour l'Arctique. Le modèle canadien du climat du globe prévoit qu'il y aura une diminution et nos observations indiquent que cette diminution pourrait se faire un peu plus lentement que celle observée dans l'Arctique.

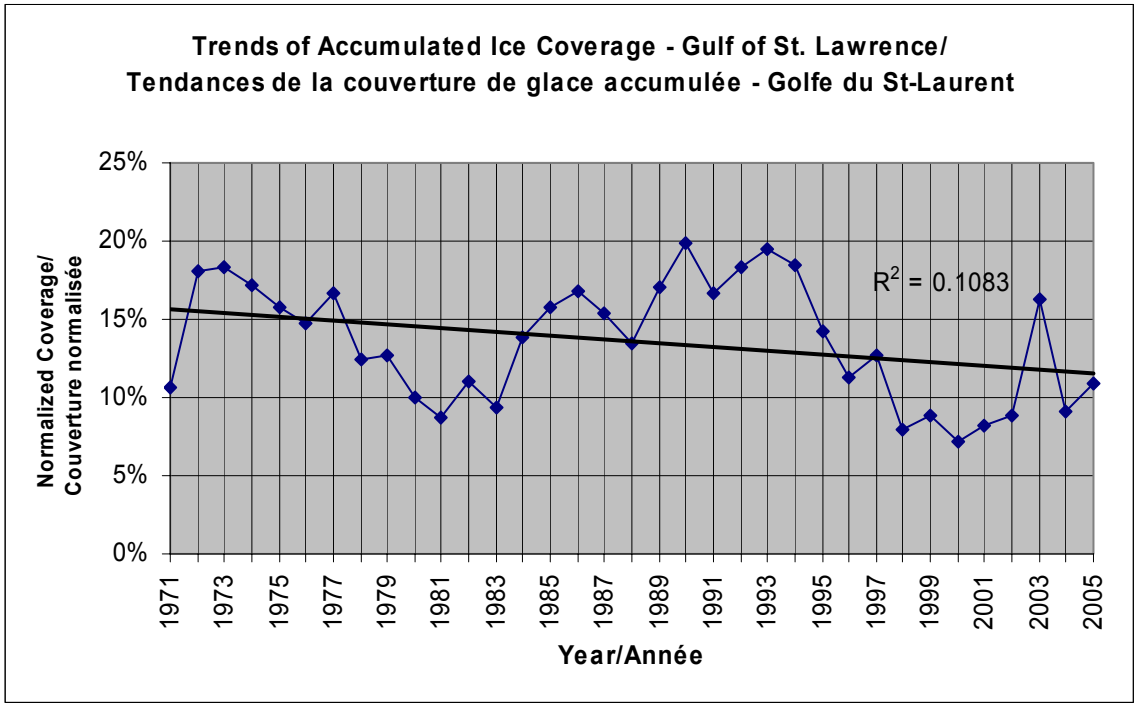


Figure 89. Tendances de la couverture de glace accumulée – Golfe du Saint-Laurent.

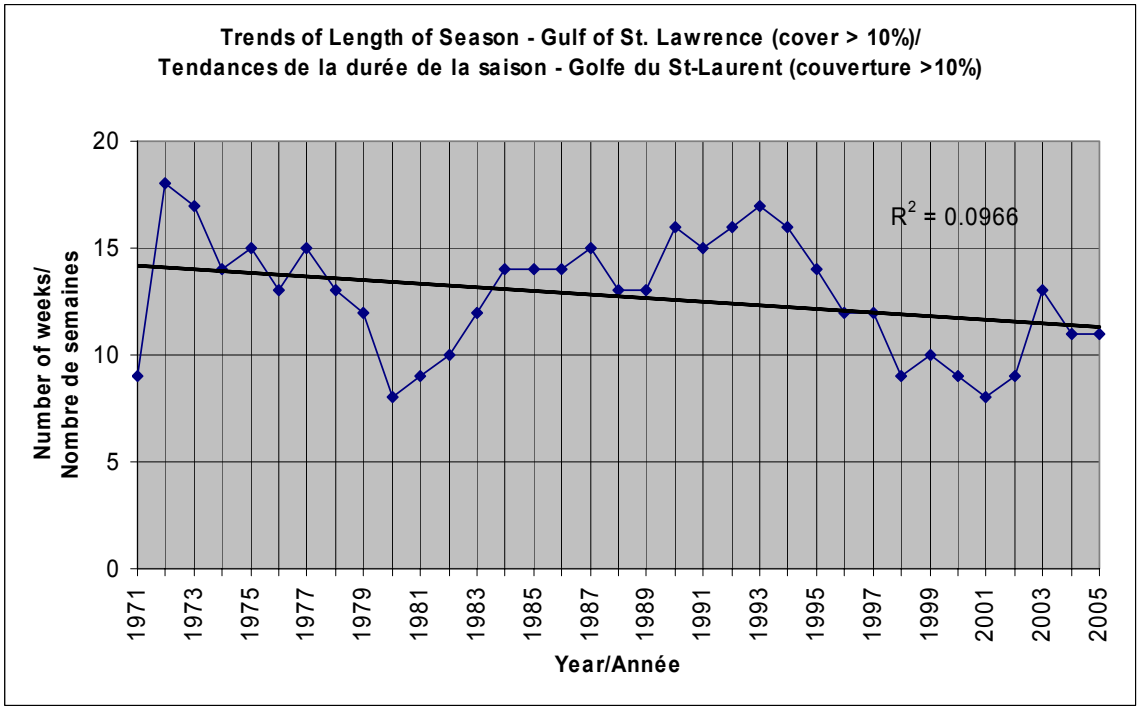


Figure 90. Tendances de la durée de la saison – Golfe du Saint-Laurent.

4.2.12 Sommaire et conclusions

La totalité du stock numérique de données sur les niveaux d'eau dans le sud du golfe du Saint-Laurent a été examinée ici, pour établir la climatologie des ondes de tempête dans la zone à l'étude et identifier les épisodes d'ondes de tempête et de niveaux d'eau extrêmes. La plupart des tempêtes qui frappent la partie sud de la zone à l'étude ont des répercussions ailleurs sur le détroit de Northumberland. Les données de longue durée de Charlottetown sont donc cruciales pour cette étude, puisqu'elles permettent une évaluation des conditions de tempête à travers les décennies et démontrent l'importance fondamentale de la tempête du 21 janvier 2000 et le fait que l'élévation du niveau de la mer a déjà eu un effet sur les niveaux d'eau extrêmes dans la période visée par les données.

L'enregistrement marégraphique de Charlottetown est un des plus longs qui existent pour l'est du Canada; il remonte en effet à 1911 et il est très complet depuis 1938. Celui d'Escuminac remonte à 1973 mais, si on le combine à des enregistrements antérieurs à Pointe-Sapin, pas très loin de là, on peut le faire remonter à 1963 (43 ans). Les données de niveau d'eau de Pointe-du-Chêne, plus limitées, ne couvrent que la période de 1971 à 1992. Le marégraphe de Pointe-du-Chêne y a cependant été remis en service pour les fins du présent projet et, dans les nouvelles données recueillies de 2003 à 2006, on note quelques tempêtes très importantes.

Les épisodes d'ondes de tempête de plus de 60 cm ont été extraits de l'enregistrement des niveaux d'eau de Charlottetown en prenant en compte l'élévation du niveau de la mer et en interpolant, dans la mesure du possible, les épisodes manquants à partir des données de marégraphes proches. Ces épisodes ont ensuite été colligés par décennie (années 1940 aux années 1990), par demi-décennie, par année et par mois.

On a choisi les données de niveau d'eau de 1960 à 1998 pour représenter la climatologie des ondes de tempête à Charlottetown. En général, les ondes de tempête de plus de 60 cm sont des phénomènes fréquents à Charlottetown, puisqu'il y en a en moyenne huit par an (contre, par exemple, deux ou trois en moyenne sur la côte atlantique à Halifax). Les ondes de tempête de 100 cm ou plus surviennent en moyenne environ une fois par an. Celles qui dépassent 120 cm sont rares, et se produisent en moyenne environ trois fois par décennie. Nous n'avons relevé aucun épisode de plus de 160 cm. À Charlottetown, les ondes de tempête sont surtout associées à la période de tempêtes de la fin de l'automne et de l'hiver. Les statistiques moyennées montrent une augmentation de leur fréquence en octobre et en novembre, avec une pointe d'activité en décembre et en janvier. La fréquence des tempêtes diminue significativement en avril, et il y a peu d'occurrences de mai à septembre. La fréquence des ondes de tempête présente une forte variabilité interannuelle, due à la grande diversité de la fréquence, de la gravité et de la trajectoire des tempêtes elles-mêmes. Les statistiques décennales montrent que les ondes de tempête à Charlottetown semblent être devenues un peu plus fréquentes des années 1940 aux années 1960, et que les ondes les plus importantes (>120 cm) sont totalement absentes dans les années 1940 et les années 1950 (ainsi que dans les données quelque peu incomplètes des périodes antérieures), mais on en observe par la suite. Les décennies 1960, 1970 et 1980 ont été marquées de fortes ondes de tempête, avec en moyenne plus de deux épisodes dépassant 80 cm par an, et les années 1980 présentent en moyenne plus d'un épisode de 100 cm par an. Les années 1990 ont

généralement connu moins d'ondes de tempête, malgré quelques épisodes particulièrement forts. Depuis 2000, il y a eu beaucoup de cas de fortes ondes de tempête. Les statistiques par demi-décennie attirent l'attention sur le fait que certaines périodes sont plus actives que d'autres, en particulier le début des années 1960 et la fin des années 1980, périodes pour lesquelles la climatologie révèle une augmentation de fréquence des coups de vent du nord-est. La période depuis 2000 a été très active.

Le 21 janvier 2000, une vigoureuse tempête d'hiver a causé une inondation généralisée des régions côtières du sud-est du Nouveau-Brunswick et tout le long du détroit de Northumberland, dont Pointe-du-Chêne et le front de mer du centre-ville de Summerside et Charlottetown à l'Île-du-Prince-Édouard. À Charlottetown, la tempête a amené le niveau d'eau à un nouveau record, de 4,23 m au-dessus du zéro des cartes (ZC), qui dépassait de 39 cm le record précédent (établi exactement 39 ans plus tôt). Cette tempête et les niveaux d'eau atteints dans toute la région constituent le véritable point de repère du présent projet. D'autres épisodes d'ondes de tempête et niveaux d'eau extrêmes ont été identifiés pour Charlottetown et les données de niveau d'eau ont été systématiquement ramenées à l'année 2000 pour faire la preuve des impacts que l'élévation du niveau de la mer, sur la période des données existantes, a déjà eu sur les extrêmes de niveau d'eau et sur les inondations côtières. Par exemple, quand l'élévation du niveau de la mer est prise en compte, la différence entre l'ancien record de niveau d'eau à Charlottetown et le nouveau est réduite à 27 cm.

Nous avons aussi établi une climatologie des ondes de tempête pour la région d'Escuminac-Pointe-Sapin, située juste au nord de la zone à l'étude, à l'aide de 28 ans de données, et pour Pointe-du-Chêne, à l'aide de 15 ans de données. Les ondes de tempête à Escuminac-Pointe-Sapin présentent les mêmes caractéristiques de fréquence, de distribution et d'intensité qu'à Charlottetown. En moyenne, il y a chaque année environ sept épisodes de plus de 60 cm et un épisode de plus de 100 cm. On observe une grande variabilité interannuelle de la fréquence, où aucune tendance nette ne peut être détectée. Neuf ondes de tempête de plus de 120 cm ont été identifiées à Escuminac-Pointe-Sapin sur la période 1963-2005, comparativement à 13 à Charlottetown entre 1960 et 2005. Les très fortes ondes de tempête peuvent cependant être un peu plus fréquentes, avec trois épisodes de plus de 150 cm identifiés à Escuminac (même en l'absence de la tempête du 21 janvier 2000) contre deux à Charlottetown. L'onde de tempête la plus haute enregistrée atteignait 160 cm, le 17 mars 1976. Ce genre d'onde est surtout associé à la période d'activité cyclonique de la fin de l'automne et de l'hiver. Comme à Charlottetown, on a observé une augmentation de fréquence en octobre et en novembre, avec un pic d'activité en décembre et en janvier; la fréquence diminue significativement en avril, et il y a peu d'occurrences de mai à septembre.

Les ondes de tempête sont plus hautes et plus fréquentes à Pointe-du-Chêne qu'à Escuminac ou à Charlottetown, mais leur distribution sur l'année est bien entendu semblable, puisqu'elles sont généralement déclenchées par les mêmes tempêtes. En moyenne, on a observé chaque année dix épisodes de plus de 60 cm, avec deux ou trois de plus de 100 cm. Les ondes de tempête dépassant 150 cm se produisent tous les deux ou trois ans; on en a vu qui atteignaient 200 cm (198 cm le 17 mars 1976 et 200 cm le 21 janvier 2000), et qui constituent les plus hautes ondes de tempête enregistrées au Canada atlantique, à la connaissance des auteurs.

Sous l'effet du réchauffement planétaire, on prévoit que l'élévation du niveau de la mer va s'accélérer. Avec le passage de tempêtes dans la zone côtière, de fortes ondes de tempête vont un jour se trouver en phase avec des marées suffisamment hautes pour entraîner de nouveaux records du niveau de l'eau dans la zone à l'étude et à Charlottetown. De plus, avec le temps, les inondations atteignant un niveau donné vont connaître une augmentation de fréquence substantielle; cet état de choses a été démontré quantitativement pour Charlottetown et Pointe-du-Chêne à l'aide d'un dénombrement des dépassements de divers seuils dans les données existantes (corrigées pour tenir compte de l'élévation du niveau de la mer).

On a examiné les cartes météorologiques synoptiques correspondant aux dépressions qui ont généré des ondes de tempête de 90 cm ou plus à Charlottetown et de 110 cm ou plus à Pointe-du-Chêne, et produit des cartes des trajectoires. Ces systèmes sont surtout des dépressions maritimes extratropicales qui subissent un creusage explosif au large de la côte est et passent à l'est de la zone à l'étude, généralement accompagnées d'une période de vents du nord-est ou du nord de la force d'un coup de vent ou d'une tempête, qui soufflent à travers le golfe du Saint-Laurent. Leur géométrie est généralement favorable à l'arrivée de grosses mers dans la zone à l'étude (en l'absence de glaces de mer). L'historique des cyclones tropicaux dans la zone à l'étude a été examiné à l'aide de la base de données HURDAT ou base de données des « meilleures trajectoires » (1851 à 2004) du National Hurricane Center. Bien que moins courants que les épisodes d'ondes dus à des tempêtes extratropicales, ceux imputables à des cyclones tropicaux peuvent être très intenses et survenir pendant la saison des systèmes tropicaux (juin à novembre), époque où il n'y a pas de glace de mer pour protéger le littoral contre l'impact des vagues; de tout temps, ces systèmes ont contribué pour beaucoup au processus continuel d'érosion de la côte dans la région.

Nous avons utilisé les plus hauts niveaux d'eau aux sites marégraphiques de Charlottetown, Escuminac-Pointe-Sapin et Pointe-du-Chêne pour identifier les tempêtes repères des 40 dernières années, qui sont présentées comme des études de cas, où l'accent est mis sur les impacts des tempêtes. Ces études de cas illustrent, entre autres, l'important rôle protecteur de la glace de mer pendant les mois d'hiver et attirent l'attention sur l'augmentation des taux d'erosion des côtes à laquelle on peut s'attendre avec une saison de glace plus courte dans un climat futur plus chaud. Elles mettent aussi en lumière l'importance du programme de prévision des ondes de tempête pour les interventions d'urgence et l'atténuation à court terme, ainsi que la valeur des données LiDAR en temps réel pour la cartographie des inondations.

Une brève revue de la documentation sur les épisodes d'inondation dans la région permet de mettre en relief d'autres grandes tempêtes datant d'avant les données marégraphiques et nous rappelle que les inondations et l'érosion de la côte dans la zone à l'étude sont un processus continuel et que les dommages aux infrastructures côtières ne sont pas un phénomène nouveau.

Il est clair que les niveaux d'inondation de la tempête du 21 janvier 2000 sont proches des maximums qui peuvent être atteints dans le climat actuel; cependant, cette tempête est survenue à un moment où le rivage était protégé par la glace de mer. D'un autre côté, la tempête du 29 octobre 2000, qui était accompagnée de très grosses vagues superposées à un niveau de la mer élevé, a fait beaucoup de dommages aux rivages et à

l'infrastructure côtière. Elle a été la pire des 40 dernières années pour ce qui est de l'erosion des côtes et des dommages dus aux vagues; cependant, les choses auraient été infiniment pires si la tempête avait été en phase avec la plus élevée des marées hautes de la journée. Il pourrait donc, même à l'époque actuelle, survenir des cas plus graves en termes de dommages dus aux vagues, comme il y en a fort probablement eu par le passé, sans qu'intervienne l'élévation du niveau de la mer imputable au changement climatique.

Nous avons examiné les relevés de mesure et de simulation rétrospective de la vitesse et de la direction des vents ainsi que de la hauteur et de la période des vagues (et de leur direction, lorsque les données étaient accessibles) dans un triple but : identifier les vents et les phénomènes éoliens qui contribuent le plus à la formation des vagues influant sur le littoral sud du golfe du Saint-Laurent, dégager des tendances à partir du profil des tempêtes passées et du forçage de l'erosion des côtes dans la zone d'étude et, enfin, tenter de prédire le forçage futur jusqu'en 2100.

Les vents qui semblent produire le plus efficacement les vagues qui influent sur la zone d'étude soufflent du nord-est et sont associés au passage de systèmes dépressionnaires tropicaux, en transition ou extratropicaux qui se dirigent généralement vers le nord et le nord-est. Ces vents tendent à survenir en automne et en hiver, mais ils ne produisent efficacement des vagues que pendant les mois où les eaux sont exemptes de glaces, période où le fetch est le plus long. Nous avons examiné le jeu de données sur les vents de la base AES40 pour un point situé à l'extrémité ouest du détroit de Northumberland. Des épisodes récurrents de vents d'automne qui soufflaient du nord-est à plus de 40 km/h ont été décelés au cours des périodes suivantes : 1960, 1962-1966, 1967-1968, 1970, 1974-1982, 1985, 1987-1989, 1991, 1993, 1998-2001 et 2004. Nous avons isolé 58 phénomènes éoliens au cours desquels des vents d'automne du nord-est ont soufflé à plus de 40 km/h pendant au moins six heures. Un examen de la fréquence annuelle de ces phénomènes révèle une tendance évidente à la hausse.

Les bouées de mesure des vagues utilisées dans le cadre de cette étude ont enregistré trois phénomènes éoliens importants qui ont eu des incidences sur la zone d'étude : le premier est survenu le 7 décembre 2003, le deuxième (la tempête subtropicale Nicole), les 11 et 12 octobre 2004, et le dernier, le 27 décembre 2004. Ces phénomènes éoliens du nord-est ont créé des vagues d'une hauteur significative pouvant aller jusqu'à 4,8 m et d'une période de pointe de 10 secondes. La disposition physique des bouées a permis de démontrer que les vagues pénétrant dans la partie ouest du détroit de Northumberland perdent en hauteur lorsqu'elles se dirigent vers le sud et l'est.

Le relevé de simulation rétrospective des vagues pour l'extrémité ouest du détroit révèle une hausse de la fréquence des vagues automnales de plus de 3 m en provenance du nord-est au cours des périodes suivantes : 1960-1966, 1968, 1970, 1974, 1977-1981, 1986-1988, 1991, 1998-2000 et 2003-2004. Nous avons dressé une liste de 53 phénomènes météorologiques automnaux ayant créé des vagues de plus de 3 m en provenance du nord-est pendant au moins six heures. Il n'a toutefois pas été possible de dégager de tendance significative dans la fréquence des phénomènes météorologiques annuels depuis 1960.
Nous avons utilisé les données de la base AES40 sur la vitesse moyenne quotidienne des vents pour réduire à des sous-échelles statistiques les variables de différents

modèles de circulation générale et pour prédire la vitesse des vents jusqu'en 2100. Il a cependant été impossible de répéter l'exercice pour la direction des vents. Les résultats donnent à penser qu'il n'y aura aucun changement important dans la vitesse des vents. Mais, comme les variations dans la vitesse des vents ont été sous-estimées, ces résultats ne fournissent aucune indication sur les phénomènes extrêmes. Les données obtenues laissent entrevoir une réduction globale de la fréquence des phénomènes éoliens, qui pourrait toutefois s'accompagner d'un accroissement de la fréquence des phénomènes extrêmes. Compte tenu des données à échelle réduite sur la vitesse des vents et de la corrélation entre la vitesse des vents et la hauteur des vagues dans le jeu de données de simulation prospective, nous avons déterminé que la hauteur des vagues risquait peu de changer de façon significative d'ici 2100. Comme pour les vents, cependant, il a été difficile de prédire les variations dans la hauteur des vagues et d'élaborer un scénario qui tienne compte des phénomènes extrêmes. Les phénomènes météorologiques producteurs de vagues suivront vraisemblablement un scénario semblable à celui des vents, mais qui sera assorti d'une complication supplémentaire.

À l'heure actuelle, la formation des vagues est entravée par la glace de mer pendant les mois d'hiver. Or, le scénario prévu est celui d'une réduction des glaces de mer dans le sud du golfe du Saint-Laurent. En pareil cas, les tempêtes hivernales produiront plus de vagues, ce qui accroîtra la fréquence globale des vagues et des phénomènes météorologiques violents.

À partir des cartes des glaces du Service canadien des glaces, nous avons développé une climatologie exacte de la glace de mer dans le golfe du Saint-Laurent. L'examen de la couverture totale de glace accumulée dans le golfe montre une grande variabilité d'une année à l'autre et révèle que certains cycles peuvent être associés à l'oscillation nord-atlantique (NAO) et à d'autres paramètres environnementaux. Nos dossiers montrent également une tendance à la baisse de la couverture glacielle et de la durée de la saison des glaces, qui n'est toutefois pas statistiquement significative**.**

On croit que la présence de glace a un effet modérateur sur les ondes de tempête et sur les vagues qui causent les inondations et l'érosion. Des indices de la sévérité des conditions des glaces ont été calculés et devraient être utilisés dans les études qui tentent de démontrer ce lien sur le plan quantitatif.

Bien que cette étude n'ait pas eu pour but d'établir la corrélation exacte de la glace avec les ondes de tempête et avec l'érosion causée par les vagues, il s'agit d'une observation qualitative de l'effet modérateur de la présence de glaces. Par conséquent, nous supposons que dans un climat plus chaud à l'avenir, entraînant une diminution de la concentration et de l'épaisseur des glaces dans le golfe du Saint-Laurent, les ondes de tempête et l'érosion causée par les vagues pourront être plus graves.

D'autres enjeux n'ont pas été traités dans la présente étude. Il s'agit notamment des dommages directs causés par la glace qui est transportée sur la côte par la tension du vent et la pression des glaces, comme pendant la tempête du 21 janvier 2000; et des conséquences de la perte potentielle de la barrière de protection saisonnière qu'offre la glace de rive, perte entraînée par le futur réchauffement climatique.

4.2.13 Références

Abraham, J., Parkes, G.S. and Bowyer, P., 1999 The transition of the Saxby Gale into an extratropical storm, 23rd Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. American Meteorological Society, Dallas.

Ballicater. 2000. The Canadian Ice Service Digital Sea Ice Database: Assessment of Trends in the Gulf of St. Lawrence and Beaufort Sea Regions. Rapport de contrat soumis au Service canadien des glaces, Environnement Canada.

Battjes, J.A., 1974. Surf similarity, 14th Coastal Engineering Conference. American Society of Civil Engineers, Copenhagen, pp. 466-479.

Bevan, J. 2000. *Tropical cyclone report: subtropical storm 25-29 October 2000*. National Hurricane Center Report [http://www.nhc.noaa.gov/2000subtropical.html].

Bobanovic, J., K. Thompson, S. Desjardins & H. Ritchie. 2000. Real-time forecasts of the January 21 storm surge in Atlantic Canada. *Résumés*, *Société canadienne de météorologie et d'océanographie*, *34e Congrès*, Victoria, C.-B.

Boer, G.J., Flato, G.M. and Ramsden, D., 2000. A transient climate change simulation with historical and projected greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. Climate Dynamics, 16: 427-450.

Bowyer P.J., G. Parkes et W. Richards. 2001. Extratropical transition of tropical cyclones: autumn severe weather threats. *Résumés*, *Société canadienne de météorologie et d'océanographie*, *35e Congrès*, Winnipeg, Manitoba.

Bigio, R., R. Lalbeharry et B.R. Thomas, B.R. 2000. Dynamic fetch and the "rogue" wave event at Port-Aux-Basques. *Résumés*, *Société canadienne de météorologie et d'océanographie*, *34e Congrès*, Victoria, C.-B.

Canavan, T., 1996. Climate of the Atlantic region. In: R.W. Shaw (Editor), Workshop Proceedings, Climate Change and Climate Variability in Atlantic Canada. Environment Canada Occasional Report No. 9, Halifax, pp. 11-15.

Dawson, W.B. 1917. *Tide levels and datum planes in eastern Canada: from determinations by the Tidal and Current Survey up to the year 1917*. Department of the Naval Service, Ottawa, 95 p.

Flato, G.M. and G.J. Boer (2001); *Warming asymmetry in climate change simulations*. Geophysical Research Letters, **28**, 195-198.

Forbes, D.L., G. Parkes, C. O'Reilly, R. Daigle, R. Taylor et N. Catto. 2000. Storm-surge, sea-ice, and wave impacts of the 21-22 January 2000 storm in coastal communities of Atlantic Canada. *Résumés*, *Société canadienne de météorologie et d'océanographie*, *34e Congrès*, Victoria, C.-B.

Forbes, D.L., G.S. Parkes, R.B. Taylor, K. Thompson, C. O'Reilly, D.G.E. Liverman, N. Catto et D. Bérubé,. 2001a. Coastal storm impacts in Atlantic Canada: three major storms of the year 2000. *Abstracts Volume 26*. Association géologique du Canada et Association minéralogique du Canada, St-Jean de Terre-Neuve, A45. [http://cgrg.geog.uvic.ca/abstracts/ForbesCoastalThree.html].

Forbes, D.L., G.S. Parkes, G.K. Manson, L.A. Ketch, et S.M. Solomon. 2001b. Shoreline retreat and coastal storms in the southern Gulf of St. Lawrence. American Geophysical Union, Spring Meeting, Boston, abstract OS51A-04. [http://cgrg.geog.uvic.ca/abstracts/ForbesStormsStorms.html].

Galbraith, P.W. 1979. *Atlantic region storm surge project. Preliminary Report*. Service de l'environnement atmosphérique, Note technique. MAES 79–2.

Galvin, C.J., 1968. Breaker type classification on three laboratory beaches. Journal of Geophysical Research, 73: 3651-3659.

Gaughan, M.K. and Komar, P.D., 1975. The theory of wave propagation in water of gradually varying depth and the prediction of breaker type and height. Journal of Geophysical Research, 80: 2991-2996.

Gyakum, J.R., Zhang, D.-L., Witte, J., Thomas, K. and Wintels, W., 1996. CASP II and the Canadian cyclones during the 1989-1992 cold seasons. Atmosphere-Ocean, 34: 1-16.Carrera, G., Vaníček, P. & Cramer, M.R. 1990. *The compilation of a map of recent vertical crustal movements in Canada*. DSS research Contract File No. 50SS.23244-7-4257.

Hart, R.E. and Evans, J.L., 2001. A climatology of the extratropical transition of Atlantic tropical cyclones. Journal of Climate, 14: 546-564.

Hirsch, M. E., A.T. DeGaetano et S.J. Colucci. 1999. The development and analysis of an east coast winter storm climatology. *Proceedings, 17thConference on Weather Analysis and Forecasting 1999*, American Meteorological Society, Denver, Colorado, 10-15.

Jarvinen, B.R., Neumann, C.J. and Davis, M.A.S. 1984. A tropical cyclone data tape for the North Atlantic basin, 1886–1983: Contents, limitations, and uses. NOAA Technical Memorandum NWS NHC 22, National Hurricane Center, U.S. Department of Commerce (http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/noaatechmemo1-5.pdf).

Kindervater, A.D. 1984. Flooding events in New Brunswick an historical perspective. Direction de la planification et de la gestion de l'eau, Direction générale des eaux intérieures. Région de l'Atlantique. Environnement Canada. Rapport IWD-AR-WPMB-84-65.

Komar, P.D., 1998. Beach Processes and Sedimentation, 2nd Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 544 pp.

Lambert, S.J., 1995. The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths. Journal of Climate, 8: 1447-1452.

Lambert. S.J. 1996. Intense extratropical northern hemisphere winter cyclone events: 1899-1991. *Journal of Geophysical Research*, **101** (D16), 21319-21325.

Lambert, S.J., 2004. Changes in winter cyclone frequencies and strengths in transient enhanced greenhouse warming simulations using two coupled climate models. Atmosphere-Ocean, 42: 173-181

Lewis, P.J. et M.D. Moran,. 1984. *Severe Storms off Canada's East Coast: A Catalogue Summary for the Period 1957 to 1983.* Centre climatologique canadien, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview, Ontario. Rapport No. 84-13.

Ludlum, D.M. 1961. The Kennedy Inaugural Storm. *Weatherwise*, **14** (2), 77-78.

MacAfee, A., G. Parkes, H. Ritchie et S. Desjardins. Nov. 2001. Storm surge prediction and water level alert system for Atlantic Canada. Affiche. International workshop on operational marine forecasting, Nov 19-21, Halifax, Nouvelle-Écosse

MacPhee, J., W. Richards et E. McIldoon. 2000. Synoptic description of the Atlantic storm of January 21, 2000. *Résumés*, *Société canadienne de météorologie et d'océanographie*, *34e Congrès*, Victoria, C.-B.

Manson, G.K., L.A. Ketch et G.S. Parkes. 2002. **Wind climatology.** In : *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island* (Forbes, D.L. et R.W. Shaw, dir. de publ.). Commission géologique du Canada, dossier public **4261**, Document d'appui **4**, 37 p., et 6 pièces jointes (sur CD-ROM).

Manson, G.K., D.L. Forbes et G.S. Parkes. 2002. **Wave climatology.** In: *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island* (Forbes, D.L. et R.W. Shaw, dir. de publ.). Commission géologique du Canada, dossier public **4261**, document d'appui, 31 p., et une pièce jointe (sur CD-ROM).

McCulloch, M., D.L. Forbes, R.W. Shaw et équipe scientifique A041. 2002. Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island (Forbes, D.L. et R.W. Shaw, dir. de publ.). Commission géologique du Canada, Dossier public **4261**, xxxiv + 62 p. et 11 documents d'appui (672 pages [.pdf] sur 1 CD-ROM).

Mysak, L., Ingram, R., Wang, J., et van der Baaren, A. 1996. The anomalous sea-ice extent in Hudson Bay, Baffin Bay and the Labrador Sea during three simultaneous NAO and ENSO episodes, Atmosphere-Ocean, **34**(2), 313-343.

Normales climatiques au Canada, 1961-90. 1993. Service de l'environnement atmosphérique. Environnement Canada, Publication du Programme climatologique canadien, Downsview..

Parkes, G.S., L.A. Ketch et C.T. O'Reilly. 1997. Storm surge events in the Maritimes. *Proceedings, Canadian Coastal Conference 1997*, Canadian Coastal Science & Engineering Association, Guelph, Ontario, 115-129.

Parkes, G.S., D.L. Forbes et L.A. Ketch. 2002. **Sea-level rise.** In: *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island* (Forbes, D.L. et R.W. Shaw, dir. de publ.). Commission géologique du Canada, Dossier public **4261**, Document d'appui **1**, 33 p., et 5 pièces jointes (sur CD-ROM).

Parkes, G.S & Ketch, L.A. 2002. **Storm surge climatology.** In : *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island* (Forbes, D.L. et R.W. Shaw, dir. de publ.). Commission géologique du Canada, Dossier public **4261**, Document d'appui **2**, 74 p., et 2 pièces jointes (sur CD-ROM).

Prinsenberg, S., Peterson, I., Narayanan, S., et Umoh, J. 1997. Interaction between atmosphere, ice cover and ocean off Labrador and Newfoundland from 1962 to 1992, Journal canadien des sciences halieutiques et aquatiques, **54** (Supp. 1), 30-39.

Ruffman, A. 1999. A multidisciplinary and interscientific study of the Saxby Gale: an October 4-5, 1869 hybrid hurricane and record storm surge. Bulletin de la SCMO, **27**, 67-73.

Rabinovich, A. 2005. Tsunamis and Tsunami Research. [http://www-sci.pac.dfo-mpo.gc.ca/osap/projects/tsunami/tsunamiasia_e.htm]

Robichaud, A., et Y. Bégin. 1997. The effects of storms and sea-level rise on a coastal forest margin in New Brunswick, Eastern Canada. *Journal of Coastal Research, 13(2), pp 429-439*. Fort Lauderdale (Florida). ISSN 0749-0208.

Sanders, F., et J.R. Gyakum., 1980. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb". *Monthly Weather Review*, **108**, 1589-1606.

Smith, E.R., et N.C. Kraus. 1990. Laboratory study on macro-features of wave breaking over bars and artificial reefs. Coastal Engineering Research Center Technical Report CERC-90-12, US Army Corps of Engineers.

Swail, V.R., V.J. Cardone et A.T. Cox. 1998. A long term North Atlantic wave hindcast, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Melbourne, p. 1-16.

Swail, V.R., E.A. Ceccacci et A.T. Cox. 2000. The AES40 North Atlantic Wave Reanalysis: Validation and Climate Assessment, 6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Monterey.

Tables des marées et courants du Canada.[Annuel]. *Vol. 2, Golfe du Saint-Laurent*. Service hydrographique du Canada, Pêches et Océans Canada, Ottawa.

Thopmson, K.R., H. Ritchie, N.B. Bernier, J. Bobanovic, S. Desjardins, P. Pellerin, W. Blanchard, B. Smith et G. Parkes. 2002. Modelling storm surges and flooding risk at Charlottetown. In : *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince*

Edward Island (Forbes, D.L. et R.W. Shaw, dir. de publ.). Commission géologique du Canada, Dossier public **4261**, Document d'appui **6**, 48 p. (sur CD-ROM).

Webster, T., D.L. Forbes, S. Dickie, R. Covill et G.S. Parkes. 2001. Airborne imaging, digital elevation models, and flood maps. In: *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island* (Forbes, D.L. et R.W. Shaw, dir. de publ). Commission géologique du Canada, Dossier public **4261**, Document d'appui **8**, 31 p., et 2 pièces jointes (sur CD-ROM).

Wilby, R.L., C.W. Dawson et E.M. Barrow. 2002. SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Environmental and Modelling Software, 17: 145-157.

Zhang K., Douglas, B.C. and Leatherman, S.P. 1997. East coast storm surges provide unique climate record. *Eos, Transactions of the American Geophysical Union*, **78**, 389 and 396–397.

4.2.14 Photos

Photo 1 Copyright 200 – Agence spatiale canadienne
Photos 2, 5 Mike Campbell, Environnement Canada
Photos 3, 4, 13, 16-18, 24, 25, 31 Réal Daigle, Environnement Canada
Photo 6 Météo Média
Photos 7, 10-12, 20, 21, 26-29 Daniel Goguen, Gouvernements locaux, Nouveau-Brunswick
Photos 8, 9 Donald Forbes, RNCan
Photos 14, 15 Gary Lee Collier, Pointe-du-Chêne
Photo 19 George Parkes, Environnement Canada
Photos 22, 23 Géraldine Arsenault, Éco-Centre Irving
Photo 30 Éric Tremblay, Parc national Kouchibouguac

4.2.15 Pièces jointes

4.2.15.1 Pièce jointe A.:Données mensuelles manquantes pour Charlottetown en pourcentage (1960-2005)

1960 à 2005

1960 à 1974 (avec contrôle de la qualité)

%	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974
Janv.	0,0	13,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Févr.	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mars	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Avr.	0,0	0,0	13,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0
Mai	0,0	0,0	12,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juin	41,3	9,9	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juil.	4,8	3,4	0,0	0,0	29,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Août	0,0	3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	42,1	35,5	0,0	0,0	0,0
Sept.	0,0	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,7	29,9	36,7	0,0	0,0
Oct.	2,8	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0
Nov.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Déc.	99,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

1975 à 1989 (avec contrôle de la qualité)

%	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Janv.	0,0	33,9	53,6	41,0	61,8	0,0	0,0	15,1	0,0	99,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Févr.	0,0	30,7	26,6	0,0	84,4	0,0	2,7	9,8	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mars	0,0	37,9	10,6	0,0	2,3	0,0	8,1	0,1	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	0,0	28,4
Avr.	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,9
Mai	0,0	0,0	9,5	0,0	10,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,6
Juin	0,0	0,0	22,1	24,0	99,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juil.	16,9	0,3	56,9	49,7	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Août	100,0	56,2	16,3	0,1	27,7	0,0	0,0	37,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sept.	75,6	0,0	42,8	17,9	6,7	0,0	0,1	49,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oct.	0,0	3,6	62,5	0,0	0,0	0,0	0,1	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nov.	73,2	27,6	0,7	99,9	12,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Déc.	27,2	69,9	15,2	100,0	3,6	0,0	99,9	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

1990 à 2005 (avec contrôle de la qualité)

%	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Janv.	11,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Févr.	0,0	0,0	0,0	46,3	0,0	0,0	11,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mars	0,0	0,0	0,0	79,6	0,0	0,0	21,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Avr.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	18,9	0,4	0,0	0,0
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,4	0,0	14,4	0,0	0,0	8,1	0,0	0,0	1,2	0,3	0,0
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	35,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	0,0
Juil.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	99,9
Août	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	100,0
Sept.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0
Oct.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,3	0,0	100,0
Nov.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,9	4,4	0,0	15,8	1,7	0,0	100,0
Déc.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	100,0

1911 à 1959

1911 à 1923

	1911	1912	1913	1914	1915	1916	1917	1918	1919	1920	1921	1922	1923
Janv.	100	3,2	0,0	0,0	0,0	100	1,6	0,0	99,9	0,1	100	100	0,0
Févr.	100	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	100	0,0	100	100	0,0
Mars	100	4,8	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	100	0,0	100	100	0,0
Avr.	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	100	1,7	0,0	100	0,0	100	100	0,0
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0	99,9	100	0,0	0,0	100	0,0	100	45,3	0,0
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	100	3,5	0,0	0,0	100	49,9	100	0,0	99,9
Juil.	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	100	100	0,0	100
Août	0,0	1,7	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	100	100	0,0	100
Sept	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	100	100	0,0	100
Oct.	0,0	0,0	22,4	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	100	100	0,0	100
Nov.	6,5	0,0	5,4	0,0	100	3,3	0,0	0,0	100	100	100	0,0	100
Déc.	0,1	0,0	3,2	0,0	100	0,0	0,0	0,0	100	100	100	0,0	100

1924 à 1936

	1924	1925	1926	1927	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936
Janv.	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100
Févr.	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100
Mars	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100
Avr.	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100
Mai	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100
Juin	100	0,1	99,9	100	100	99,9	100	100	0,0	100	100	100	100
Juil.	100	0,0	100	100	0,1	100	100	0,1	93,4	100	100	100	100
Août	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100	100
Sept	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100	100
Oct.	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100	100
Nov.	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100	100
Déc.	100	0,0	100	100	0,0	100	100	0,0	100	100	100	100	100

1937 à 1949

	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949
Janv.	100	0,1	0,0	1,6	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Févr.	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mars	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Avr.	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mai	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juin	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juil.	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Août	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6
Sept	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oct.	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nov.	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Déc.	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

1911-1959

	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959
Janv.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Févr.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mars	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Avr.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juil.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Août	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sept	0,0	0,0	0,0	0,0	23,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Oct.	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nov.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Déc.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

4.2.15.2 Pièce jointe B: Estimation du niveau d'eau à Pointe-du-Chêne pendant la tempête du 29 octobre

La figure B1 illustre la vérification du modèle des ondes de tempête de Dalhousie, utilisé par Environnement Canada pour la tempête du 29 octobre 2000 à Escuminac. Trois passes du modèle sont illustrées, débutant les 27, 28 et 29 octobre à 0000 UTC. L'onde de tempête (qu'on avait prévue significative) était néanmoins sous-évaluée par le modèle (probablement en raison de la force des vents prévus), la passe la plus exacte étant celle du 29. Le niveau d'eau prévu pour la deuxième pointe l'après-midi du 29 (c'est-à-dire au moment où le niveau de l'eau était le plus élevé à Pointe-du-Chêne) était erroné d'environ 35 cm.

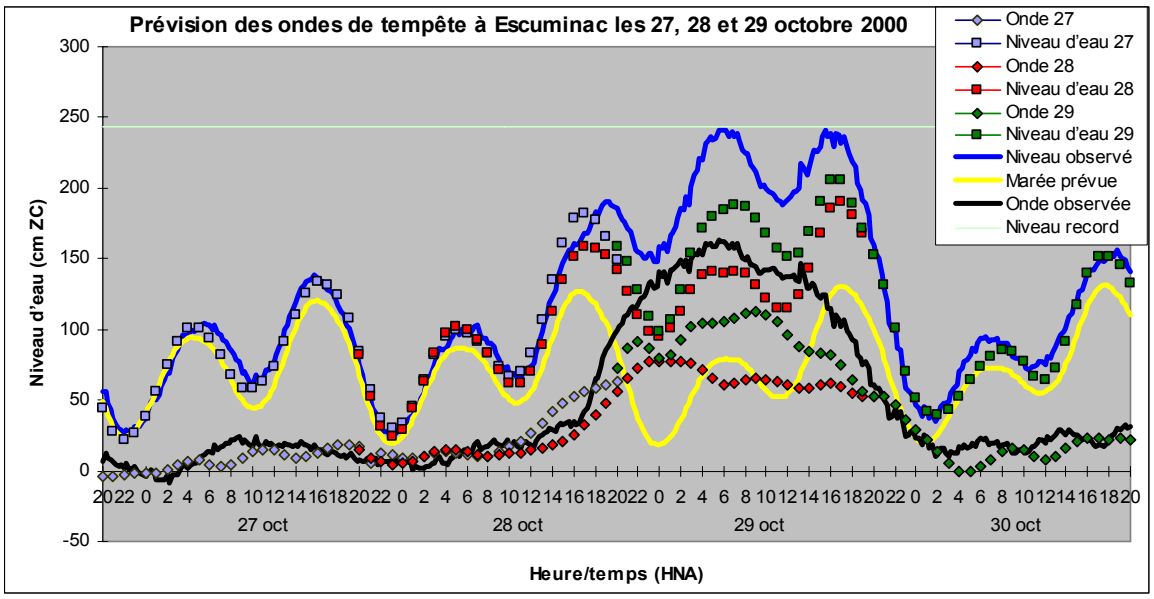


Figure B1. Niveau d'eau atteint ainsi que les prévisions du modèle d'ondes de tempête pour Escuminac pour le 29 octobre 2000.

La figure B2 illustre les prévisions du modèle d'ondes de tempête pour Pointe-du-Chêne, selon la passe du modèle du 29 octobre 2000. Nous présentons également une onde corrigée, calculée par l'ajout de l'erreur (c'est-à-dire la différence entre les valeurs observées et prévues) pour l'onde de tempête à Escuminac, à l'onde et au niveau d'eau prévus pour Pointe-du-Chêne. Les prévisions du modèle d'onde de tempête indiquent une onde maximale de 1,43 m et un niveau d'eau de 2,65 m ZC. Les valeurs corrigées donnent une onde de tempête de 1,91 m et un niveau d'eau de 3,11 m ZC.

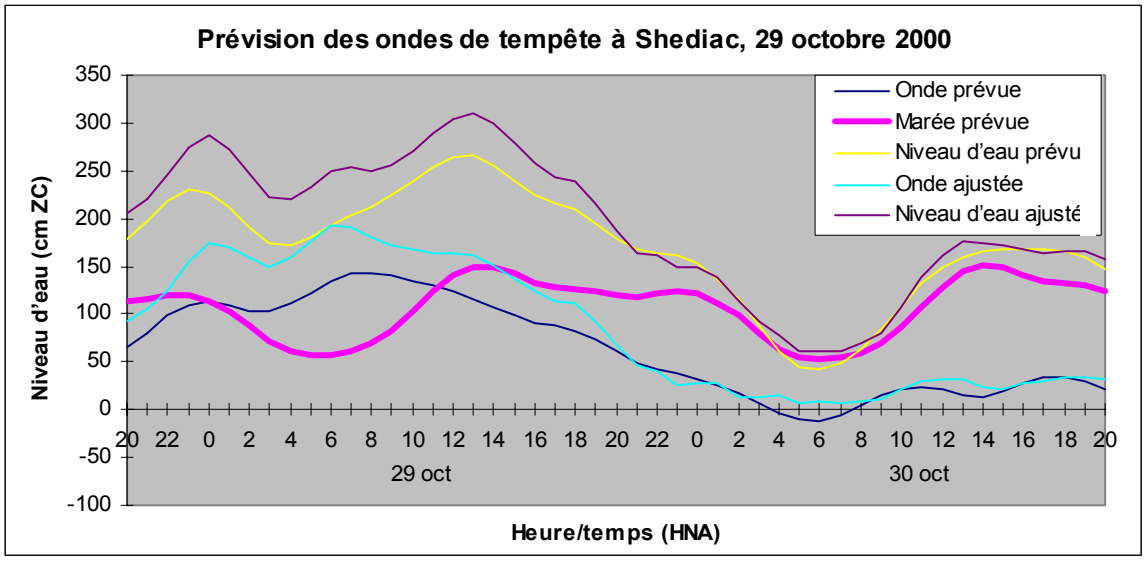
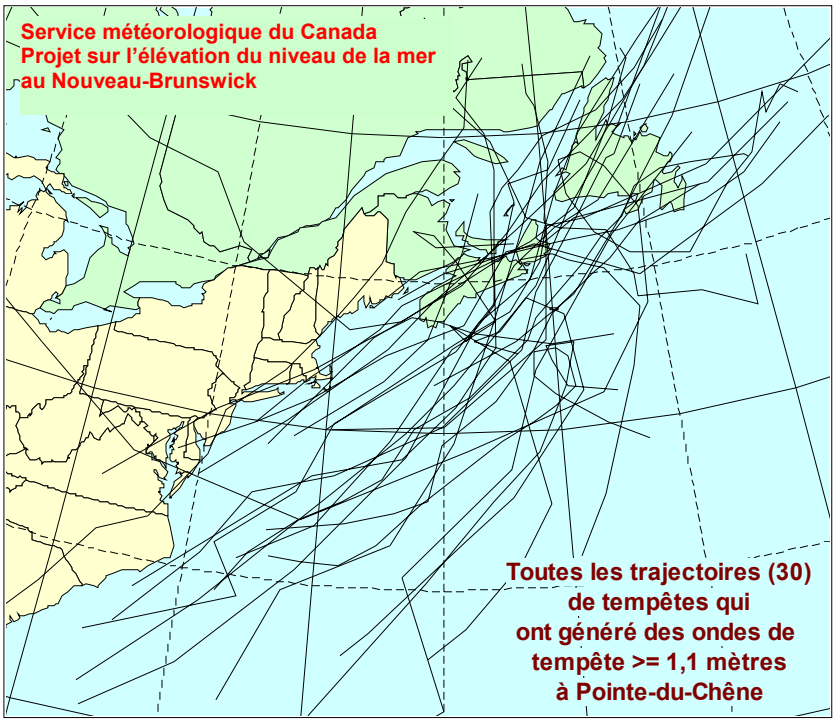
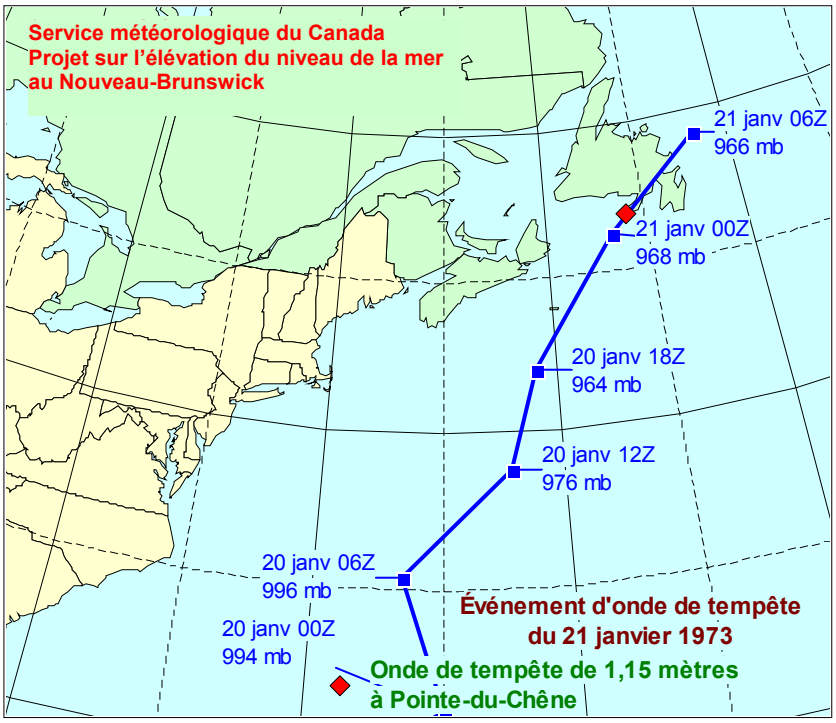
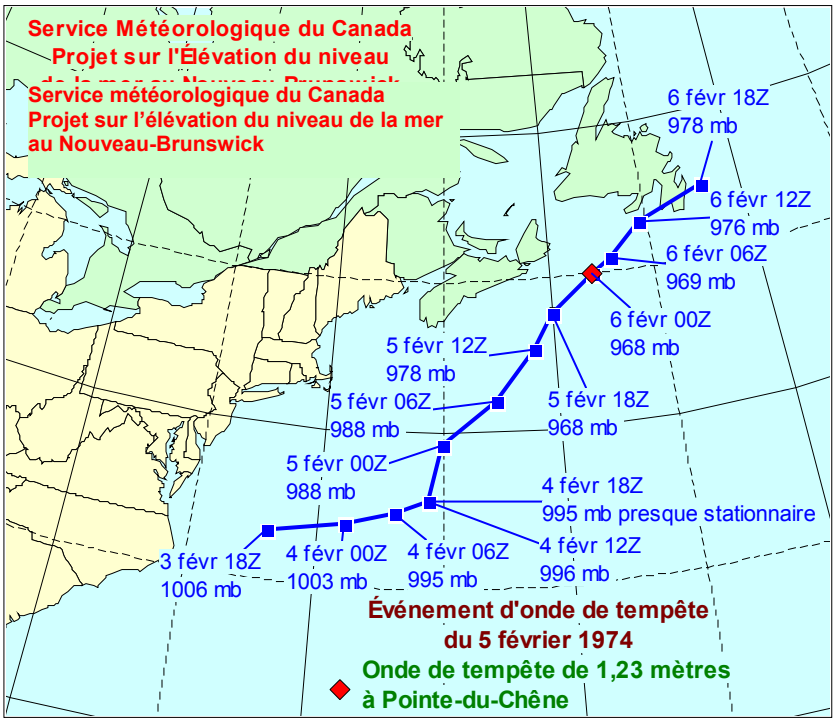


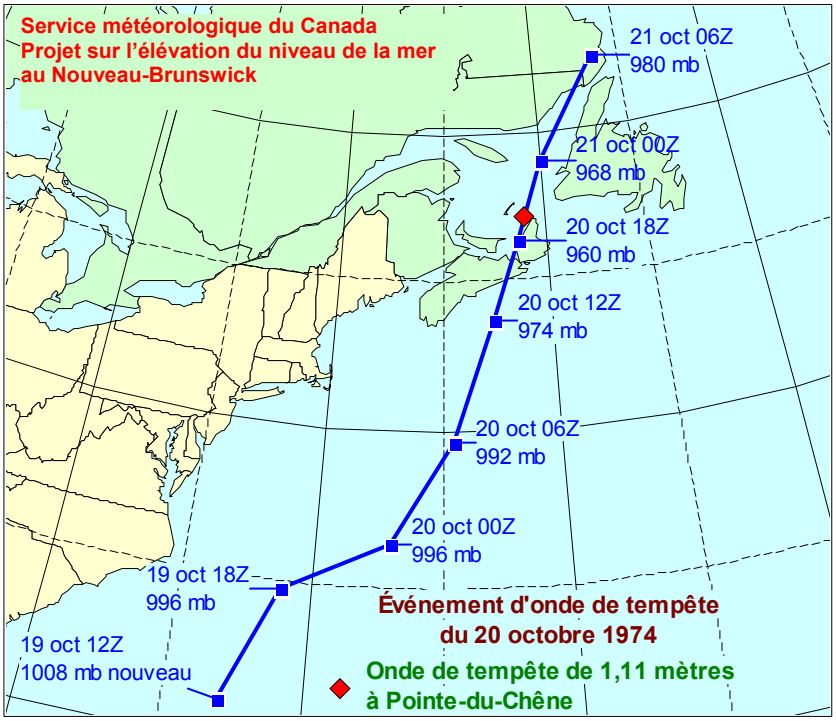
Figure B2. Prévisions du modèle d'ondes de tempête pour Pointe-du-Chêne pour le 29 octobre 2000.

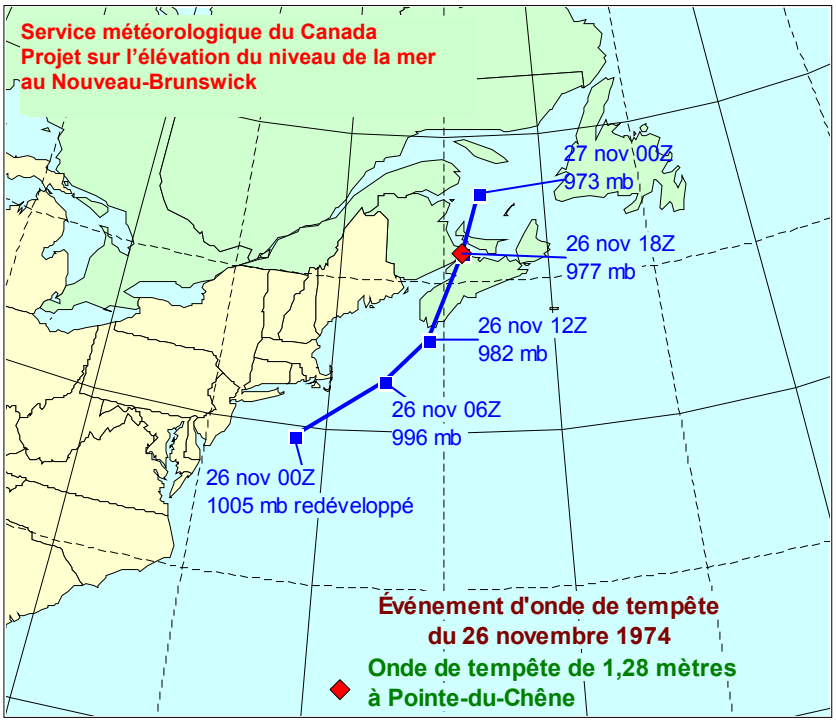
4.2.15.3 Pièce jointe C: Cartes des trajectoires des tempêtes

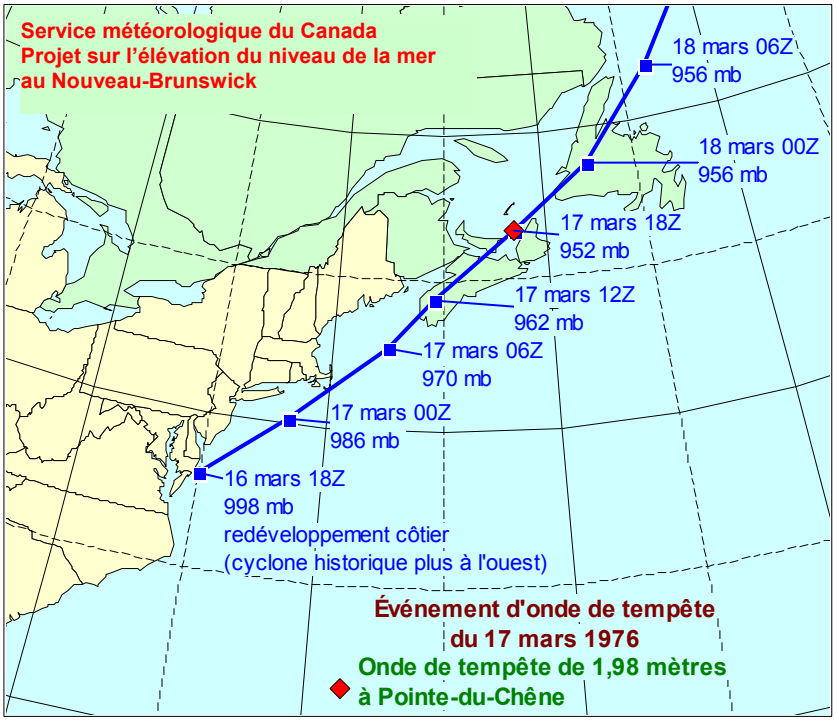


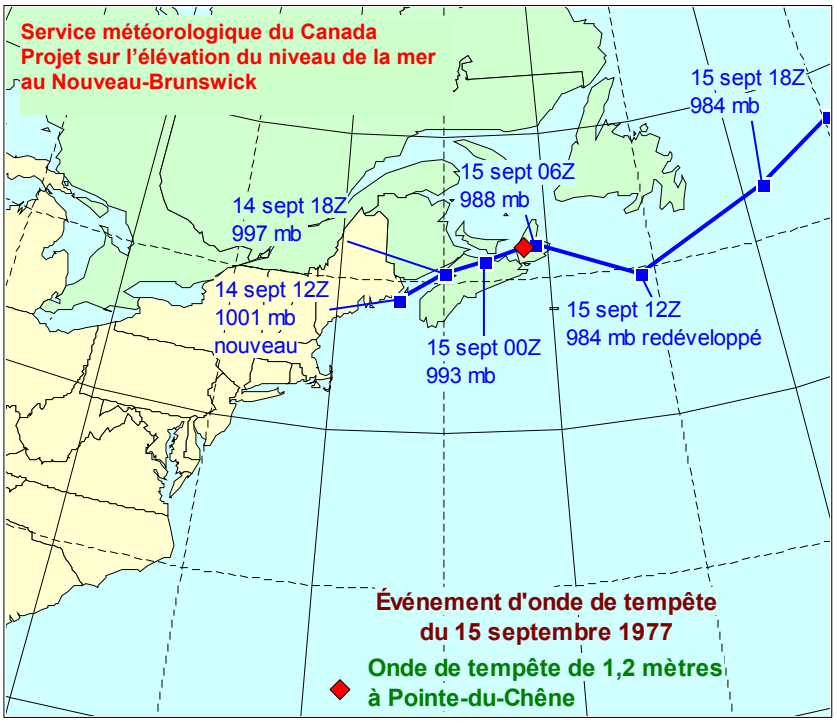


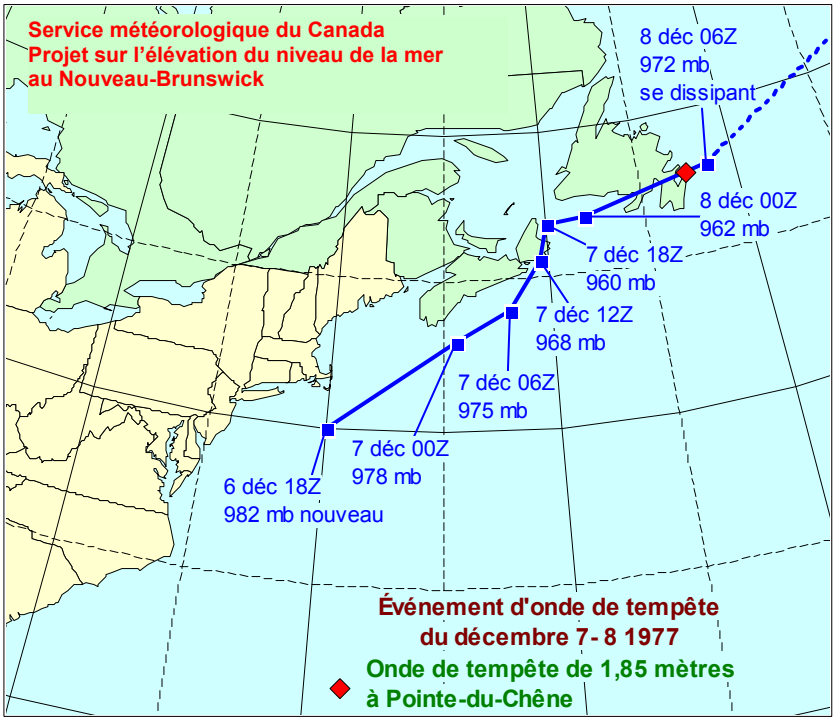

Service Météorologique du Canada
Projet sur l'Élévation du niveau
Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
6 févr 18Z
978 mb
6 févr 12Z
976 mb
6 févr 06Z
969 mb
6 févr 00Z
968 mb
5 févr 12Z
978 mb
5 févr 06Z
988 mb
5 févr 18Z
968 mb
5 févr 00Z
988 mb
4 févr 18Z
995 mb presque stationnaire
3 févr 18Z
1006 mb
4 févr 00Z
1003 mb
4 févr 06Z
995 mb
4 févr 12Z
996 mb
Événement d'onde de tempête
du 5 février 1974
Onde de tempête de 1,23 mètres
à Pointe-du-Chêne

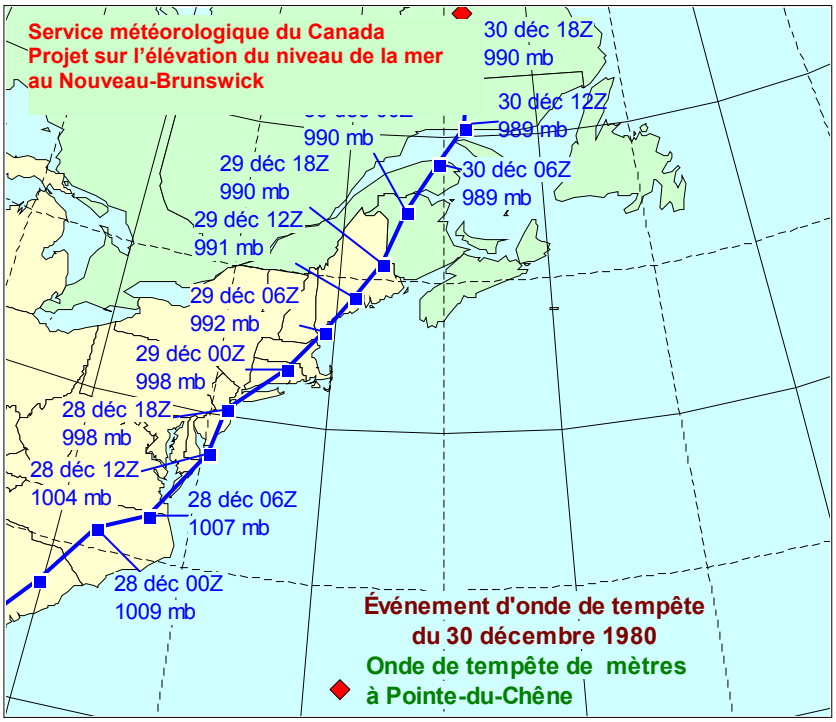

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
21 oct 06Z
980 mb
21 oct 00Z
968 mb
20 oct 18Z
960 mb
20 oct 12Z
974 mb
20 oct 06Z
992 mb
20 oct 00Z
996 mb
19 oct 18Z
996 mb
19 oct 12Z
1008 mb nouveau
Événement d'onde de tempête
du 20 octobre 1974
Onde de tempête de 1,11 mètres
à Pointe-du-Chêne

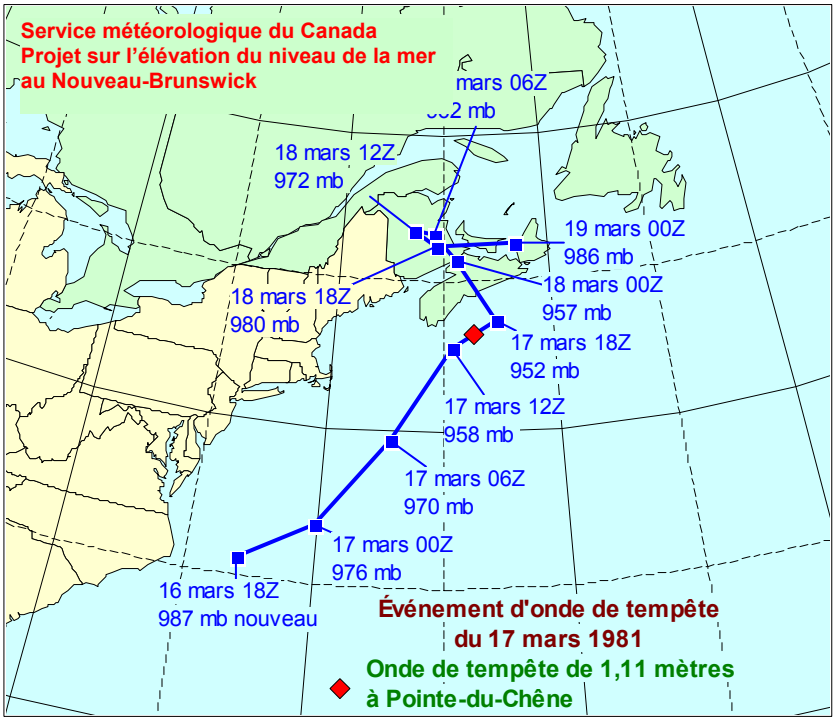

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
27 nov 00Z
973 mb
26 nov 18Z
977 mb
26 nov 12Z
982 mb
26 nov 06Z
996 mb
26 nov 00Z
1005 mb redéveloppé
Événement d'onde de tempête
du 26 novembre 1974
Onde de tempête de 1,28 mètres
à Pointe-du-Chêne

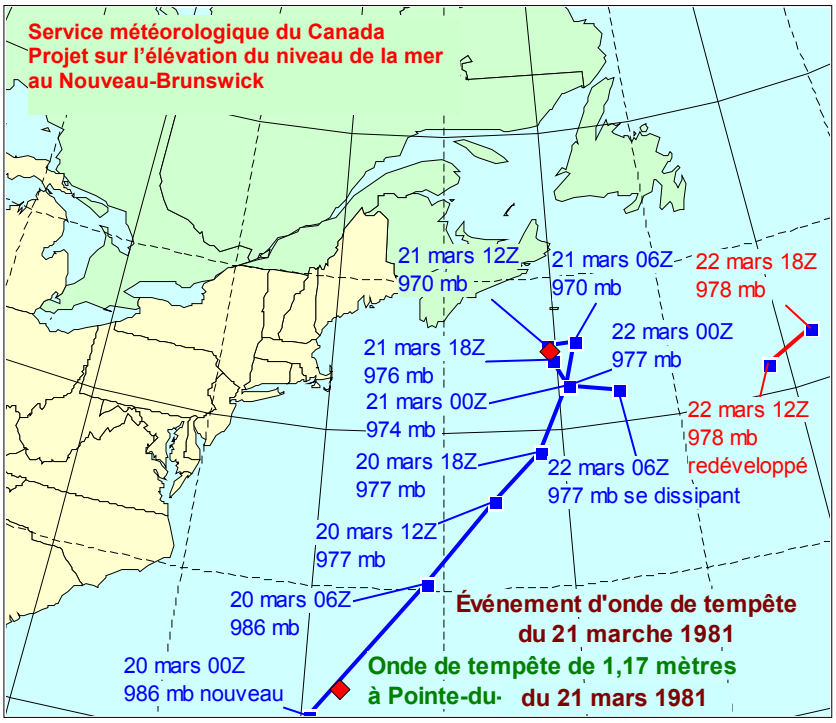

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
18 mars 06Z
956 mb
18 mars 00Z
956 mb
17 mars 18Z
952 mb
17 mars 12Z
962 mb
17 mars 06Z
970 mb
17 mars 00Z
986 mb
16 mars 18Z
998 mb
redéveloppement côtier
(cyclone historique plus à l'ouest)
Événement d'onde de tempête
du 17 mars 1976
Onde de tempête de 1,98 mètres
à Pointe-du-Chêne

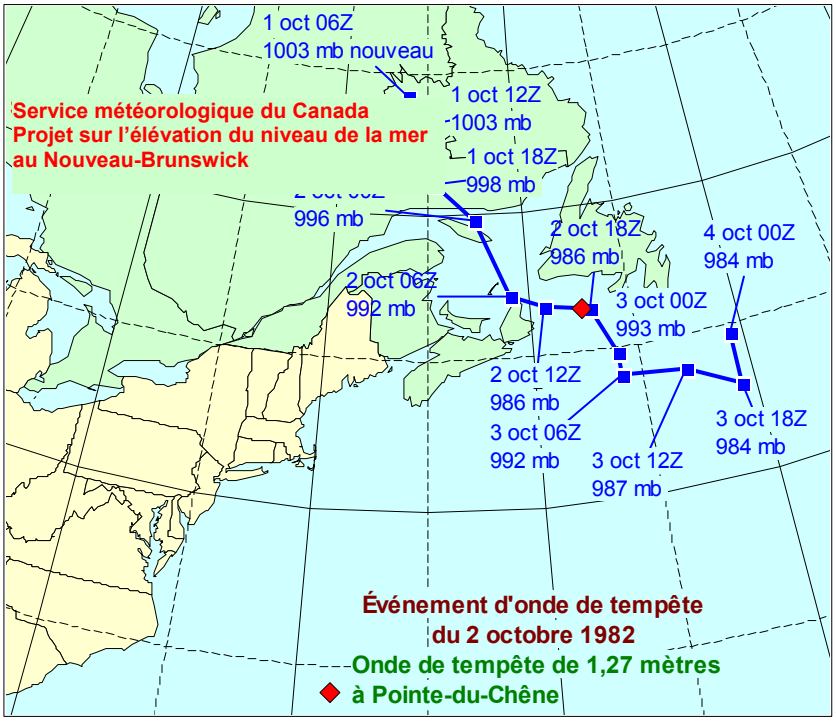

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
15 sept 18Z
984 mb
15 sept 06Z
988 mb
14 sept 18Z
997 mb
14 sept 12Z
1001 mb
nouveau
15 sept 00Z
993 mb
15 sept 12Z
984 mb redéveloppé
Événement d'onde de tempête
du 15 septembre 1977
Onde de tempête de 1,2 mètres
à Pointe-du-Chêne

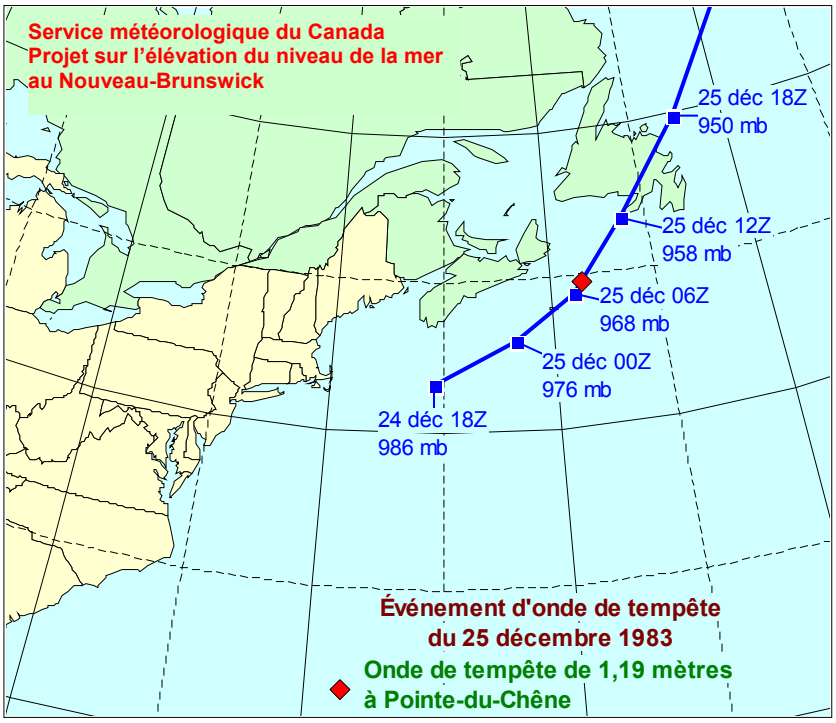

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
8 déc 06Z
972 mb
se dissipant
8 déc 00Z
962 mb
7 déc 18Z
960 mb
7 déc 12Z
968 mb
7 déc 06Z
975 mb
7 déc 00Z
978 mb
6 déc 18Z
982 mb nouveau
Événement d'onde de tempête
du décembre 7- 8 1977
Onde de tempête de 1,85 mètres
à Pointe-du-Chêne

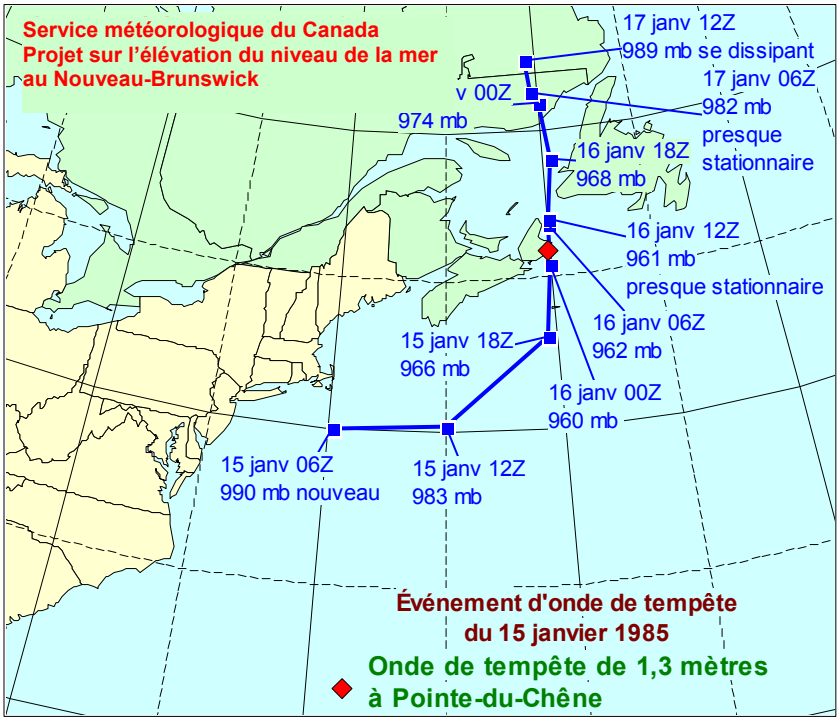

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
30 déc 18Z
990 mb
30 déc 12Z
989 mb
990 mb
29 déc 18Z
990 mb
30 déc 06Z
989 mb
29 déc 12Z
991 mb
29 déc 06Z
992 mb
29 déc 00Z
998 mb
28 déc 18Z
998 mb
28 déc 12Z
1004 mb
28 déc 06Z
1007 mb
28 déc 00Z
1009 mb
Événement d'onde de tempête
du 30 décembre 1980
Onde de tempête de mètres
à Pointe-du-Chêne

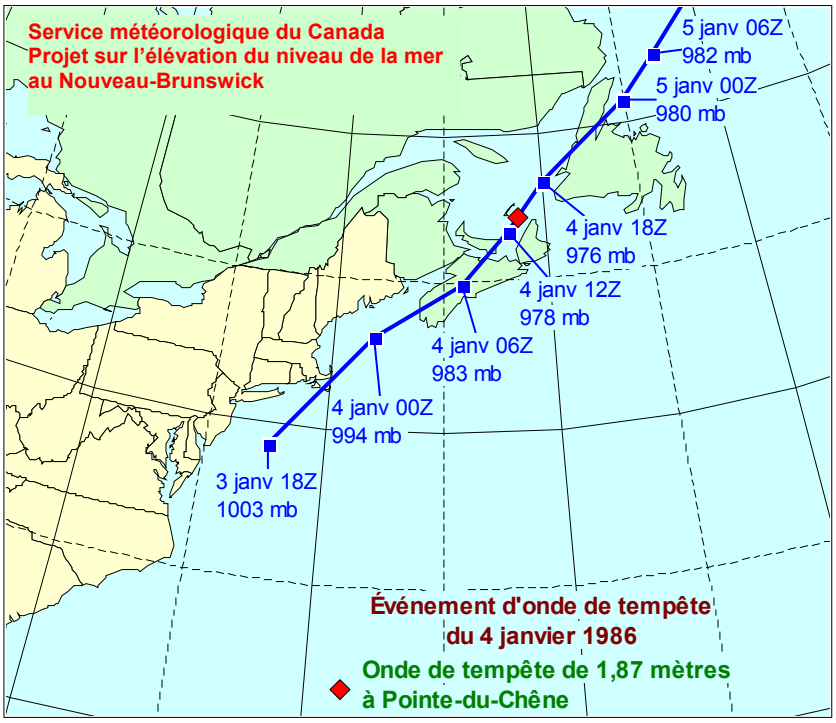

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
mars 06Z
2 mb
18 mars 12Z
972 mb
19 mars 00Z
986 mb
18 mars 00Z
957 mb
18 mars 18Z
980 mb
17 mars 18Z
952 mb
17 mars 12Z
958 mb
17 mars 06Z
970 mb
17 mars 00Z
976 mb
16 mars 18Z
987 mb nouveau
Événement d'onde de tempête
du 17 mars 1981
Onde de tempête de 1,11 mètres
à Pointe-du-Chêne

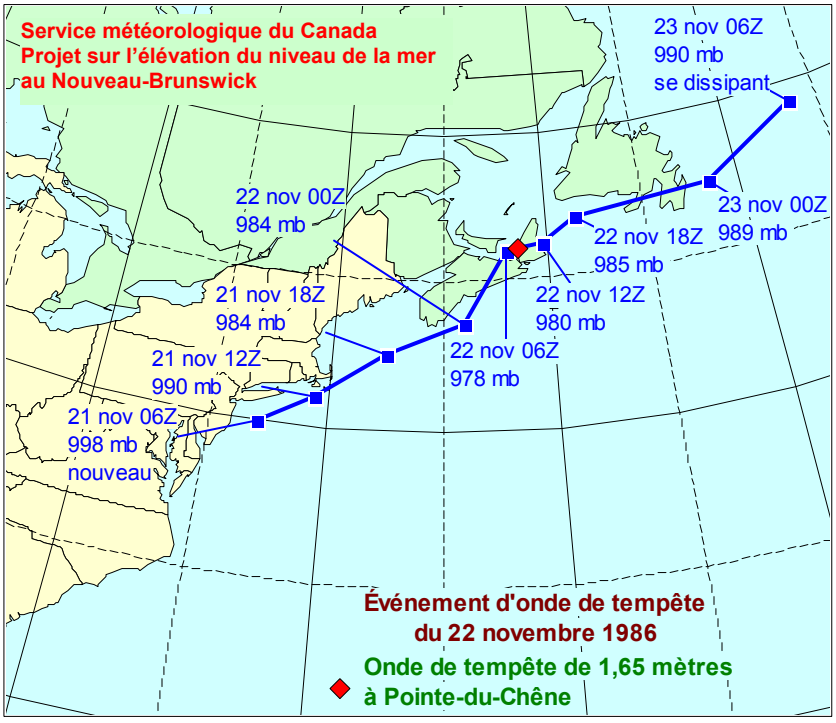

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
21 mars 12Z
970 mb
21 mars 06Z
970 mb
22 mars 18Z
978 mb
22 mars 00Z
977 mb
21 mars 18Z
976 mb
21 mars 00Z
974 mb
22 mars 12Z
978 mb
redéveloppé
20 mars 18Z
977 mb
22 mars 06Z
977 mb se dissipant
20 mars 12Z
977 mb
20 mars 06Z
986 mb
Événement d'onde de tempête
du 21 marche 1981
20 mars 00Z
986 mb nouveau
Onde de tempête de 1,17 mètres
à Pointe-du-
du 21 mars 1981

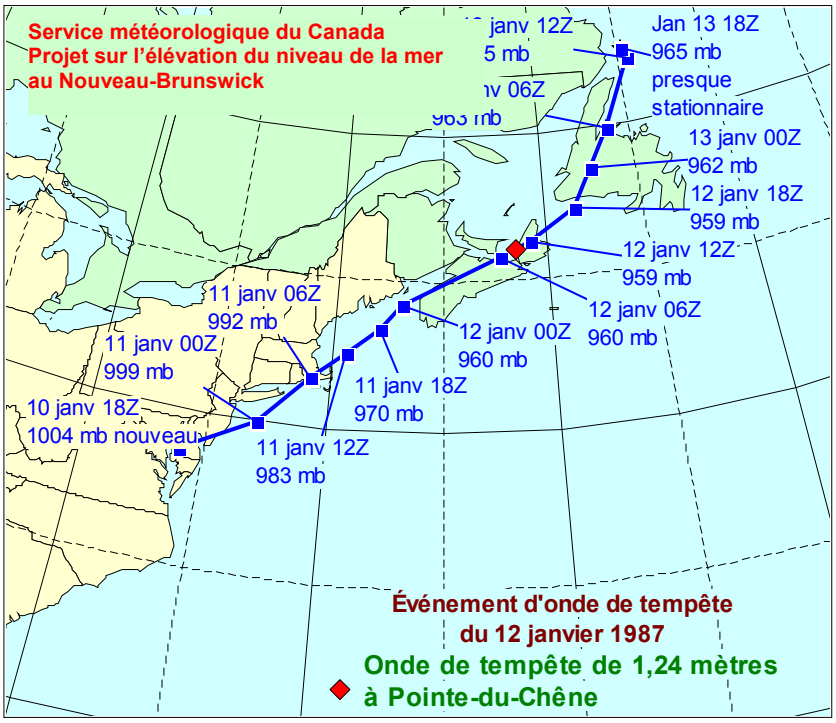

1 oct 06Z
1003 mb nouveau
Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
1 oct 12Z
1003 mb
1 oct 18Z
998 mb
996 mb
2 oct 18Z
986 mb
4 oct 00Z
984 mb
2 oct 06Z
992 mb
3 oct 00Z
993 mb
2 oct 12Z
986 mb
3 oct 06Z
992 mb
3 oct 18Z
984 mb
3 oct 12Z
987 mb
Événement d'onde de tempête
du 2 octobre 1982
Onde de tempête de 1,27 mètres
à Pointe-du-Chêne

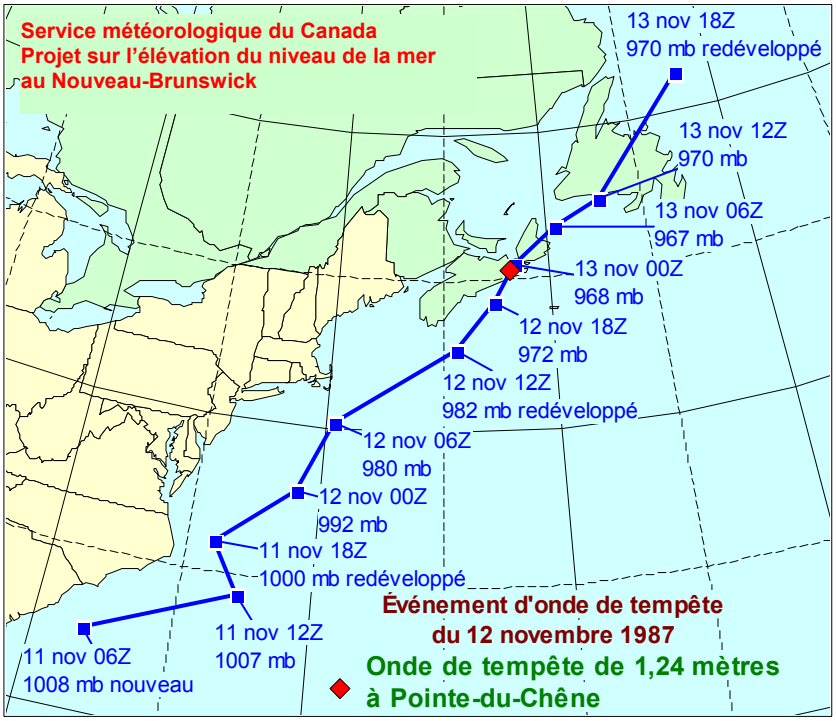

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
25 déc 18Z
950 mb
25 déc 12Z
958 mb
25 déc 06Z
968 mb
25 déc 00Z
976 mb
24 déc 18Z
986 mb
Événement d'onde de tempête
du 25 décembre 1983
Onde de tempête de 1,19 mètres
à Pointe-du-Chêne

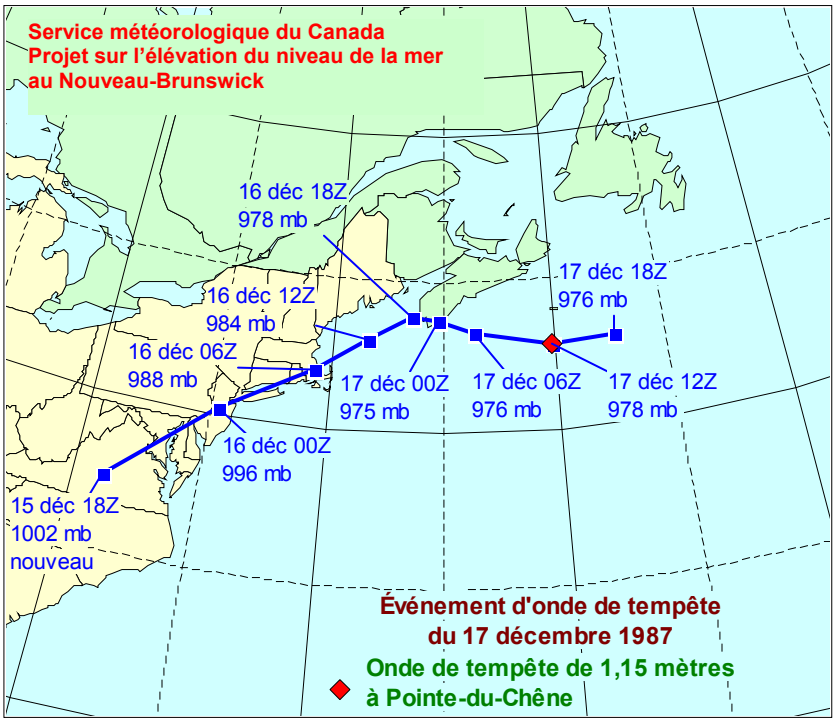

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
17 janv 12Z
989 mb se dissipant
17 janv 06Z
982 mb
presque
stationnaire
v 00Z
974 mb
16 janv 18Z
968 mb
16 janv 12Z
961 mb
presque stationnaire
16 janv 06Z
962 mb
15 janv 18Z
966 mb
16 janv 00Z
960 mb
15 janv 06Z
990 mb nouveau
15 janv 12Z
983 mb
Événement d'onde de tempête
du 15 janvier 1985
Onde de tempête de 1,3 mètres
à Pointe-du-Chêne

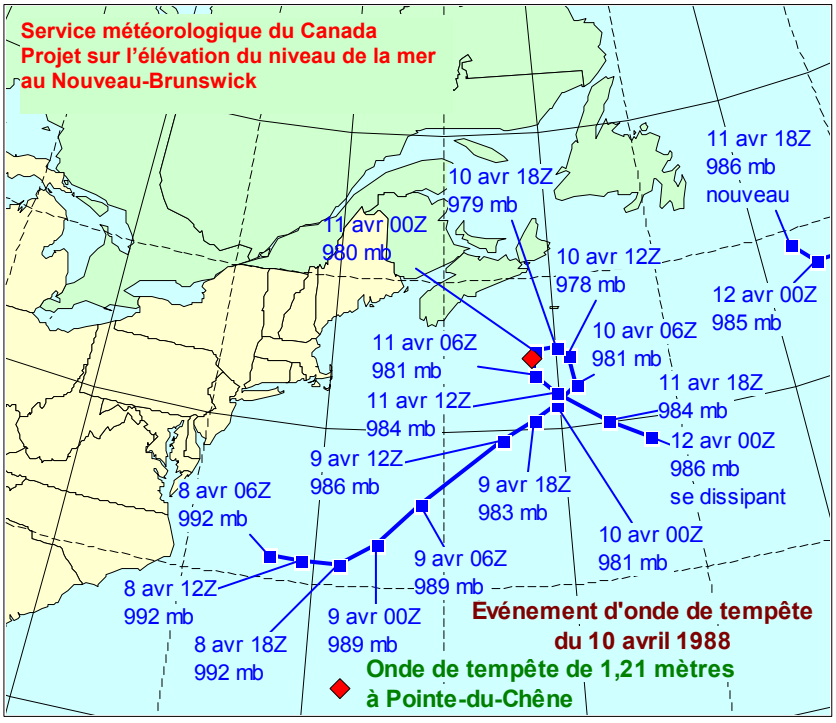

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
5 janv 06Z
982 mb
5 janv 00Z
980 mb
4 janv 18Z
976 mb
4 janv 12Z
978 mb
4 janv 06Z
983 mb
4 janv 00Z
994 mb
3 janv 18Z
1003 mb
Événement d'onde de tempête
du 4 janvier 1986
Onde de tempête de 1,87 mètres
à Pointe-du-Chêne

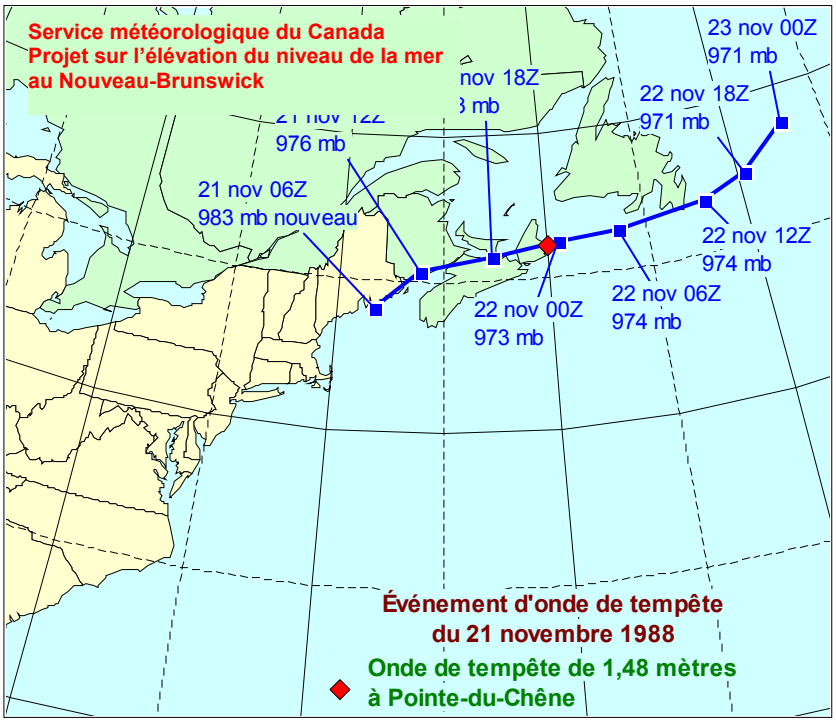

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
23 nov 06Z
990 mb
se dissipant
23 nov 00Z
989 mb
22 nov 18Z
985 mb
22 nov 12Z
980 mb
22 nov 06Z
978 mb
22 nov 00Z
984 mb
21 nov 18Z
984 mb
21 nov 12Z
990 mb
21 nov 06Z
998 mb
nouveau
Événement d'onde de tempête
du 22 novembre 1986
Onde de tempête de 1,65 mètres
à Pointe-du-Chêne

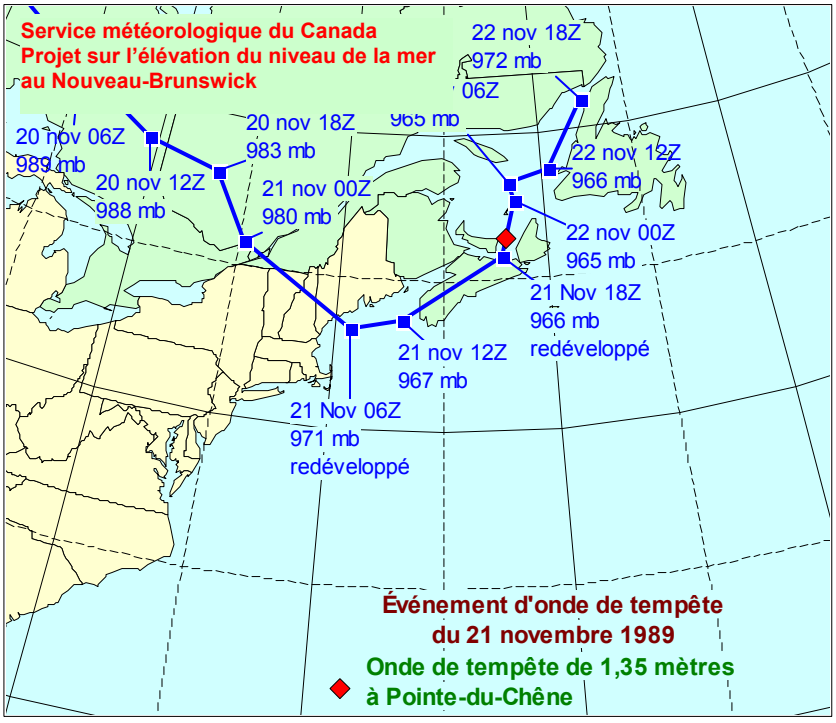

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
janv 12Z
5 mb
ıv 06Z
963 mb
Jan 13 18Z
965 mb
presque
stationnaire
13 janv 00Z
962 mb
12 janv 18Z
959 mb
12 janv 12Z
959 mb
12 janv 06Z
960 mb
12 janv 00Z
960 mb
11 janv 18Z
970 mb
11 janv 12Z
983 mb
11 janv 06Z
992 mb
11 janv 00Z
999 mb
10 janv 18Z
1004 mb nouveau
Événement d'onde de tempête
du 12 janvier 1987
Onde de tempête de 1,24 mètres
à Pointe-du-Chêne

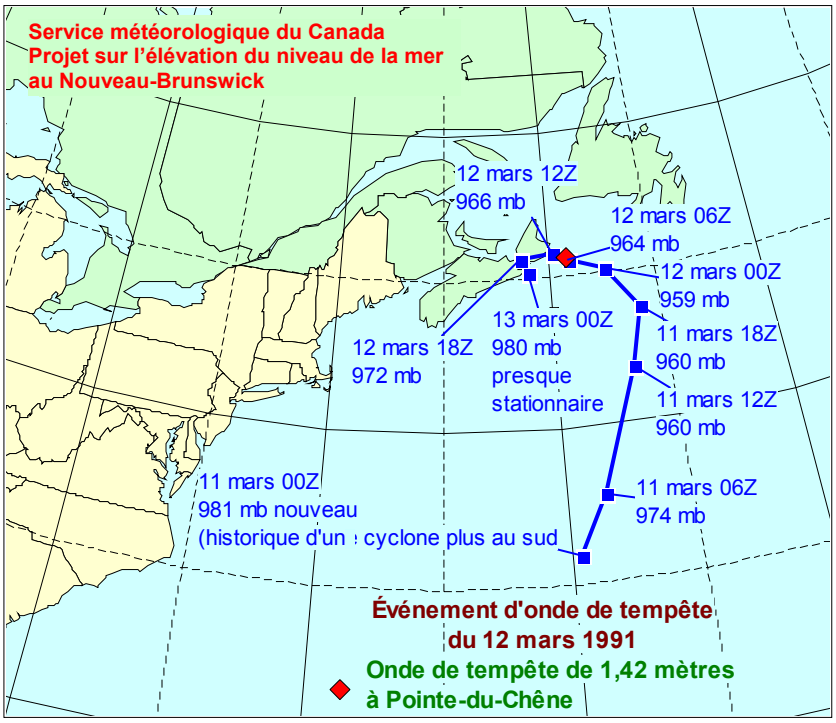

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
13 nov 18Z
970 mb redéveloppé
13 nov 12Z
970 mb
13 nov 06Z
967 mb
13 nov 00Z
968 mb
12 nov 18Z
972 mb
12 nov 12Z
982 mb redéveloppé
12 nov 06Z
980 mb
12 nov 00Z
992 mb
11 nov 18Z
1000 mb redéveloppé
11 nov 12Z
1007 mb
11 nov 06Z
1008 mb nouveau
Événement d'onde de tempête
du 12 novembre 1987
Onde de tempête de 1,24 mètres
à Pointe-du-Chêne

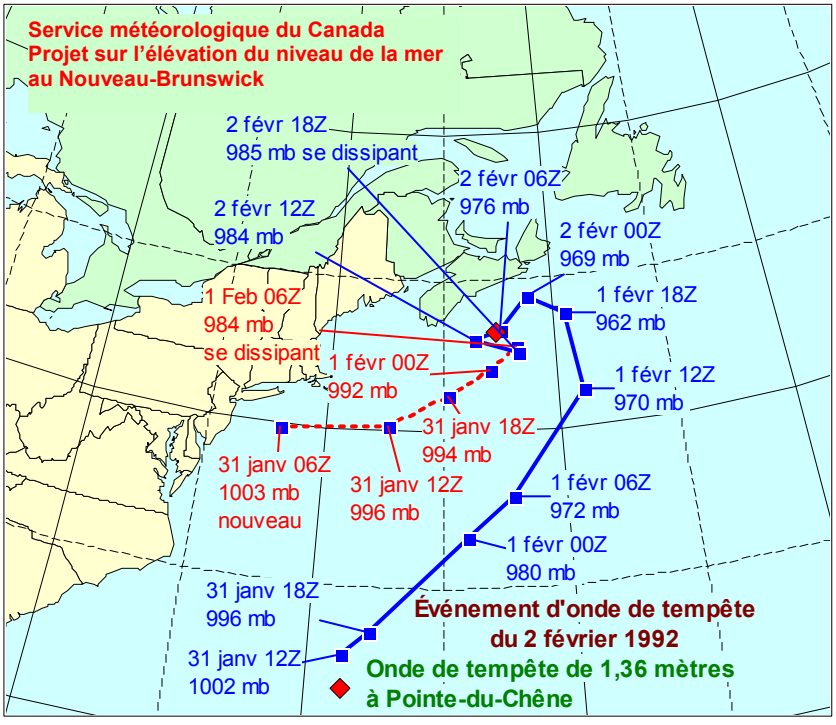

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
16 déc 18Z
978 mb
16 déc 12Z
984 mb
16 déc 06Z
988 mb
16 déc 00Z
996 mb
15 déc 18Z
1002 mb
nouveau
17 déc 00Z
975 mb
17 déc 06Z
976 mb
17 déc 12Z
978 mb
17 déc 18Z
976 mb
Événement d'onde de tempête
du 17 décembre 1987
Onde de tempête de 1,15 mètres
à Pointe-du-Chêne

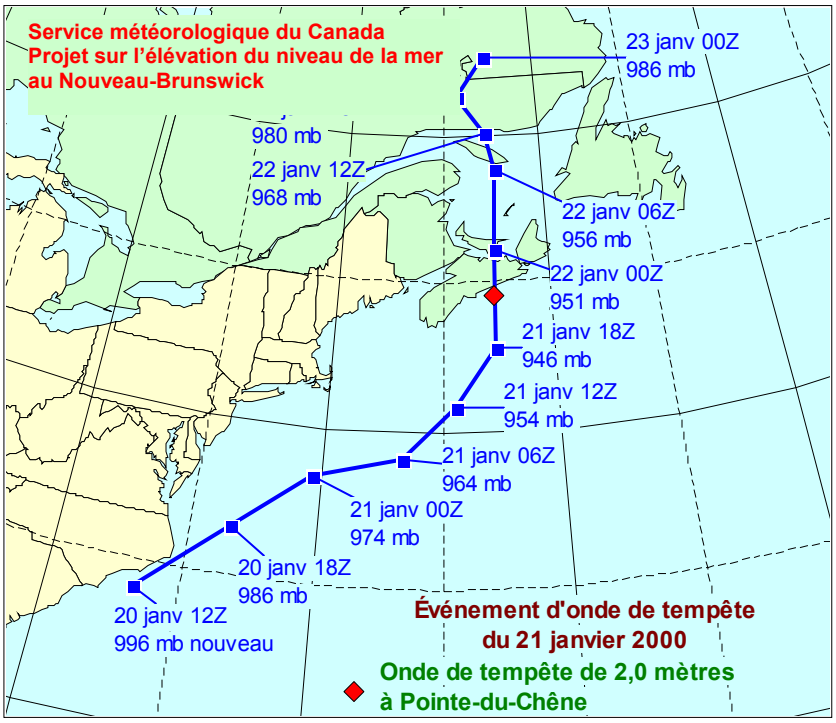

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
11 avr 18Z
986 mb
nouveau
10 avr 18Z
979 mb
11 avr 00Z
980 mb
10 avr 12Z
978 mb
12 avr 00Z
985 mb
10 avr 06Z
981 mb
11 avr 06Z
981 mb
11 avr 12Z
984 mb
11 avr 18Z
984 mb
12 avr 00Z
986 mb
se dissipant
9 avr 12Z
986 mb
9 avr 18Z
983 mb
8 avr 06Z
992 mb
10 avr 00Z
981 mb
9 avr 06Z
989 mb
8 avr 12Z
992 mb
9 avr 00Z
989 mb
8 avr 18Z
992 mb
Evénement d'onde de tempête
du 10 avril 1988
Onde de tempête de 1,21 mètres
à Pointe-du-Chêne

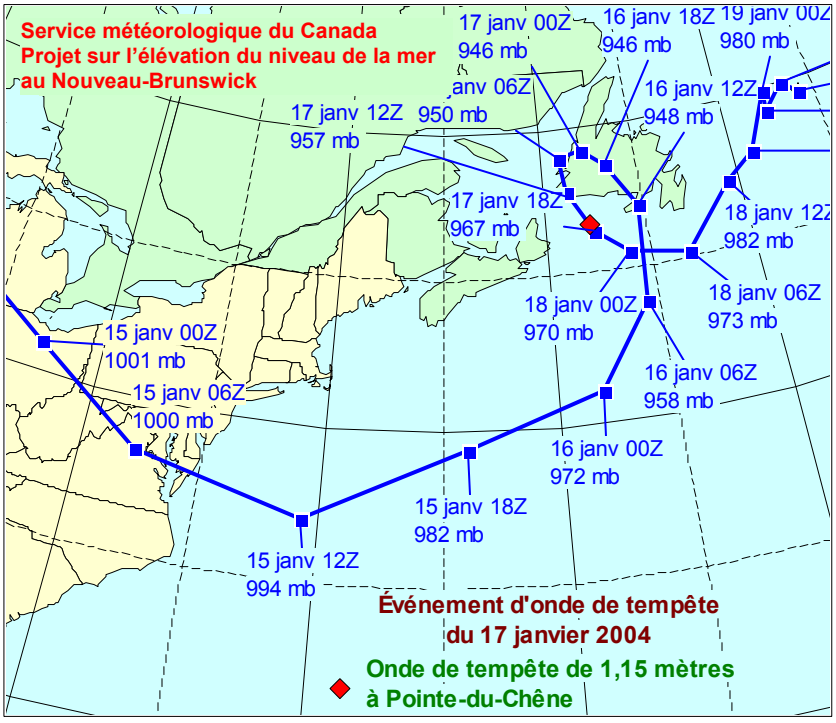

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
976 mb
21 nov 06Z
983 mb nouveau
22 nov 00Z
973 mb
22 nov 06Z
974 mb
22 nov 12Z
974 mb
22 nov 18Z
971 mb
23 nov 00Z
971 mb
Événement d'onde de tempête
du 21 novembre 1988
Onde de tempête de 1,48 mètres
à Pointe-du-Chêne

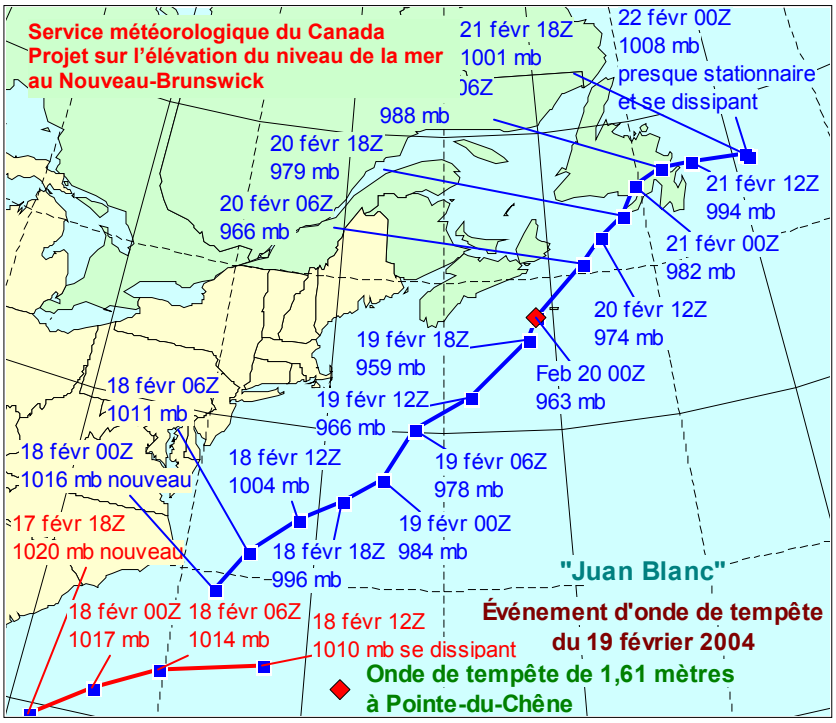

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
20 nov 06Z
989 mb
20 nov 12Z
988 mb
20 nov 18Z
983 mb
21 nov 00Z
980 mb
21 Nov 06Z
971 mb
redéveloppé
21 nov 12Z
967 mb
22 nov 00Z
965 mb
22 nov 12Z
966 mb
22 nov 18Z
972 mb
21 Nov 18Z
966 mb
redéveloppé
Événement d'onde de tempête
du 21 novembre 1989
Onde de tempête de 1,35 mètres
à Pointe-du-Chêne

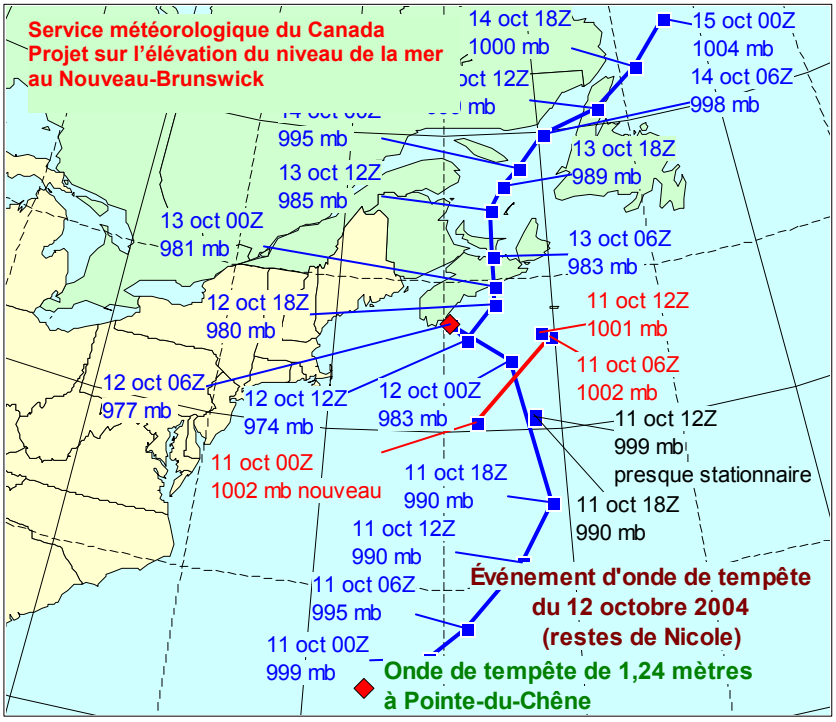

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
12 mars 12Z
966 mb
12 mars 06Z
964 mb
12 mars 00Z
959 mb
11 mars 18Z
960 mb
11 mars 12Z
960 mb
11 mars 06Z
974 mb
13 mars 00Z
980 mb
presque
stationnaire
12 mars 18Z
972 mb
11 mars 00Z
981 mb nouveau
(historique d'un cyclone plus au sud
Événement d'onde de tempête
du 12 mars 1991
Onde de tempête de 1,42 mètres
à Pointe-du-Chêne

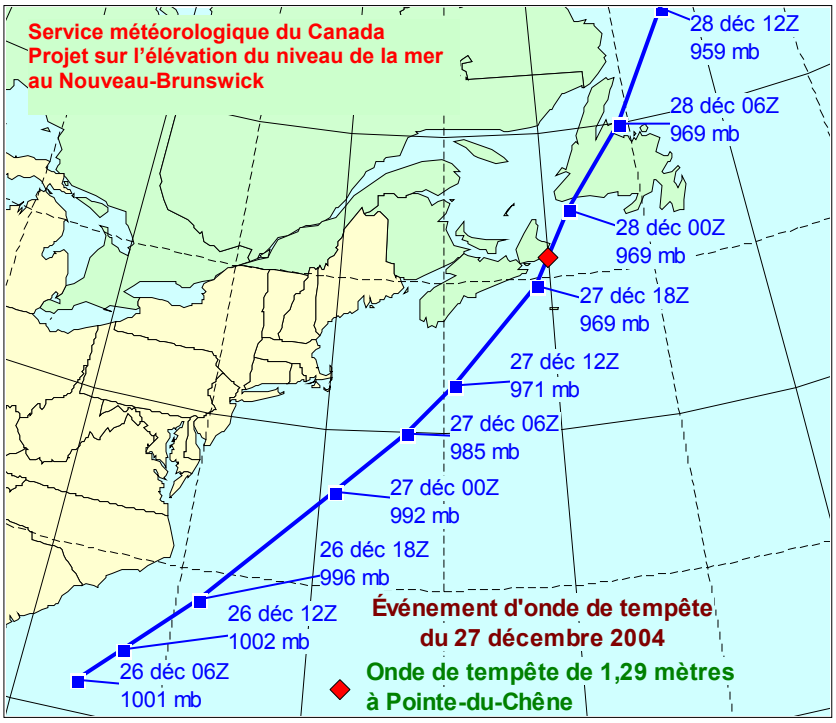

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
2 févr 18Z
985 mb se dissipant
2 févr 06Z
976 mb
2 févr 12Z
984 mb
2 févr 00Z
969 mb
1 Feb 06Z
984 mb
se dissipant
1 févr 18Z
962 mb
1 févr 00Z
992 mb
1 févr 12Z
970 mb
31 janv 18Z
994 mb
31 janv 06Z
1003 mb
nouveau
31 janv 12Z
996 mb
1 févr 06Z
972 mb
1 févr 00Z
980 mb
31 janv 18Z
996 mb
31 janv 12Z
1002 mb
Événement d'onde de tempête
du 2 février 1992
Onde de tempête de 1,36 mètres
à Pointe-du-Chêne

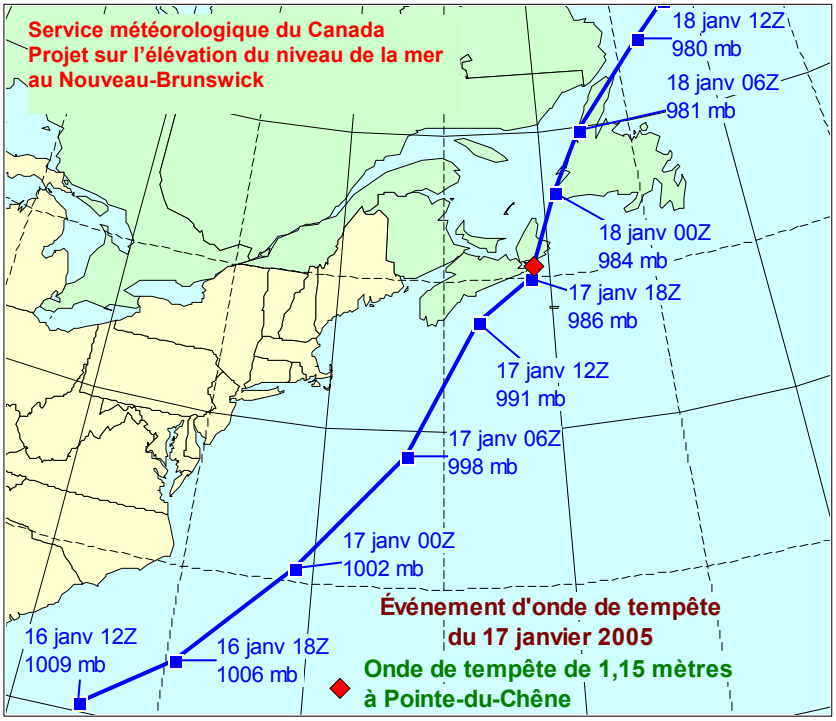

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
23 janv 00Z
986 mb
980 mb
22 janv 12Z
968 mb
22 janv 06Z
956 mb
22 janv 00Z
951 mb
21 janv 18Z
946 mb
21 janv 12Z
954 mb
21 janv 06Z
964 mb
21 janv 00Z
974 mb
20 janv 18Z
986 mb
20 janv 12Z
996 mb nouveau
Événement d'onde de tempête
du 21 janvier 2000
Onde de tempête de 2,0 mètres
à Pointe-du-Chêne


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
17 janv 00Z
946 mb
16 janv 18Z
946 mb
19 janv 00Z
980 mb
anv 06Z
950 mb
16 janv 12Z
948 mb
17 janv 12Z
957 mb
17 janv 18Z
967 mb
18 janv 12Z
982 mb
18 janv 06Z
973 mb
18 janv 00Z
970 mb
15 janv 00Z
1001 mb
16 janv 06Z
958 mb
15 janv 06Z
1000 mb
16 janv 00Z
972 mb
15 janv 18Z
982 mb
15 janv 12Z
994 mb
Événement d'onde de tempête
du 17 janvier 2004
Onde de tempête de 1,15 mètres
à Pointe-du-Chêne

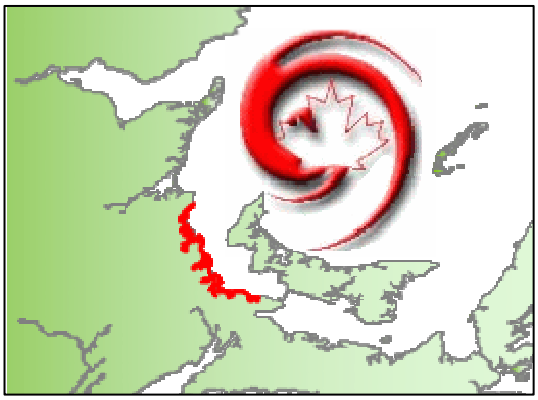

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
21 févr 18Z
1001 mb
22 févr 00Z
1008 mb
presque stationnaire
et se dissipant
988 mb
20 févr 18Z
979 mb
21 févr 12Z
994 mb
20 févr 06Z
966 mb
21 févr 00Z
982 mb
20 févr 12Z
974 mb
19 févr 18Z
959 mb
Feb 20 00Z
963 mb
18 févr 06Z
1011 mb
19 févr 12Z
966 mb
18 févr 00Z
1016 mb nouveau
18 févr 12Z
1004 mb
19 févr 06Z
978 mb
17 févr 18Z
1020 mb nouveau
19 févr 00Z
984 mb
18 févr 18Z
996 mb
"Juan Blanc"
18 févr 00Z
1017 mb
18 févr 06Z
1014 mb
18 févr 12Z
1010 mb se dissipant
Événement d'onde de tempête
du 19 février 2004
Onde de tempête de 1,61 mètres
à Pointe-du-Chêne


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
14 oct 18Z
1000 mb
15 oct 00Z
1004 mb
14 oct 06Z
998 mb
995 mb
13 oct 18Z
989 mb
13 oct 12Z
985 mb
13 oct 00Z
981 mb
13 oct 06Z
983 mb
12 oct 18Z
980 mb
11 oct 12Z
1001 mb
11 oct 06Z
1002 mb
12 oct 06Z
977 mb
12 oct 12Z
974 mb
12 oct 00Z
983 mb
11 oct 12Z
999 mb
presque stationnaire
11 oct 00Z
1002 mb nouveau
11 oct 18Z
990 mb
11 oct 18Z
990 mb
11 oct 12Z
990 mb
Événement d'onde de tempête
du 12 octobre 2004
(restes de Nicole)
11 oct 06Z
995 mb
11 oct 00Z
999 mb
Onde de tempête de 1,24 mètres
à Pointe-du-Chêne


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
28 déc 12Z
959 mb
28 déc 06Z
969 mb
28 déc 00Z
969 mb
27 déc 18Z
969 mb
27 déc 12Z
971 mb
27 déc 06Z
985 mb
27 déc 00Z
992 mb
26 déc 18Z
996 mb
26 déc 12Z
1002 mb
26 déc 06Z
1001 mb
Événement d'onde de tempête
du 27 décembre 2004
Onde de tempête de 1,29 mètres
à Pointe-du-Chêne


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
18 janv 12Z
980 mb
18 janv 06Z
981 mb
18 janv 00Z
984 mb
17 janv 18Z
986 mb
17 janv 12Z
991 mb
17 janv 06Z
998 mb
17 janv 00Z
1002 mb
16 janv 18Z
1006 mb
16 janv 12Z
1009 mb
Événement d'onde de tempête
du 17 janvier 2005
Onde de tempête de 1,15 mètres
à Pointe-du-Chêne

4.2.15.4 Pièce jointe D : Ondes de tempête associées au passage de cyclones tropicaux



Sources de données

- Base de données HURDAT, ou des « meilleures trajectoires », du U.S. National Hurricane Center (1851 à 2003). Les archives de 1851 à 2004 ont été utilisées pour les cyclones de 2004.

> La plus récente version de ces données peut être téléchargée à partir de l'adresse : http://www.nhc.noaa.gov/tracks1851to2004_atl.txt
>
> On peut trouver des informations générales sur la base de données dans le document suivant :
> Jarvinen, B.R., Neumann, C.J. and. Davis, M.A.S 1984. NOAA Technical Memorandum NWS NHC 22 http://www.aoml.noaa.gov/hrd/hurdat/noaatechmemo.html

- Service des données sur le milieu marin (SDMM) – observations marégraphiques horaires pour Pointe-du-Chêne, Escuminac, Charlottetown, etc.

Méthodologie et résultats

Nous avons extrait de la base de données du U.S. National Hurricane Center tous les cyclones tropicaux qui avaient traversé une zone de recherche rectangulaire centrée sur le nord-est des Maritimes (voir les figures ci-dessous). Un total de 125 cyclones ont touché ou traversé cette zone de recherche. Ces dépressions allaient de systèmes assez mineurs, avec des vents d'une vingtaine de nœuds, à des tempêtes tropicales ou extratropicales majeures accompagnées de vents jusqu'à 95 nœuds (Gerda, 10 septembre 1969). On en trouvera plus bas un tableau complet.

Sur les 125 systèmes, 46 ont traversé la zone de recherche alors que les vents étaient de la force de l'ouragan (≥63 nœuds) à proximité de leur centre. Voir le tableau ci-dessous.

Dans les observations marégraphiques du Service des données sur le milieu marin (SDMM) pour Pointe-du-Chêne, Escuminac, Pointe-Sapin, Charlottetown et Rustico, nous avons cherché les ondes de tempête associées aux passages de cyclones tropicaux. La période d'enregistrement de ces sites ne correspond cependant qu'à un

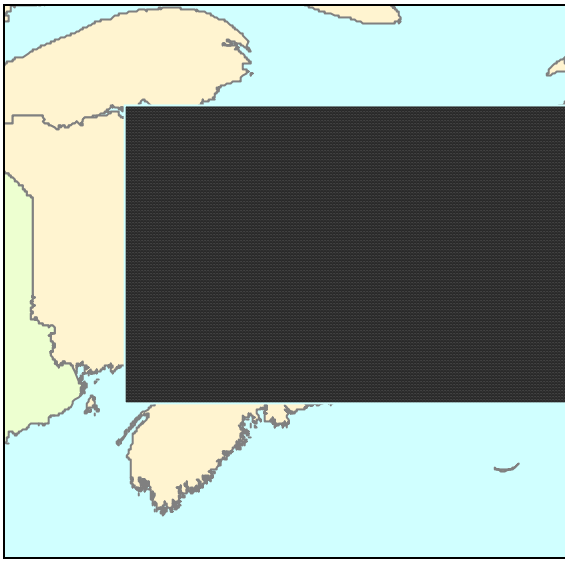
sous-ensemble de la base de données du National Hurricane Centre sur les trajectoires... détails ci-dessous :

Période d'enregistrement des marégraphes

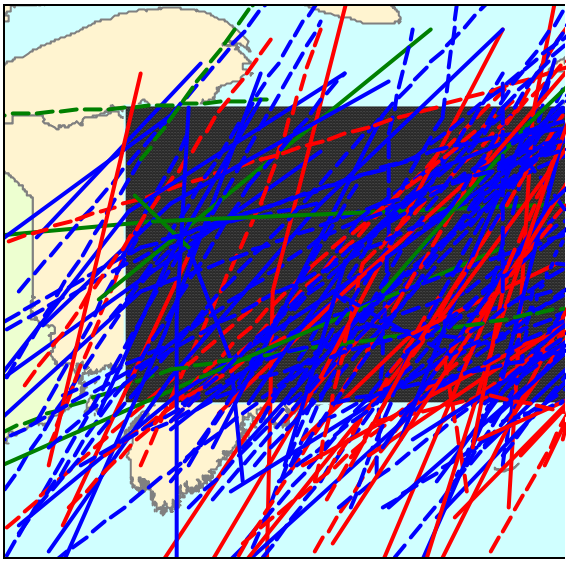
Pointe-du-Chêne	Fin de 1971 au début de 1992. fin de 2003 à 2005	
Escuminac	1973 à 2005	
Pointe-Sapin	1963 à 1975	
Charlottetown	1911 à 2003	(de grands blocs de données manquent avant 1938)
Rustico	1972 à 1996	

Seulement 16 cyclones d'origine tropicale ont effectivement généré des ondes de tempête de 60 cm ou plus aux diverses stations de la côte du golfe au Nouveau-Brunswick et dans l'Île-du-Prince-Édouard. Là encore, on trouvera un tableau de ces cyclones.

Des cartes de trajectoires des cyclones sont fournies pour les 16 épisodes d'onde de tempête.



Zone de recherche rectangulaire s'étendant de la baie des Chaleurs au sud-ouest de Terre-Neuve puis vers le sud jusqu'aux environs de Halifax.



Tempêtes d'origine tropicale qui ont traversé la zone de recherche rectangulaire.

Commentaires

Seulement 16 cyclones tropicaux ont donné naissance à des ondes de tempête significatives. Ce nombre relativement bas s'explique par le fait que les véritables cyclones tropicaux ne présentent qu'une superficie limitée de vents forts et que, dans la plupart des cas, il faut que leur trajectoire passe directement sur la côte du golfe au Nouveau-Brunswick pour qu'une onde se forme. Des cyclones en transition extratropicale[3] montreraient un élargissement de la zone de vents forts sur le côté ouest de la trajectoire. Cette situation permettrait à l'occasion à une onde de se former avec une trajectoire qui passerait bien à l'est de l'Île-duPrince-Édouard (ouragan Ione, septembre 1955). L'onde de tempête de loin la plus significative est celle de la récente tempête du 29 octobre 2000, qui a donné une onde de 1,58 mètre à Escuminac. Ce cyclone est passé au sud-est de la Nouvelle-Écosse pour se situer à l'est du Cap-Breton le matin du 29. La tempête hybride, qui présentait les caractéristiques à la fois des cyclones tropicaux et des cyclones des latitudes moyennes, avait un large champ de vent qui couvrait le golfe du Saint-Laurent.

[3] Terme utilisé pour indiquer qu'un cyclone a perdu ou est en train de perdre ses caractéristiques « tropicales ». Les cyclones peuvent devenir extratropicaux tout en conservant des vents de force ouragan ou de force tempête tropicale. (voir : http://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.html)

Tableau de tous les cyclones tropicaux qui sont passés entre la baie des Chaleurs et le sud-ouest de Terre-Neuve – 1851 à 2003

Nom	Date	Onde à Charlottetown (m)	Niveau de l'eau à Charlottetown (m)	Onde à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Niveau de l'eau à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Onde à Pointe-du-Chêne (m)	Niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne (m)	Onde à Rustico (m)	Niveau de l'eau à Rustico (m)	Vents max, (noeuds)	Extratropical (E)
Sans nom	27 août 1851	manquante						manquante		40	
Sans nom	17 oct. 1862	manquante						manquante		50	E
Sans nom	23 août 1863	manquante						manquante		70	
Sans nom	23 sept. 1866	manquante						manquante		80	
Sans nom	5 oct. 1869	manquante						manquante		70	
Sans nom	4 sept. 1870	manquante						manquante		80	
Sans nom	13 oct. 1871	manquante						manquante		70	
Sans nom	2 sept. 1872	manquante						manquante		60	E
Sans nom	7 août 1874	manquante						manquante		70	
Sans nom	7 sept. 1874	manquante						manquante		70	E
Sans nom	30 sept. 1874	manquante						manquante		60	E
Sans nom	16 août 1875	manquante						manquante		50	
Sans nom	5 août 1877	manquante						manquante		50	
Sans nom	22 sept. 1877	manquante						manquante		60	
Sans nom	30 nov. 1877	manquante						manquante		40	E
Sans nom	20 août 1878	manquante						manquante		80	
Sans nom	19 août 1879	manquante						manquante		70	
Sans nom	29 oct. 1879	manquante						manquante		60	
Sans nom	20 nov. 1879	manquante						manquante		80	
Sans nom	11 sept. 1880	manquante						manquante		60	E
Sans nom	9 sept. 1880	manquante						manquante		60	
Sans nom	12 sept. 1882	manquante						manquante		50	
Sans nom	23 sept. 1885	manquante						manquante		70	E
Sans nom	23 août 1886	manquante						manquante		75	*
Sans nom	19 mai 1887	manquante						manquante		35	E
Sans nom	21 oct. 1887	manquante						manquante		45	E
Sans nom	23 août 1888	manquante						manquante		35	
Sans nom	13 sept. 1888	manquante						manquante		35	
Sans nom	27 sept. 1888	manquante						manquante		40	
Sans nom	28 nov. 1888	manquante						manquante		80	

Nom	Date	Onde à Charlottetown (m)	Niveau de l'eau à Charlottetown (m)	Onde à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Niveau de l'eau à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Onde à Pointe-du-Chêne (m)	Niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne (m)	Onde à Rustico (m)	Niveau de l'eau à Rustico (m)	Vents max, (noeuds)	Extratropical (E)
Sans nom	26 sept. 1889	manquante						manquante		35	
Sans nom	8 oct. 1889	manquante						manquante		50	
Sans nom	8 sept. 1891	manquante						manquante		80	
Sans nom	6 oct. 1891	manquante						manquante		85	
Sans nom	15 oct. 1891	manquante						manquante		80	
Sans nom	22 août 1893	manquante						manquante		100	
Sans nom	17 août 1893	manquante						manquante		85	
Sans nom	30 août 1893	manquante						manquante		60	
Sans nom	14 oct. 1896	manquante						manquante		85	
Sans nom	25 sept. 1897	manquante						manquante		30	
Sans nom	6 oct. 1898	manquante						manquante		25	
Sans nom	7 oct. 1899	manquante						manquante		35	E
Sans nom	2 nov. 1899	manquante						manquante		40	E
Sans nom	13 sept. 1900	manquante						manquante		45	E
Sans nom	12 oct. 1900	manquante						manquante		40	E
Sans nom	29 oct. 1900	manquante						manquante		45	E
Sans nom	30 sept. 1901	manquante						manquante		25	E
Sans nom	17 juin 1902	manquante						manquante		35	E
Sans nom	15 sept. 1904	manquante						manquante		65	E
Sans nom	2 août 1908	manquante						manquante		75	E
Sans nom	24 nov. 1912	0,29						manquante		60	E
Sans nom	22 juil. 1916	0,27						manquante		55	
Sans nom	7 sept. 1918	0,39						manquante		50	E
Sans nom	2 oct. 1923	manquante						manquante		75	E
Sans nom	27 août 1924	manquante						manquante		85	E
Sans nom	4 sept. 1924	manquante						manquante		70	E
Sans nom	8 août 1926	manquante						manquante		70	E
Sans nom	25 août 1927	manquante						manquante		90	E
Sans nom	17 sept. 1932	manquante						manquante		35	E
Sans nom	18 sept. 1933	manquante						manquante		60	E
Sans nom	8 oct. 1933	manquante						manquante		75	E
Sans nom	29 oct. 1933	manquante						manquante		60	E
Sans nom	20 juin 1934	manquante						manquante		40	E
Sans nom	2 oct. 1935	manquante						manquante		65	E

Nom	Date	Onde à Charlottetown (m)	Niveau de l'eau à Charlottetown (m)	Onde à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Niveau de l'eau à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Onde à Pointe-du-Chêne (m)	Niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne (m)	Onde à Rustico (m)	Niveau de l'eau à Rustico (m)	Vents max, (noeuds)	Extratropical (E)
Sans nom	2 août 1937	manquante						manquante		40	
Sans nom	14 sept. 1937	manquante						manquante		55	
Sans nom	26 sept. 1937	manquante						manquante		75	E
Sans nom	30 sept. 1937	manquante						manquante		35	E
Sans nom	3 sept. 1940	0,23						manquante		55	
Sans nom	17 sept. 1940	0,77	3,04					manquante		55	
Sans nom	9 sept. 1943	0,27						manquante		60	
Sans nom	16 sept. 1943	0,43						manquante		40	E
Sans nom	15 sept. 1944	0,49						manquante		35	E
Sans nom	22 oct. 1944	0,56						manquante		45	E
Sans nom	29 juin 1945	0,17						manquante		40	E
Sans nom	20 sept. 1945	0,32						manquante		25	E
Sans nom	15 sept. 1946	0,27						manquante		60	E
Able	21 août 1950	0,29						manquante		35	
Barbara	15 août 1953	Prob.de données						manquante		70	E
Carol	7 sept. 1953	0,49	3,03					manquante		65	
Sans nom	8 oct. 1953	0,43	2,91					manquante		60	E
Edna	12 sept. 1954	0,75	2,59					manquante		65	E
Ione	21 sept. 1955	0,62	3,05					manquante		60	E
Hélène	29 sept. 1958	0,97	3,16					manquante		70	
Sans nom	20 juin 1959	0,63	2,28					manquante		70	E
Cindy	11 juil. 1959	0						manquante		50	E
Sans nom	15 sept. 1961	0,22						manquante		35	
Frances	9 oct. 1961	Prob. de données						manquante		40	E
Daisy	8 oct. 1962	0,49						manquante		55	E
Ginny	29 oct. 1963	0,73	3,05	1,39	2,00			manquante		90	E
Dora	15 sept. 1964	0,38		0,31				manquante		55	E
Gladys	24 sept. 1964	0,28		0,24				manquante		60	E
Célia	21 juil. 1966	0,25		0,09				manquante		65	E
Gladys	21 oct. 1968	0,74	2,96	1,31	2,67			manquante		65	E
Blanche	12 août 1969	0		0,16				manquante		65	
Gerda	10 sept. 1969	0,33		0,51				manquante		95	
Beth	16 août 1971	manquante		0,28				manquante		65	
Carrie	4 sept. 1972	manquante		0,31				0,1		45	E

Nom	Date	Onde à Charlottetown (m)	Niveau de l'eau à Charlottetown (m)	Onde à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Niveau de l'eau à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Onde à Pointe-du-Chêne (m)	Niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne (m)	Onde à Rustico (m)	Niveau de l'eau à Rustico (m)	Vents max, (noeuds)	Extratropical (E)
Alice	6 sept. 1973	0,22		0,18		0,24		0,29		60	
Blanche	28 juil. 1975	manquante		0,41		0,48		0,25		60	E
Evelyn	15 oct. 1977	manquante		0,60	1,63	0,38		0,15		70	
David	7 sept. 1979	0,75	2,13	0,60	1,44	0,81	1,48	0,62	1,14	50	E
Subtrop 1	25 oct. 1979	0,25		0,42		0,31		0,31		60	S
Subtrop 1	20 juin 1982	0,46		0,33		0,28		0,38		60	S
Diana	16 sept. 1984	0,51		0,47		0,57		manquante		60	
Ana	19 juil. 1985	0		0,36		0,17		0,2		60	
Alberto	8 août 1988	0,1		0,22		0,11		0,17		35	
Chris	30 août 1988	0,1		0,15		0,05		0,21		25	
Dean	8 août 1989	0,17		0,11		0,23		0,17		65	
Bertha	2 août 1990	0,58		Manquante		0,65	1,95	0,69	1,53	70	
Lili	14 oct. 1990	0,12		0,23		0,21		0,17		45	
Bob	20 août 1991	0,13		0,37		0,37		0,2		50	
Sans nom	2 nov. 1991	0,27		0,20		0,05		0,23		50	
Allison	8 juin 1995	0,24		0,39		manquante		0,5	0,94	50	E
Barry	9 juil. 1995	manquante		0,10		manquante		0,18		50	
Bertha	14 juil. 1996	0,37		0,42		manquante		manquante		55	
Hortense	15 sept. 1996	0,76	2,82	0,54		manquante		manquante		70	
Joséphine	10 oct. 1996	0,77	2,8	0,57		manquante		manquante		45	E
Floyd	18 sept. 1999	manquante		0,53		manquante		manquante		40	E
Subtrop	29 oct. 2000	1,29	3,25	1,58	2,37	manquante		manquante		50	E
Karen	15 oct. 2001	0,31		0,12		manquante		manquante		40	
Gustav	12 sept. 2002	1,35	3,41	1,02	2,08	manquante		manquante		80	
Juan	29 sept. 2003	1,10	2,85	0,50		0,50		manquante		85	

Nom	Date	Onde à Charlottetown (m)	Niveau de l'eau à Charlottetown (m)	Onde à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Niveau de l'eau à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Onde à Pointe-du-Chêne (m)	Niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne (m)	Onde à Rustico (m)	Niveau de l'eau à Rustico (m)	Vents max, (noeuds)	Extratropical (E)
Francis	10 sept. 2004	0,12		0,41		manquante		manquante		20	E
Nicole*	12 oct. 2004	0,36		0,94	1,89	manquante		manquante			

Nicole* - cette tempête était un redéveloppement post-tropical qui a traversé les Maritimes. Le National Hurricane Center a cessé de suivre Nicole à 38,5°N.

Tableau des cyclones tropicaux – force de l'ouragan seulement (≥63 nœuds)

Nom	Date	Onde à Charlottetown (m)	Niveau de l'eau à Charlottetown (m)	Onde à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Niveau de l'eau à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Onde à Pointe-du-Chêne (m)	Niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne (m)	Onde à Rustico (m)	Niveau de l'eau à Rustico (m)	Vents max, (noeuds)	Extratropical (E)
Sans nom	23 août 1863	manquante						manquante		70	
Sans nom	23 sept. 1866	manquante						manquante		80	
Sans nom	5 oct. 1869	manquante						manquante		70	
Sans nom	4 sept. 1870	manquante						manquante		80	
Sans nom	13 oct. 1871	manquante						manquante		70	
Sans nom	7 août 1874	manquante						manquante		70	
Sans nom	7 sept. 1874	manquante						manquante		70	E
Sans nom	20 août 1878	manquante						manquante		80	
Sans nom	19 août 1879	manquante						manquante		70	
Sans nom	20 nov. 1879	manquante						manquante		80	
Sans nom	23 sept. 1885	manquante						manquante		70	E
Sans nom	23 août 1886	manquante						manquante		75	*
Sans nom	28 nov. 1888	manquante						manquante		80	
Sans nom	8 sept. 1891	manquante						manquante		80	
Sans nom	6 oct. 1891	manquante						manquante		85	
Sans nom	15 oct. 1891	manquante						manquante		80	
Sans nom	22 août 1893	manquante						manquante		100	
Sans nom	17 août 1893	manquante						manquante		85	
Sans nom	14 oct. 1896	manquante						manquante		85	
Sans nom	15 sept. 1904	manquante						manquante		65	E
Sans nom	2 août 1908	manquante						manquante		75	E

Nom	Date	Onde à Charlottetown (m)	Niveau de l'eau à Charlottetown (m)	Onde à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Niveau de l'eau à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Onde à Pointe-du-Chêne (m)	Niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne (m)	Onde à Rustico (m)	Niveau de l'eau à Rustico (m)	Vents max, (noeuds)	Extratropical (E)
Sans nom	2 oct. 1923	manquante						manquante		75	E
Sans nom	27 août 1924	manquante						manquante		85	E
Sans nom	4 sept. 1924	manquante						manquante		70	E
Sans nom	8 août 1926	manquante						manquante		70	E
Sans nom	25 août 1927	manquante						manquante		90	E
Sans nom	8 oct. 1933	manquante						manquante		75	E
Sans nom	2 oct. 1935	manquante						manquante		65	E
Sans nom	26 sept. 1937	manquante						manquante		75	E
Barbara	15 août 1953	Prob. phase						manquante		70	E
Carol	7 sept. 1953	0,49	3,03					manquante		65	
Edna	12 sept. 1954	0,75	2,59					manquante		65	E
Hélène	29 sept. 1958	0,97	3,16					manquante		70	
Sans nom	20 juin 1959	0,63	2,28					manquante		70	E
Ginny	29 oct. 1963	0,73	3,05	1,39	2,00			manquante		90	E
Célia	21 juil. 1966	0,25		0,09				manquante		65	E
Gladys	21 oct. 1968	0,74	2,96	1,31	2,67			manquante		65	E
Blanche	12 août 1969	0		0,16				manquante		65	
Gerda	10 sept. 1969	0,33		0,51				manquante		95	
Beth	16 août 1971	manquante		0,28				manquante		65	
Evelyn	15 oct. 1977	manquante		0,60	1,63	0,38		0,15		70	
Dean	8 août 1989	0,17		0,11		0,23		0,17		65	
Bertha	2 août 1990	0,58		Manquante		0,65	1,95	0,69	1.53	70	
Hortense	15 sept. 1996	0,76	2,82	0,54		manquante		manquante		70	
Gustav	12 sept. 2002	1,35	3,41	1,02		manquante		manquante		80	
Juan	29 sept. 2003	1,10	2,85	0,50		0,50		manquante		85	

Tableau des tempêtes d'origine tropicale qui ont généré une onde de tempête ≥ 0,6 mètre (en rouge) à Pointe-du-Chêne, Escuminac, Pointe-Sapin, Charlottetown ou Rustico. * Nicole* - cette tempête était un redéveloppement post-tropical qui a traversé les Maritimes

Nom	Date	Onde à Charlottetown (m)	Niveau de l'eau à Charlottetown (m)	Onde à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Niveau de l'eau à Pointe-Sapin et à Escuminac (m)	Onde à Pointe-du-Chêne (m)	Niveau de l'eau à Pointe-du-Chêne (m)	Onde à Rustico (m)	Niveau de l'eau à Rustico (m)	Vents max, (noeuds)	Extratropical (E)
Sans nom	17 sept. 1940	**0,77**	3,04					manquante		55	
Edna	12 sept. 1954	**0,75**	2,59					manquante		65	E
Ione	21 sept. 1955	**0,62**	3,05					manquante		60	E
Hélène	29 sept. 1958	**0,97**	3,16					manquante		70	
Sans nom	20 juin 1959	**0,63**	2,28					manquante		70	E
Ginny	29 oct. 1963	**0,73**	3,05	**1,39**	2,00			manquante		90	E
Gladys	21 oct. 1968	**0,74**	2,96	**1,31**	2,67			manquante		65	E
Evelyn	15 oct. 1977	manquante		**0,60**	1,63	0,38		0,15		70	
David	7 sept. 1979	**0,75**	2,13	**0,60**	1,44	**0,81**		**0,62**	1,14	50	E
Bertha	2 août 1990	**0,58**		Manquante		**0,65**	1,95	**0,69**	1,53	70	
Hortense	15 sept. 1996	**0,76**	2,82	0,54		manquante		manquante		70	
Joséphine	10 oct. 1996	**0,77**	2,8	0,57		manquante		manquante		45	E
Subtrop	29 oct. 2000	**1,29**	3,25	**1,58**	2,37	manquante		manquante		50	E
Gustav	12 sept. 2002	**1,35**	3,41	**1,02**		manquante		manquante		80	
Juan	29 sept. 2003	**1,10**	2,85	0,50		0,50		manquante		85	
Nicole*	12 oct. 2004	0,36		**0,94**	1,89	manquante		manquante			

Cartes des trajectoires des cyclones tropicaux

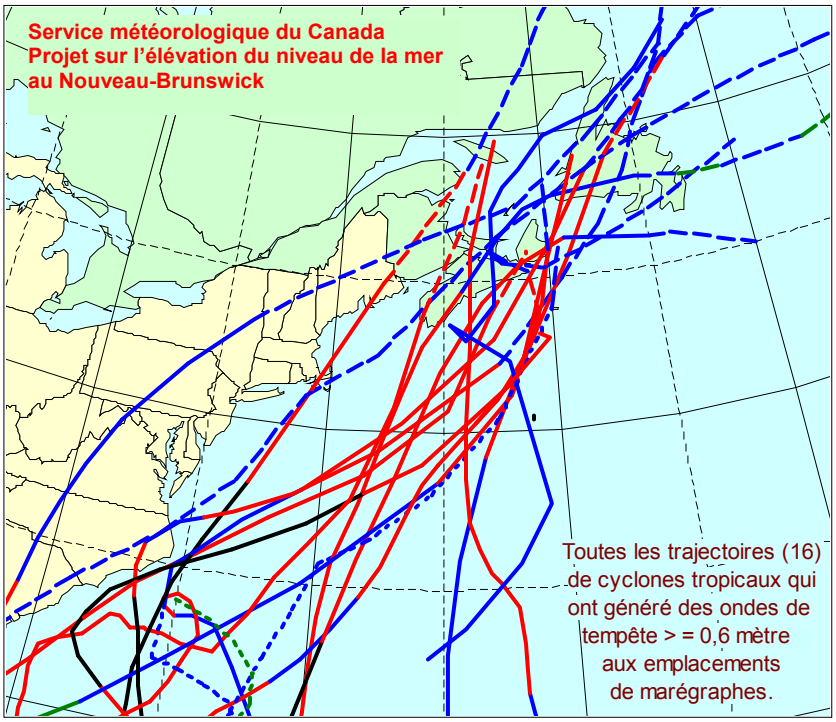
On trouvera dans cette section une cartographie des trajectoires des cyclones tropicaux qui ont engendré des ondes de tempête égales ou supérieures à 0,6 mètre. Le codage couleur s'applique pour toutes les trajectoires, à l'exception de celle de Nicole.

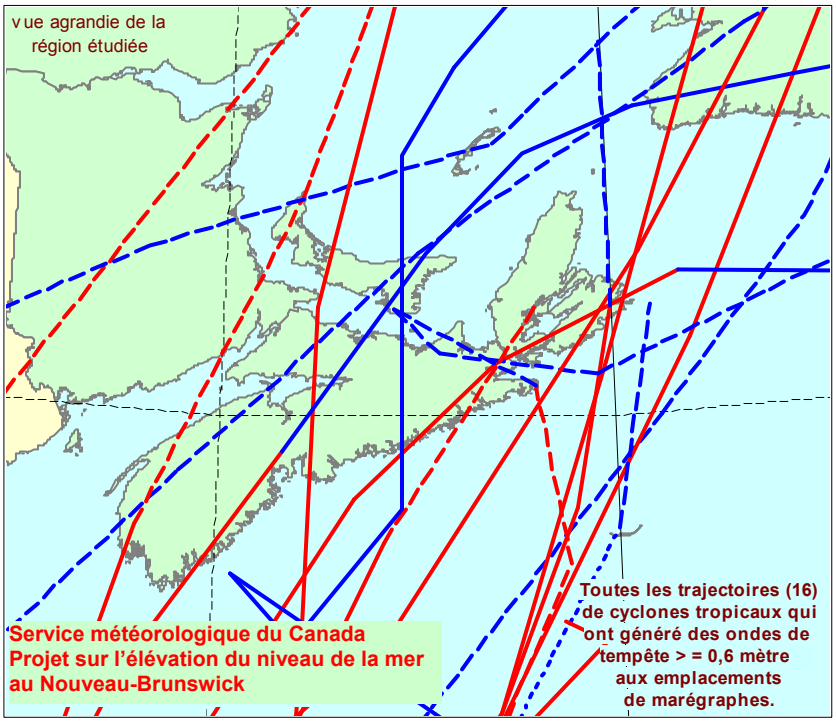
Codage couleur de la plage de vitesses du vent et des trajectoires

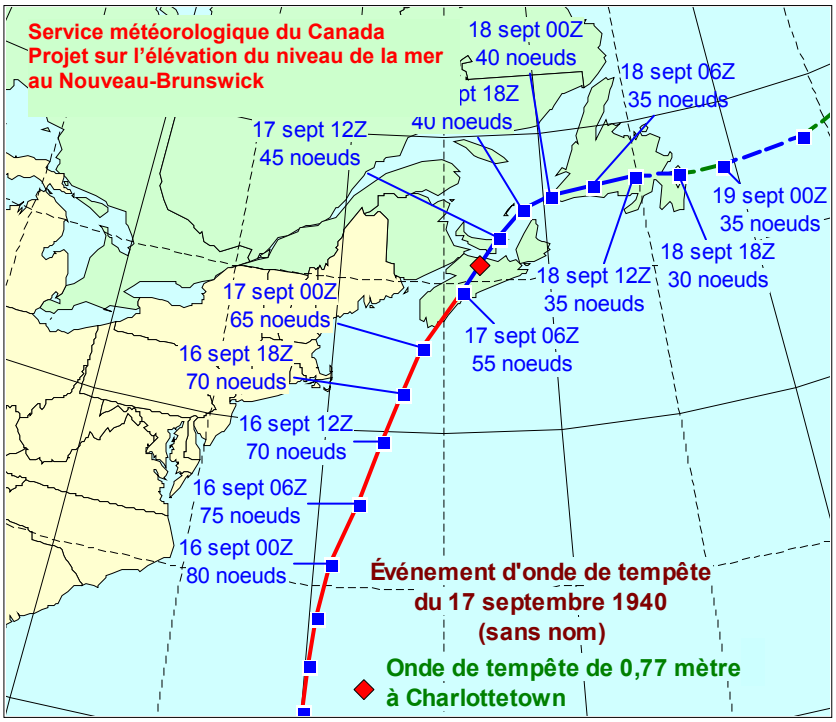
Définition	Couleur	Vents (nœuds)	Vents (km/h)	Vents (mi/h)
Dépression tropicale	Vert *	< 34	< 63	< 39
Tempête tropicale	Bleu *	34-63	63-118	39-73
Saffir-Simpson 1	Rouge *	64-82	119-153	74-95
Saffir-Simpson 2	Rouge *	83-95	154-177	96-110
Saffir-Simpson 3 (ouragan intense)	Noir *	96-113	178-209	111-130
Saffir-Simpson 4 (ouragan intense)	Noir *	114-135	210-251	131-155
Saffir-Simpson 5 (ouragan intense)	Noir *	>135	>251	>155

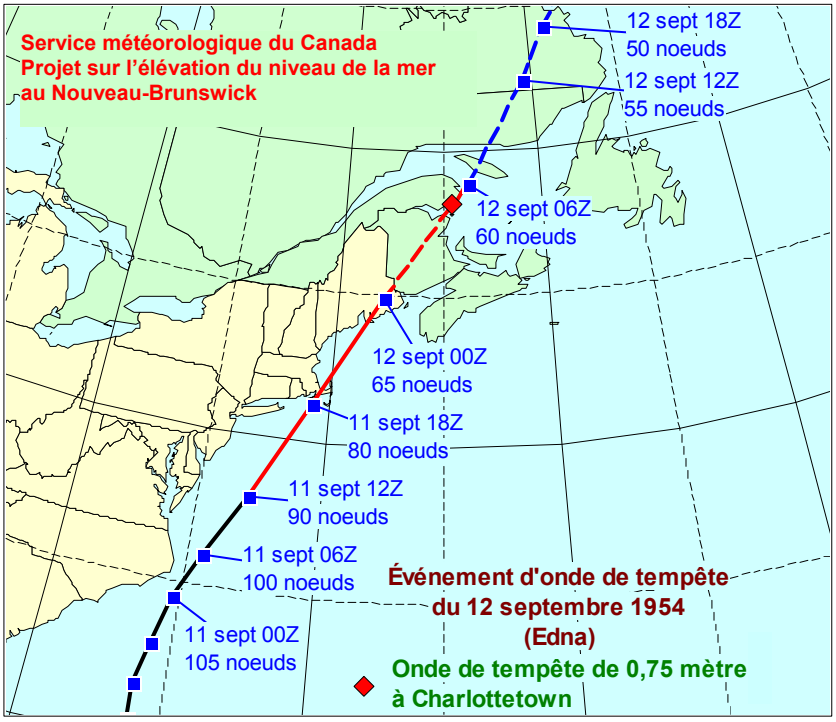
* Les lignes pointillées indiquent qu'il s'agit d'une tempête subtropicale ou extratropicale

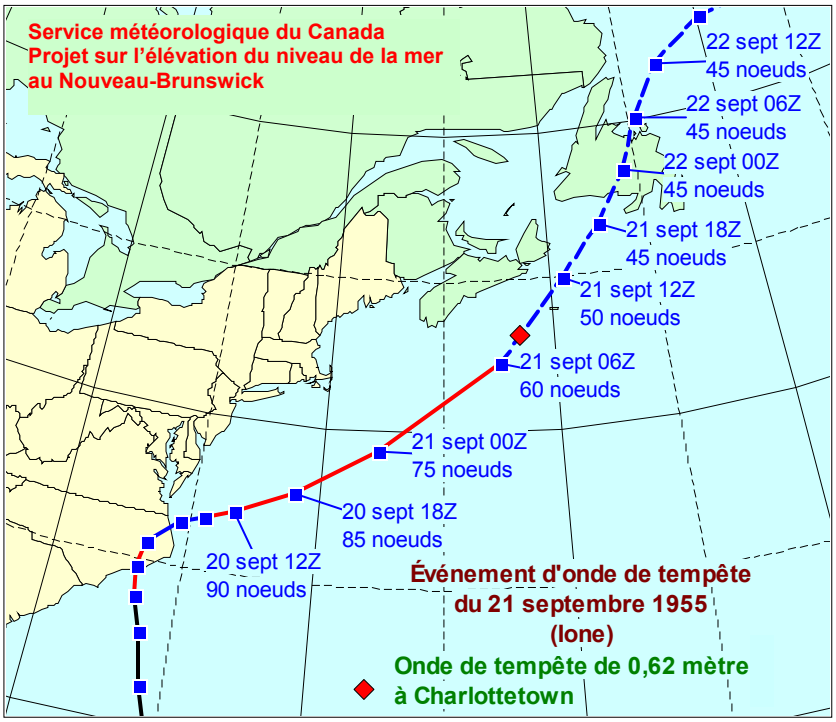
Les deux cartes ci-après sont un résumé ou un pointage spaghetti des trajectoires des systèmes qui ont donné des ondes de tempête.

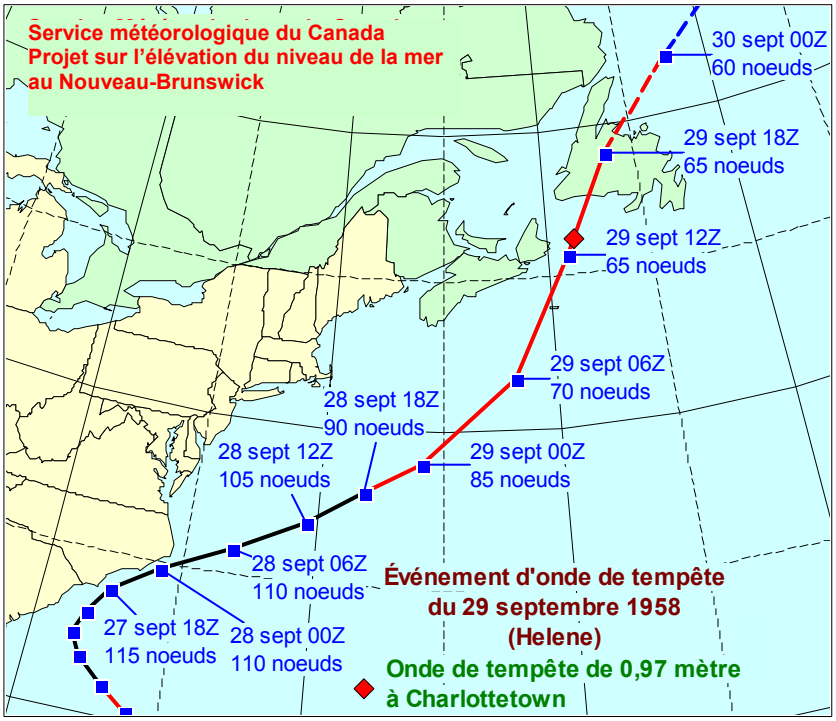


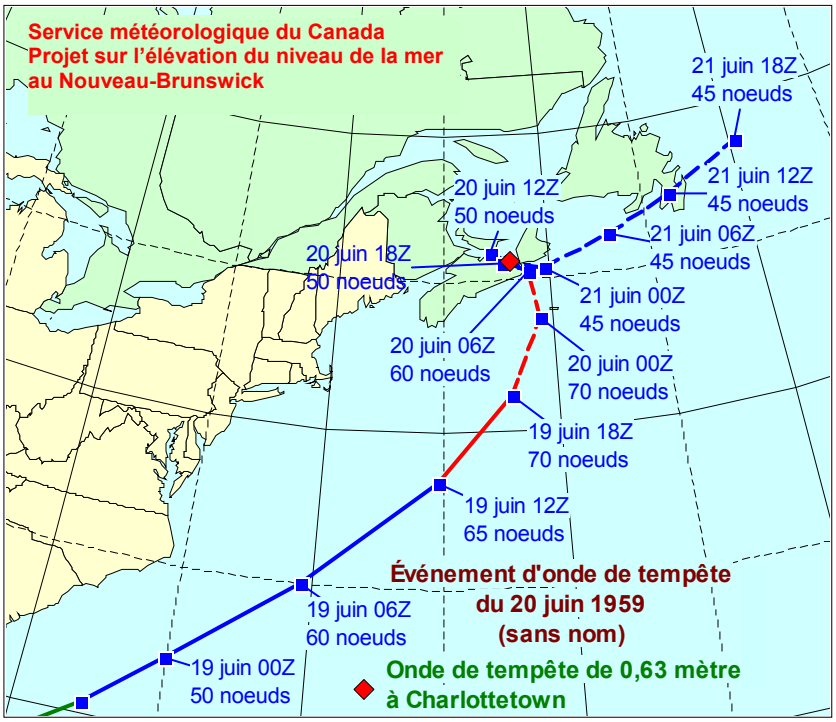


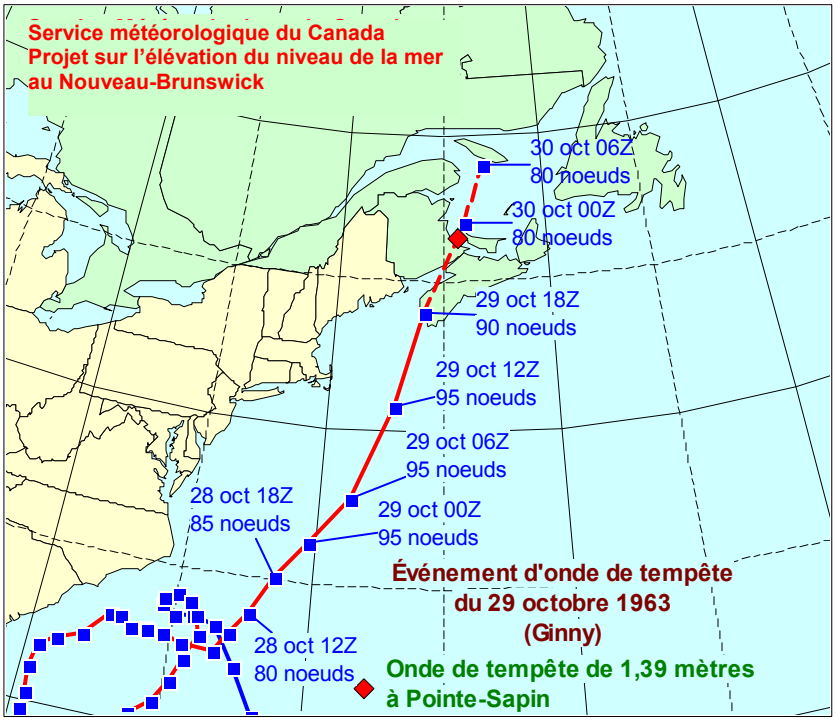

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
18 sept 00Z
40 noeuds
18 sept 06Z
35 noeuds
pt 18Z
40 noeuds
17 sept 12Z
45 noeuds
19 sept 00Z
35 noeuds
18 sept 18Z
30 noeuds
18 sept 12Z
35 noeuds
17 sept 00Z
65 noeuds
17 sept 06Z
55 noeuds
16 sept 18Z
70 noeuds
16 sept 12Z
70 noeuds
16 sept 06Z
75 noeuds
16 sept 00Z
80 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 17 septembre 1940
(sans nom)
Onde de tempête de 0,77 mètre
à Charlottetown

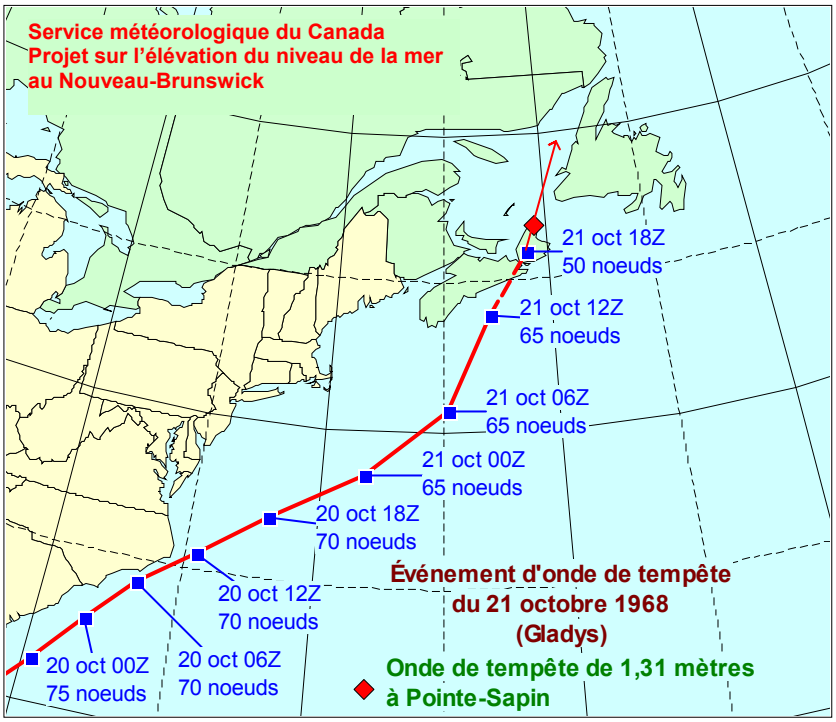

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
12 sept 18Z
50 noeuds
12 sept 12Z
55 noeuds
12 sept 06Z
60 noeuds
12 sept 00Z
65 noeuds
11 sept 18Z
80 noeuds
11 sept 12Z
90 noeuds
11 sept 06Z
100 noeuds
11 sept 00Z
105 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 12 septembre 1954
(Edna)
Onde de tempête de 0,75 mètre
à Charlottetown

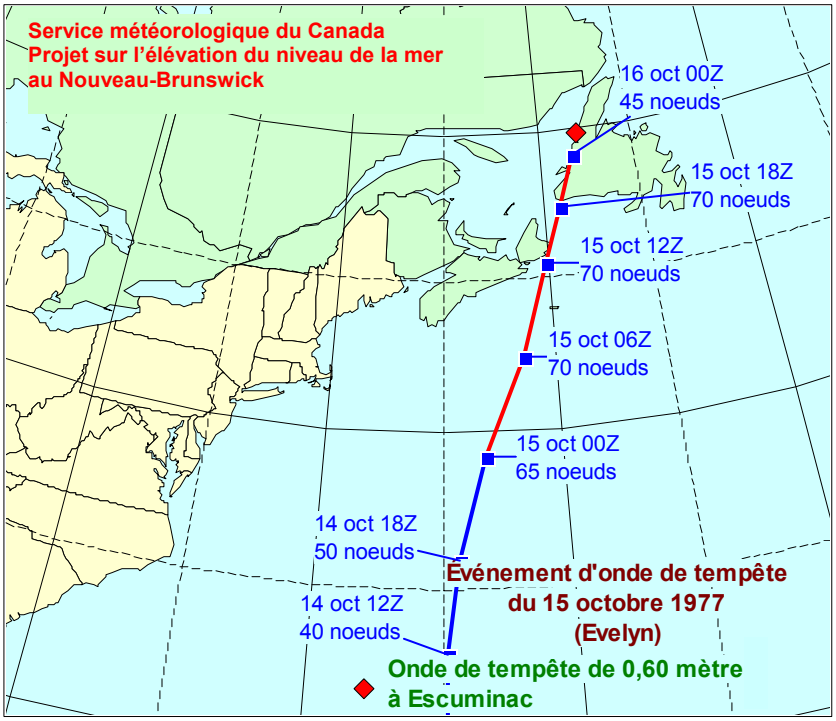

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
22 sept 12Z
45 noeuds
22 sept 06Z
45 noeuds
22 sept 00Z
45 noeuds
21 sept 18Z
45 noeuds
21 sept 12Z
50 noeuds
21 sept 06Z
60 noeuds
21 sept 00Z
75 noeuds
20 sept 18Z
85 noeuds
20 sept 12Z
90 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 21 septembre 1955
(Ione)
Onde de tempête de 0,62 mètre
à Charlottetown

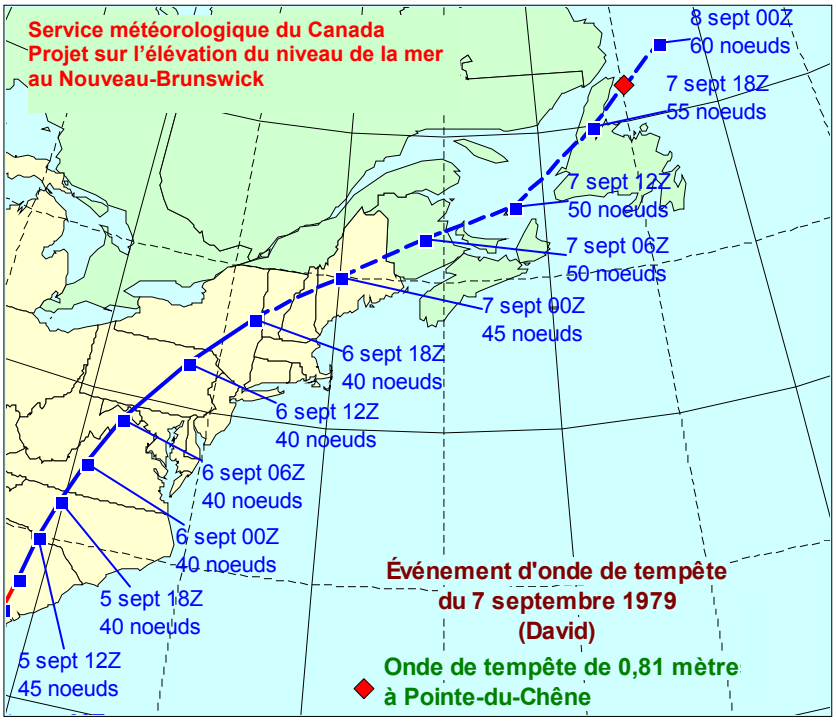

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
30 sept 00Z
60 noeuds
29 sept 18Z
65 noeuds
29 sept 12Z
65 noeuds
29 sept 06Z
70 noeuds
28 sept 18Z
90 noeuds
28 sept 12Z
105 noeuds
29 sept 00Z
85 noeuds
28 sept 06Z
110 noeuds
27 sept 18Z
115 noeuds
28 sept 00Z
110 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 29 septembre 1958
(Helene)
Onde de tempête de 0,97 mètre
à Charlottetown

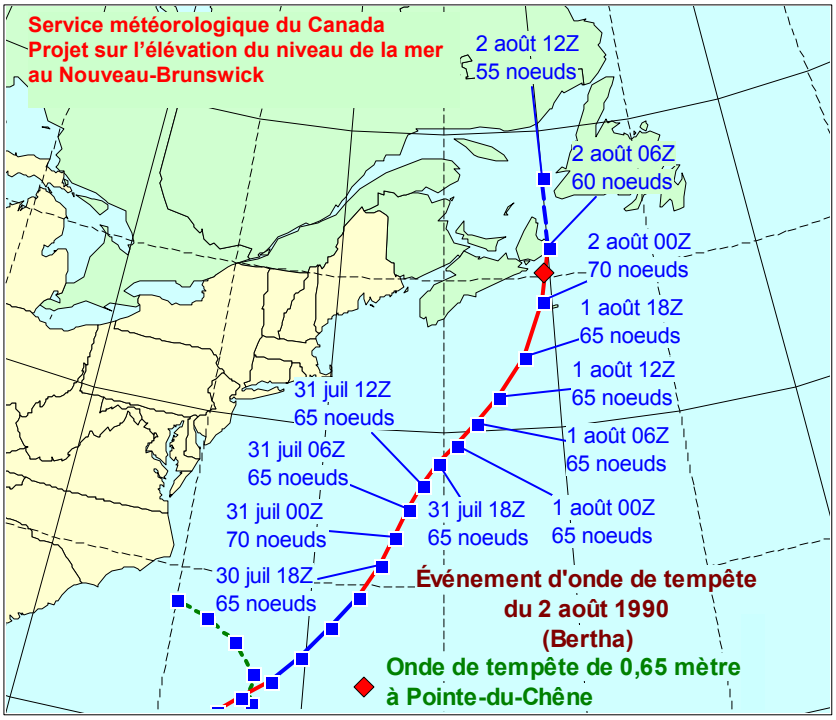

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
21 juin 18Z
45 noeuds
21 juin 12Z
45 noeuds
21 juin 06Z
45 noeuds
21 juin 00Z
45 noeuds
20 juin 12Z
50 noeuds
20 juin 18Z
50 noeuds
20 juin 06Z
60 noeuds
20 juin 00Z
70 noeuds
19 juin 18Z
70 noeuds
19 juin 12Z
65 noeuds
19 juin 06Z
60 noeuds
19 juin 00Z
50 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 20 juin 1959
(sans nom)
Onde de tempête de 0,63 mètre
à Charlottetown

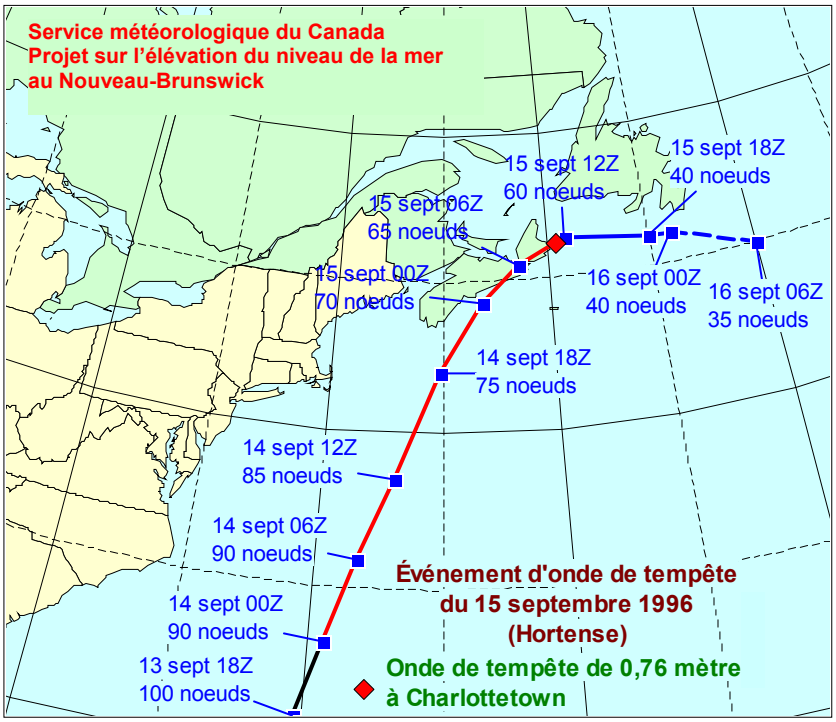

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
30 oct 06Z
80 noeuds
30 oct 00Z
80 noeuds
29 oct 18Z
90 noeuds
29 oct 12Z
95 noeuds
29 oct 06Z
95 noeuds
29 oct 00Z
95 noeuds
28 oct 18Z
85 noeuds
28 oct 12Z
80 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 29 octobre 1963
(Ginny)
Onde de tempête de 1,39 mètres
à Pointe-Sapin

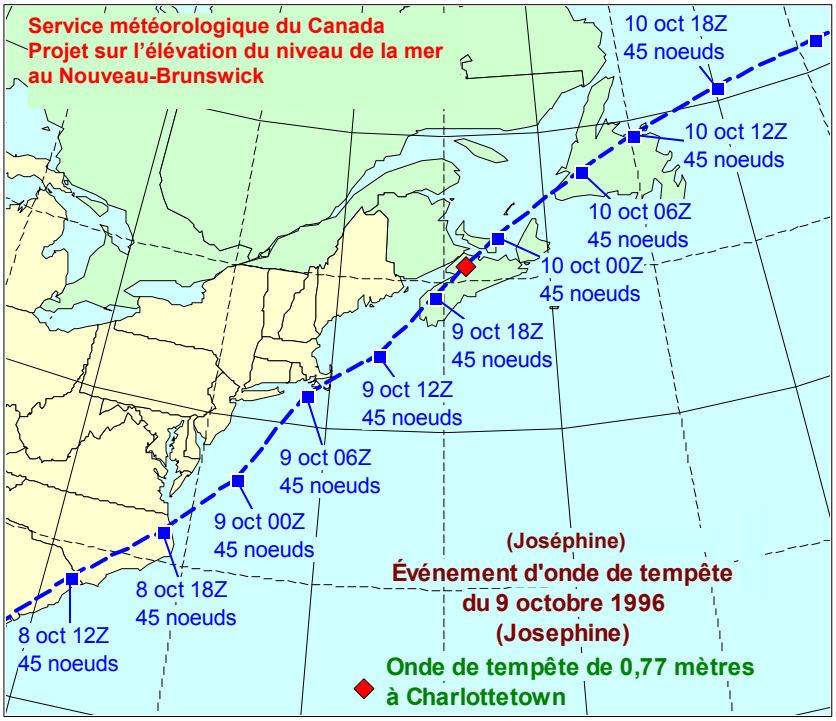

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
21 oct 18Z
50 noeuds
21 oct 12Z
65 noeuds
21 oct 06Z
65 noeuds
21 oct 00Z
65 noeuds
20 oct 18Z
70 noeuds
20 oct 12Z
70 noeuds
20 oct 06Z
70 noeuds
20 oct 00Z
75 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 21 octobre 1968
(Gladys)
Onde de tempête de 1,31 mètres
à Pointe-Sapin

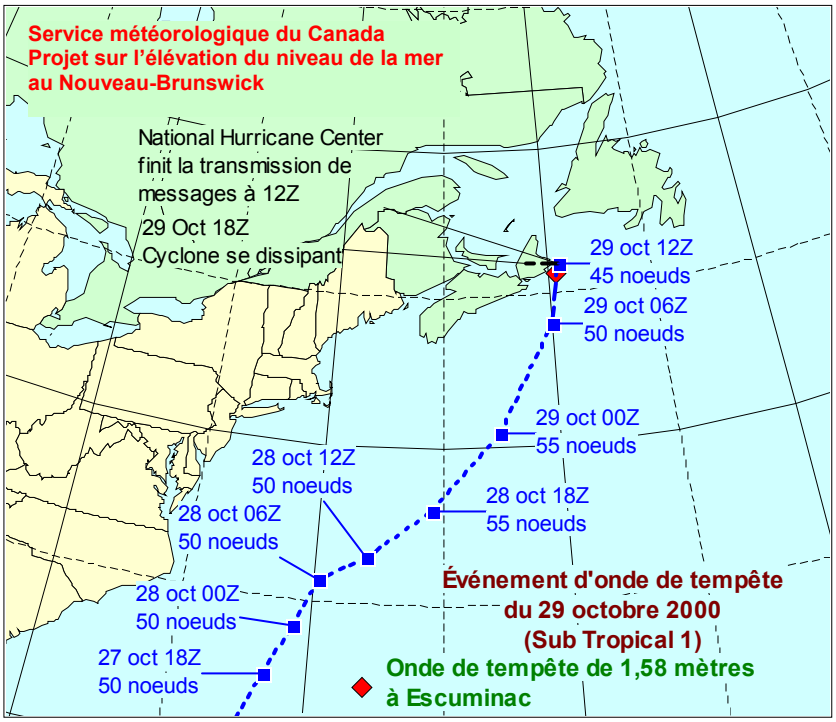

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
16 oct 00Z
45 noeuds
15 oct 18Z
70 noeuds
15 oct 12Z
70 noeuds
15 oct 06Z
70 noeuds
15 oct 00Z
65 noeuds
14 oct 18Z
50 noeuds
14 oct 12Z
40 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 15 octobre 1977
(Evelyn)
Onde de tempête de 0,60 mètre
à Escuminac

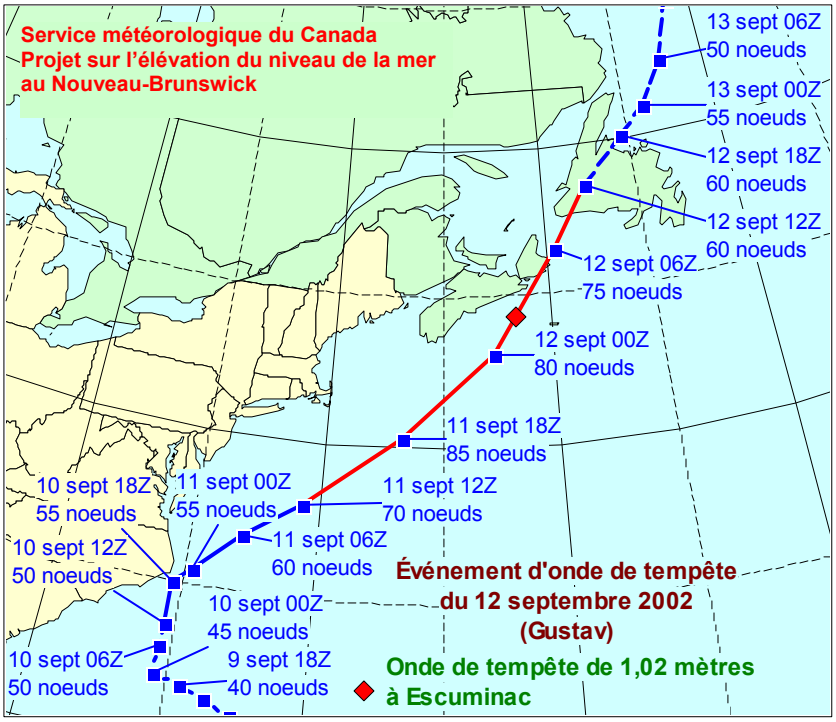

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
8 sept 00Z
60 noeuds
7 sept 18Z
55 noeuds
7 sept 12Z
50 noeuds
7 sept 06Z
50 noeuds
7 sept 00Z
45 noeuds
6 sept 18Z
40 noeuds
6 sept 12Z
40 noeuds
6 sept 06Z
40 noeuds
6 sept 00Z
40 noeuds
5 sept 18Z
40 noeuds
5 sept 12Z
45 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 7 septembre 1979
(David)
Onde de tempête de 0,81 mètre
à Pointe-du-Chêne

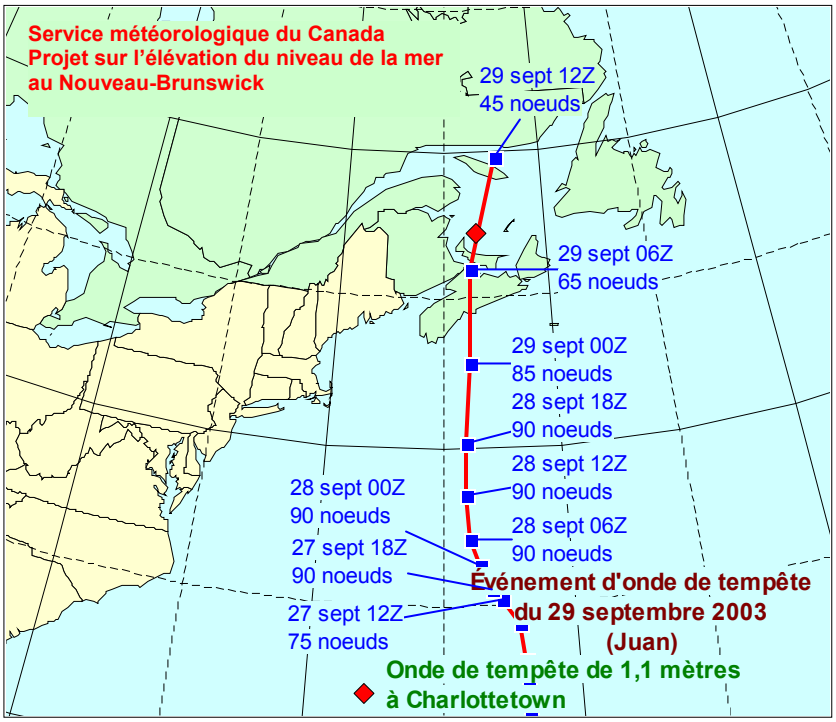

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
2 août 12Z
55 noeuds
2 août 06Z
60 noeuds
2 août 00Z
70 noeuds
1 août 18Z
65 noeuds
1 août 12Z
65 noeuds
1 août 06Z
65 noeuds
1 août 00Z
65 noeuds
31 juil 18Z
65 noeuds
31 juil 12Z
65 noeuds
31 juil 06Z
65 noeuds
31 juil 00Z
70 noeuds
30 juil 18Z
65 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 2 août 1990
(Bertha)
Onde de tempête de 0,65 mètre
à Pointe-du-Chêne

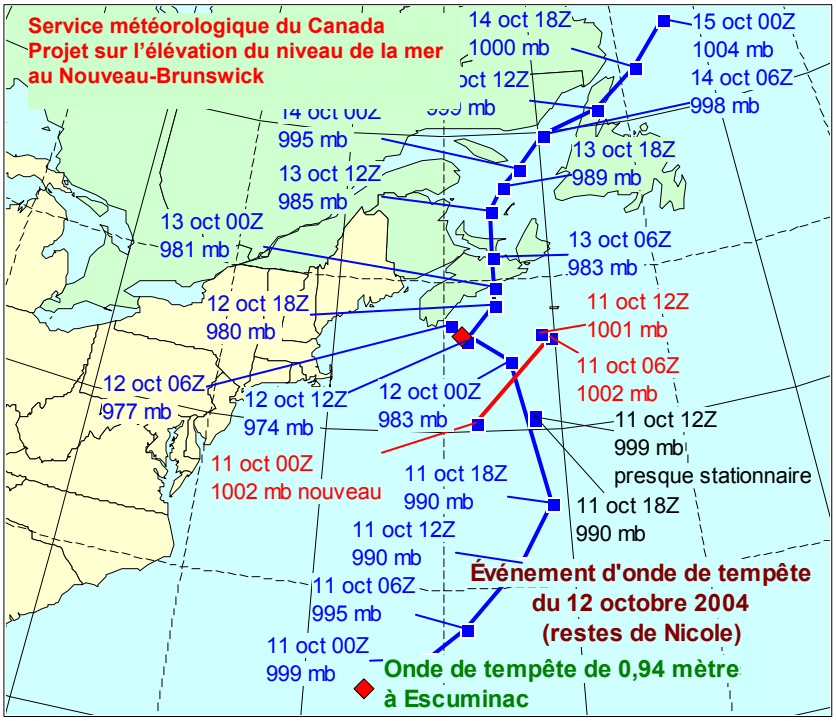

Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
15 sept 18Z
40 noeuds
15 sept 12Z
60 noeuds
15 sept 06Z
65 noeuds
15 sept 00Z
70 noeuds
16 sept 00Z
40 noeuds
16 sept 06Z
35 noeuds
14 sept 18Z
75 noeuds
14 sept 12Z
85 noeuds
14 sept 06Z
90 noeuds
14 sept 00Z
90 noeuds
13 sept 18Z
100 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 15 septembre 1996
(Hortense)
Onde de tempête de 0,76 mètre
à Charlottetown


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
10 oct 18Z
45 noeuds
10 oct 12Z
45 noeuds
10 oct 06Z
45 noeuds
10 oct 00Z
45 noeuds
9 oct 18Z
45 noeuds
9 oct 12Z
45 noeuds
9 oct 06Z
45 noeuds
9 oct 00Z
45 noeuds
8 oct 18Z
45 noeuds
8 oct 12Z
45 noeuds
(Joséphine)
Événement d'onde de tempête
du 9 octobre 1996
(Josephine)
Onde de tempête de 0,77 mètres
à Charlottetown


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
National Hurricane Center
finit la transmission de
messages à 12Z
29 Oct 18Z
Cyclone se dissipant
29 oct 12Z
45 noeuds
29 oct 06Z
50 noeuds
29 oct 00Z
55 noeuds
28 oct 18Z
55 noeuds
28 oct 12Z
50 noeuds
28 oct 06Z
50 noeuds
28 oct 00Z
50 noeuds
27 oct 18Z
50 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 29 octobre 2000
(Sub Tropical 1)
Onde de tempête de 1,58 mètres
à Escuminac


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
13 sept 06Z
50 noeuds
13 sept 00Z
55 noeuds
12 sept 18Z
60 noeuds
12 sept 12Z
60 noeuds
12 sept 06Z
75 noeuds
12 sept 00Z
80 noeuds
11 sept 18Z
85 noeuds
11 sept 12Z
70 noeuds
11 sept 06Z
60 noeuds
11 sept 00Z
55 noeuds
10 sept 18Z
55 noeuds
10 sept 12Z
50 noeuds
10 sept 06Z
50 noeuds
10 sept 00Z
45 noeuds
9 sept 18Z
40 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 12 septembre 2002
(Gustav)
Onde de tempête de 1,02 mètres
à Escuminac


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
29 sept 12Z
45 noeuds
29 sept 06Z
65 noeuds
29 sept 00Z
85 noeuds
28 sept 18Z
90 noeuds
28 sept 12Z
90 noeuds
28 sept 06Z
90 noeuds
28 sept 00Z
90 noeuds
27 sept 18Z
90 noeuds
27 sept 12Z
75 noeuds
Événement d'onde de tempête
du 29 septembre 2003
(Juan)
Onde de tempête de 1,1 mètres
à Charlottetown


Service météorologique du Canada
Projet sur l'élévation du niveau de la mer
au Nouveau-Brunswick
14 oct 18Z
1000 mb
15 oct 00Z
1004 mb
14 oct 06Z
998 mb
995 mb
13 oct 18Z
989 mb
13 oct 12Z
985 mb
13 oct 00Z
981 mb
13 oct 06Z
983 mb
12 oct 18Z
980 mb
11 oct 12Z
1001 mb
11 oct 06Z
1002 mb
12 oct 06Z
977 mb
12 oct 12Z
974 mb
12 oct 00Z
983 mb
11 oct 12Z
999 mb
presque stationnaire
11 oct 00Z
1002 mb nouveau
11 oct 18Z
990 mb
11 oct 18Z
990 mb
11 oct 12Z
990 mb
Événement d'onde de tempête
du 12 octobre 2004
(restes de Nicole)
11 oct 06Z
995 mb
11 oct 00Z
999 mb
Onde de tempête de 0,94 mètre
à Escuminac

4.3 Modélisation des ondes de tempête et des conditions météorologiques

Natacha Bernier[1], Jeff MacDonald[1], Jie Ou[1], Hal Ritchie[2]*, et Keith Thompson[1]

[1]Département d'océanographie, Université Dalhousie,
1355, rue Oxford, Halifax, Nouvelle-Écosse, Canada B3H 4J1
[2]Division de la recherche météorologique, Environnement Canada,
45, promenade Alderney, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada B2Y 2N6

* contact avec l'auteur (courriel Hal.Ritchie@ec.gc.ca)

4.3.1 Contexte

Les côtes du sud du golfe du Saint-Laurent sont très vulnérables aux inondations. On en veut pour exemple les récentes inondations dans le sud du Nouveau-Brunswick et dans l'Île-du-Prince-Édouard, qui ont beaucoup attiré l'attention des médias. Cette vulnérabilité a soulevé des inquiétudes, des scénarios des changements climatiques possibles ayant prévu une accélération de l'élévation du niveau de la mer planétaire, qui passerait de son taux actuel de 1-2 mm par an à une valeur probable de 5 mm par an au cours du prochain siècle. Cette accélération va exacerber les problèmes d'inondation sur les côtes et rendre encore plus impératif de se doter de stratégies efficaces d'atténuation et d'adaptation.

Les objectifs de cette composante du projet sont d'effectuer une modélisation météorologique et statistique des ondes de tempête afin de quantifier les impacts du changement climatique, et plus précisément de l'élévation du niveau de la mer et de l'augmentation de l'activité cyclonique, pour la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick, sur le golfe du Saint-Laurent.

Le projet s'articulait selon trois grands domaines :

- modélisation des ondes de tempête et validation des résultats par comparaison directe avec des observations indépendantes du niveau de la mer dans la région à l'étude;
- analyse des tendances et des extrêmes de tous les longs enregistrements du niveau de la mer pour la région;
- mises à niveau d'un affichage Web en temps quasi réel des prévisions d'ondes de tempête et validation de celles-ci par comparaison avec les niveaux marins observés dans la région à l'étude.

Nous décrivons en 4.3.2 l'installation de deux nouveaux marégraphes, d'où proviennent les observations indépendantes du niveau de la mer qui ont servi à tester la performance prévisionnelle du modèle d'ondes de tempête de Dalhousie utilisé dans cette étude. À la section 4.3.3, nous définissons les niveaux d'inondation critiques pour Shediac et, en 4.3.4, nous décrivons le modèle d'ondes de tempête et donnons une indication de la performance des prévisions des niveaux d'eau sur un et deux jours qui en sont issues. À la section 4.3.5, nous utilisons le modèle pour reconstruire les ondes de tempête sur les

40 dernières années sur l'ensemble de la côte est du Canada. En 4.3.6, nous calculons des périodes de récurrence des niveaux d'eau totaux (marée plus onde de tempête) à partir des observations horaires du niveau de la mer et les comparons aux résultats correspondants basés sur la reconstruction des ondes sur 40 ans et sur les marées prévues. Nous faisons également des projections quant aux changements que pourraient connaître ces niveaux de récurrence dans des scénarios plausibles de changement climatique; ce genre d'information est en effet essentiel pour concevoir des stratégies judicieuses d'adaptation au changement climatique. À la section 4.3.7, nous discutons de l'amélioration de l'affichage Web des prévisions à court terme du niveau de la mer, information nécessaire pour atténuer les effets de l'inondation due à une tempête donnée. En 4.3.8, nous montrons comment les probabilités de risque d'inondation, tirées des enregistrements des niveaux de la mer observés ou des résultats du modèle d'ondes de tempête, peuvent être visualisées à l'échelle municipale grâce à un modèle d'élévation numérique. Les conclusions font l'objet de la section 4.3.9.

4.3.2 Observations du niveau de la mer : installation de marégraphes côtiers

L'université Dalhousie a mis au point un modèle d'ondes de tempête qui est utilisé opérationnellement par Environnement Canada (EC) pour prévoir les inondations côtières (voir la section 4.3.4). Ce modèle montre une performance significative, avec des préavis allant jusqu'à 48 heures, et les avis et avertissements d'ondes de tempête qui en résultent se sont révélés extrêmement utiles aux services provinciaux d'intervention d'urgence dans leurs activités de gestion des catastrophes.

Pour améliorer encore les prévisions du modèle d'ondes de tempête, et aussi pour élaborer un ensemble réaliste de scénarios de risque dans un climat en changement, il faut d'abord évaluer rigoureusement la qualité des prévisions en utilisant des observations indépendantes du niveau de la mer. Les résultats d'un modèle bien validé permettent alors d'analyser les menaces de l'élévation du niveau de la mer planétaire pour les infrastructures critiques, à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). On peut à partir de là mieux comprendre les implications des inondations présentes et à venir à des fins de gestion des catastrophes (p. ex., atténuation au moyen de l'utilisation des terres ou du renforcement des structures, routes d'évacuation, activités de première ligne).

Pour qu'on puisse disposer des données indépendantes sur le niveau de la mer nécessaires à la validation du modèle, le Service hydrographique du Canada (contact : Charles O'Reilly) a installé en 2003 de nouveaux marégraphes spécifiquement destinés à l'étude. Les marégraphes et enregistreurs de données ont été fournis par M. K. Thompson (avec l'appui de la Fondation canadienne pour l'innovation). Le financement de l'installation, de la vérification et de l'exploitation des marégraphes a été assuré par EC (contact : Jim Abraham). Ce sont les données horaires du niveau de la mer recueillies à ces stations, ainsi que d'autres données provenant du réseau permanent de marégraphes du Canada atlantique, qui ont été utilisées pour tester la performance du modèle d'ondes de tempête, comme le décrit la section 4.5.4.

Nous avons choisi le site de Pointe-du-Chêne en raison de sa pertinence directe au projet. Le site de Wood Islands a été choisi pour deux raisons. D'abord, il est assez proche de Pointe-du-Chêne pour donner, en conjonction avec le marégraphe de

Charlottetown, une indication de la variabilité spatiale de la distribution des ondes de tempête à des échelles de l'ordre de la centaine de kilomètres. Ensuite, le marégraphe est situé à la gare maritime de Wood Islands. Or, de récents bulletins de nouvelles ont clairement indiqué que la sécurité des opérations de ce traversier pourrait être compromise par des ondes de tempête négatives (c.-à-d. des décotes), ou niveaux anormalement bas causés par un forçage météorologique anormal. La performance prévisionnelle du modèle d'ondes de tempête dans cette zone est donc un facteur préoccupant pour la sécurité de la navigation dans le détroit de Northumberland. Les figures 1 et 2 montrent l'abri du marégraphe à Wood Islands, et son emplacement sur le quai.

Figure 1. Abri contenant le marégraphe et l'enregistreur de données au site de Wood Islands. Photographie aimablement fournie par Fred Carmichael (SHC).

Figure 2. L'abri du marégraphe sur le côté du quai au site de Wood Islands. Photographie aimablement fournie par Fred Carmichael (SHC).

4.3.3 Niveaux d'inondation pour le sud-est du Nouveau-Brunswick

Dès les débuts du projet, Don Forbes, George Parkes, Hal Ritchie et Keith Thompson ont fixé un ensemble de niveaux d'inondation dont le Centre of Geographic Sciences (COGS) recommandait l'utilisation avec le MAN pour le sud-est du Nouveau-Brunswick. De même que pour l'analyse antérieure concernant Charlottetown, il a été recommandé de prendre en considération deux niveaux principaux, à des fins d'illustration, pour Pointe-du-Chêne :

1. *Valeur extrême observée* : 3,6 m au-dessus du zéro des cartes (CD). C'est actuellement la meilleure estimation du niveau maximum de la tempête du 21 janvier 2000, qui était sans aucun doute l'inondation la plus haute jamais observée dans la région.

2. *Scénario de changement climatique modéré* : 4,2 m au-dessus du zéro des cartes, soit le niveau d'inondation du 21 janvier 2000, plus une élévation modérée sur 100 ans du niveau de la mer planétaire (50 cm) et la subsidence de la croûte terrestre (10 cm).

4.3.4 Modèle d'ondes de tempête et validation de ses résultats

Le modèle d'ondes de tempête a d'abord été développé à l'université Dalhousie (Bobanovic et Thompson, 2001) puis confié à Environnement Canada à des fins opérationnelles. En mode recherche, nous utilisons aussi une version équivalente modifiée du Princeton Ocean Model (Mellor, 1998), qui est basée sur les équations barotropiques, moyennées sur la profondeur, de la quantité de mouvement et de la continuité, que nous ne reproduirons pas ici, mais qui sont faciles à trouver dans ces références. Le modèle prédit les courants océaniques horizontaux moyennés sur la profondeur et le changement du niveau de la mer, ou onde de tempête, causé par les tempêtes. Il est forcé par les variations de la pression atmosphérique à la surface et par la tension du vent à la surface calculée à partir des vents atmosphériques à une hauteur de 10 m. Il est également forcé par la tension du fond, qui est fonction du courant océanique horizontal moyenné sur la profondeur et d'un coefficient prescrit de frottement sur le fond. Le domaine du modèle s'étend de 38º N à 60º N et de 72º O à 42º O) (voir la figure 7). Il inclut donc les plates-formes du Labrador et de Terre-Neuve, le golfe du Saint-Laurent, la plate-forme Néo-Écossaise, la baie de Fundy et le golfe du Maine. Sa résolution est de 1/12 de degré, ce qui correspond en latitude à une résolution d'environ 9 km. Une condition radiative aux limites est appliquée à toutes les limites ouvertes du modèle. On trouvera plus de détail dans les références données plus haut.

Aux fins de la prévision opérationnelle, la pression atmosphérique en surface et les vents de surface (nécessaires pour calculer la tension du vent) sont fournis par le modèle opérationnel de prévision atmosphérique du Service météorologique du Canada (SMC). Pour la reconstruction sur 40 ans présentée en 4.3.5, les champs atmosphériques moteurs sont les données de vents de surface AES40 (Swail et Cox, 2000) et les pressions en surface déduites (voir la même section).

Dans la prochaine section, nous présentons les résultats de la validation du système de modélisation des ondes de tempête, basée sur les observations provenant des nouveaux marégraphes installés à Pointe-du-Chêne et Wood Islands. Les deux consignent une observation interne du niveau de la mer toutes les 15 minutes sur un enregistreur de données Sutron. Le Service des données sur le milieu marin (SDMM) télécharge automatiquement les nouvelles données stockées pour chaque jour, les soumet à un contrôle de la qualité, les archive et transmet les observations au centre de prévision de l'environnement marin (Centre for Marine Environmental Prediction) à l'université Dalhousie. Les données sont aussi mises à la disposition du grand public. Une fois arrivées à Dalhousie, les données de niveau de la mer du SDMM font de nouveau l'objet d'une vérification de la qualité, et on en soustrait la marée prévue pour obtenir le « différentiel » (c.-à-d. la différence entre le niveau de la mer et la marée prévue). Les niveaux marins et différentiels horaires sont ensuite pointés et comparés aux prévisions pour 48 heures effectuées par le modèle d'ondes de tempête de Dalhousie. Ce modèle est exécuté chaque jour; il est régi par les vents et les pressions en surface selon les prévisions. Ces données sont fournies de façon régulière par Environnement Canada.

La figure 3 présente un graphique typique du niveau de la mer observé à Pointe-du-Chêne, pour octobre 2004 (enregistrement complet à l'adresse http://www.cmep.ca). La ligne noire du panneau du haut montre le niveau de la mer horaire observé. Il s'agit clairement d'un complexe de marées diurnes et semi-diurnes, avec une amplitude

d'environ 2 mètres. (La marée, due à l'attraction gravitationnelle du soleil et de la lune, peut facilement être calculée à l'aide d'un logiciel standard d'analyse d'un enregistrement des niveaux marins horaires observés.) La ligne bleue du même panneau représente le différentiel, soit la différence entre le niveau observé et la marée prévue. Les fluctuations horaires du différentiel, qui sont dues surtout à des changements de la pression atmosphérique et de la tension du vent en jeu sur les eaux des plates-formes du Canada atlantique, sont prévues avec le modèle d'ondes de tempête. La ligne rouge du panneau du haut montre les prévisions de 0 à 24 heures issues du modèle d'ondes. On remarquera l'étroite concordance entre la ligne rouge et la ligne bleue : c'est la preuve que le modèle d'ondes de tempête a une bonne performance de prévision des ondes de tempête sur un horizon de 24 heures.

Le panneau du bas de la figure 3 montre le niveau d'eau horaire observé à Pointe-du-Chêne (comme sur le panneau du haut) et la prévision sur 24 heures du niveau total (ligne rouge) basée sur l'addition de l'onde prévue et de la marée prévue. La ligne bleue est l'erreur de la prévision du niveau total une journée plus tard. (On utilise un modèle statistique pour prévoir les erreurs dans l'énergie tidale locale moyenne et résiduelle demeurant dans les différentiels.)

La performance de prévision sur 24 heures du modèle pour Pointe-du-Chêne est généralement raisonnable (l'écart type de l'erreur de prévision est inférieur à environ 10 cm). Elle se compare à sa performance pour Charlottetown, où est situé un marégraphe du réseau marégraphique permanent du Canada atlantique.

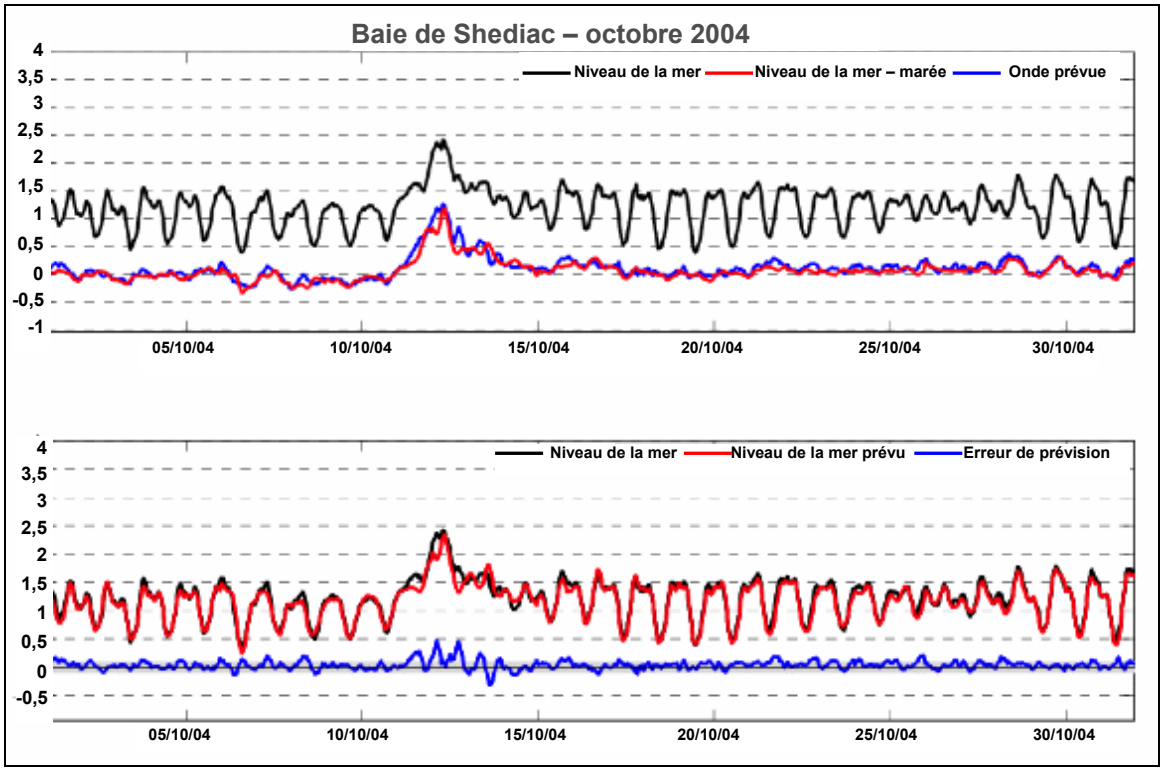


Figure 3. Niveau de la mer observé, et prévisions issues du modèle d'ondes de tempête, pour Shediac, octobre 2004. Panneau du haut : la ligne noire représente le niveau de la mer observé,

la ligne bleue le différentiel (c.-à-d. le niveau observé moins la marée), la ligne rouge la prévision de 0 à 24 heures issue du modèle d'ondes de tempête. Panneau du bas : la ligne noire représente le niveau de la mer observé, la ligne rouge la prévision de 0 à 24 heures du niveau d'eau total et la ligne bleue l'erreur de la prévision de 0 à 24 heures.

La figure 4 montre la performance de prévision du modèle en décembre 2004, quand une forte tempête a frappé les provinces de l'Atlantique. La concordance entre les observations et la prévision du modèle est très bonne sur les périodes pour lesquelles nous avons des données fiables. À noter qu'il semble que le marégraphe de Pointe-du-Chêne ait eu un problème de fonctionnement juste après la pointe de l'onde de tempête à la fin de décembre. C'est ce que confirme la figure 5, qui montre la performance de prévision du modèle sur la même période, mais à Wood Islands, station marégraphique des environs.

Dans l'ensemble, les résultats de la validation à l'aide de données indépendantes sur le niveau de la mer montrent que la performance du modèle d'ondes de tempête dans le sud du golfe est très bonne, avec un écart type de l'erreur de prévision inférieur à 10 cm.

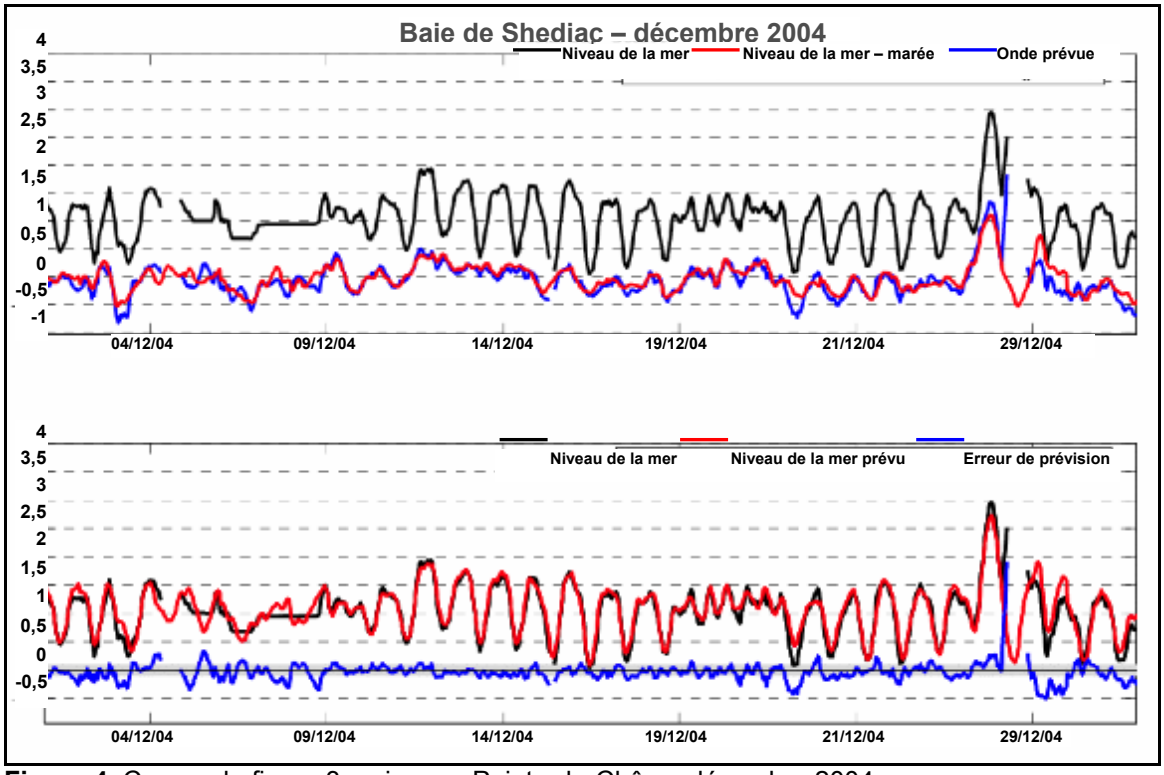


Figure 4. Comme la figure 3 mais pour Pointe-du-Chêne, décembre 2004.

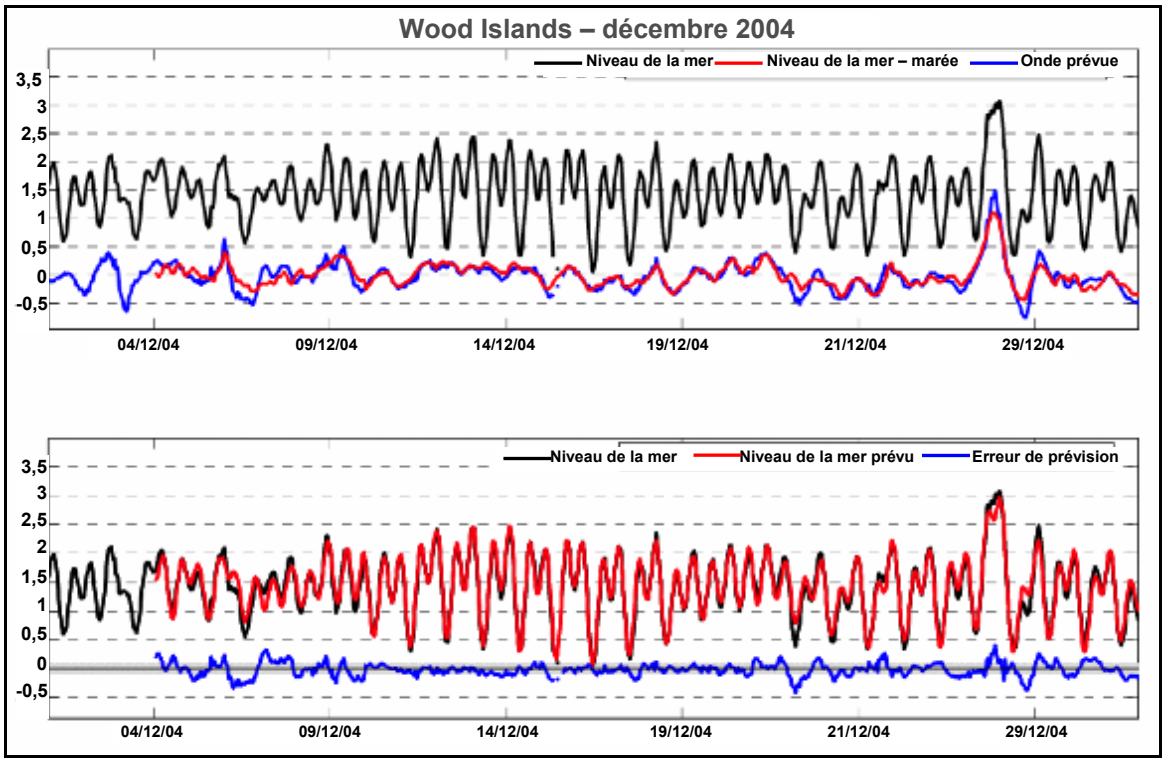


Figure 5. Comme la figure 3 mais pour Wood Islands, décembre 2004.

4.3.5 Reconstruction sur 40 ans des ondes de tempête

Nous décrivons ici l'utilisation du modèle validé des ondes de tempête pour reconstruire les changements du niveau de la mer survenus dans les 40 dernières années à tous les points du domaine du modèle de l'Atlantique Nord. Ces données simulées sont ensuite utilisées pour identifier quelles régions sont présentement à risque, et comment ce risque pourrait changer au cours du prochain siècle.

De longues séries chronologiques des champs maillés du vent et de la pression atmosphérique en surface sont indispensables pour produire des reconstructions des ondes de tempête. Dans les dernières années, des réanalyses de la pression atmosphérique ont permis de disposer de ces champs, mais la plupart des champs pluridécennaux de ces paramètres ne sont disponibles qu'à basse résolution, et ne se prêtent donc pas à une étude ciblée à terme sur des épisodes de niveaux marins extrêmes. Les champs de vent AES40 y font toutefois exception.

Les champs de vent AES40 sont disponibles pour plus de 40 ans, et à une résolution relativement élevée. Ils constituent donc à l'heure actuelle les vents les plus appropriés pour la présente étude. Malheureusement, les champs AES40, produits en vue de reconstructions des vagues, ne contiennent pas de champs de pression. Ceux-ci doivent donc être inférés à partir des champs de vent. Les vents utilisés pour régir le modèle ont été tirés de l'ensemble de données AES40 (Swail et Cox, 2000). Les champs couvrent l'Atlantique Nord, de 0^{o} à 75^{o} N, et de 83^{o} O à 20^{o} E) et sont disponibles aux 6 heures, de 1958 à 2000, avec une résolution horizontale de 0,625^{o} de latitude et 0,833^{o} de longitude.

La génération des vents AES40 par Swail *et al.* (2000) a démarré avec des champs de première estimation de la réanalyse du NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996). Des météorologistes spécialement formés ont d'abord évalué ces champs et les ont corrigés à la lumière de comparaisons avec les observations de vent. Les champs corrigés ont ensuite été modifiés après évaluation de la performance d'un modèle de vagues régi par les vents corrigés. Plus de 10 000 heures en tout ont été consacrées par des météorologistes spécialisés à l'amélioration subjective des vents de la réanalyse du NCEP. Les études de validation donnent à penser que les vents AES40 ont un biais d'environ 0,3 ms^{-1} et un écart type de l'erreur d'environ 1,2 ms^{-1} (Swail *et al.*, 2000).

Les champs de vent AES40 ayant, comme on l'a dit plus haut, été produits dans l'intention de faire des reconstructions des vagues dans l'Atlantique Nord, on n'a pas accordé d'attention au calcul des champs de pression. Ceux-ci sont cependant essentiels pour modéliser les ondes de tempête. Il existe des champs de pression issus d'autres réanalyses (p. ex. NCEP/NCAR), mais ils sont trop grossiers pour l'étude de phénomènes extrêmes. Nous avons donc décidé de procéder à une extraction dynamique (inférence) des champs de pression à partir des champs de vent AES40.

La théorie de l'extraction dynamique, appliquée la première fois par Gal-Chen (1978), a été utilisée depuis pour générer des champs de pression à partir des observations de radars Doppler (p. ex., Gal-Chen et Kropfli, 1984; Parsons *et al.*, 1987; Liou, 2001). Dans le présent cas, nous postulons que le gradient de pression sur l'horizontale au-dessus de la couche limite planétaire est donné par :

$$-\frac{1}{\rho}\nabla p_a = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\zeta + f)\vec{k} \times \vec{u} + \frac{1}{2}\nabla \mid \vec{u} \mid^2 \qquad (1)$$

où p_a est la pression atmosphérique, $\vec{u}$ le vent de gradient, f le paramètre de Coriolis, ζ le tourbillon et $\vec{k}$ le vecteur vertical vers le haut. L'idée de base est d'utiliser les vents AES40 pour calculer le membre de droite de (1) et donc d'extraire les champs de pression. On prend d'abord la divergence de l'équation pour obtenir une équation elliptique de la pression. Tous les termes contenant $\vec{u}$ sont évalués à l'aide des vents de surface AES40. On résout ensuite l'équation elliptique autour d'une constante arbitraire en utilisant une méthode de sur-relaxation successive. On trouve facilement les détails de ces méthodes numériques (p. ex., Press *et al.*, 1996).

Quand on utilise les vents AES40 pour estimer la divergence du membre de droite de (1), la difficulté est qu'ils ne représentent pas le vent juste au-dessus de la couche limite planétaire. Ce sont des vents à 10 m. Ces vents en surface doivent donc être amenés au-dessus de la couche limite avant de pouvoir être utilisés pour résoudre l'équation elliptique.

Pour calculer la fonction de transfert la plus exacte (c.-à-d., les angles par rapport aux isobares et les facteurs d'amplitude entre les vents en surface et les vents juste au-dessus de la couche limite), on a utilisé les champs de vent et de pression en surface aux 6 heures réanalysés du NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996). On a d'abord dérivé les

vents aux 6 heures des champs de pression du NCEP/NCAR pour la période 1990-1999. Tous les vents à 10 m en surface et les vents géostrophiques calculés aux six heures ont ensuite été réunis pour une période de dix ans (1990-1999 inclusivement), et on a calculé une fonction de transfert pour obtenir l'angle avec les isobares et le facteur de mise à l'échelle qui minimisait le mieux les erreurs sur une période d'un mois. Les relations ainsi obtenues varient sans heurts d'un mois et d'une année à l'autre. Les 10 valeurs annuelles obtenues pour chaque mois ont alors été moyennées pour donner l'angle avec les isobares et le facteur de mise à l'échelle de l'amplitude pour chaque mois de l'année.

Les fonctions de transfert ont été utilisées pour amener les champs de vent en surface AES40 à l'extérieur de la couche limite, de manière à avoir les vents nécessaires pour résoudre les champs de pression. On a utilisé les enregistrements de 29 stations terrestres (dont aucune n'avait servi dans le processus d'extraction) et de 23 stations CMAN et bouées pour valider les champs de pression. C'est ce qui est illustré à la figure 6. L'écart type de l'erreur pour le champ de pression prévu est de 2,65 mb, ce qui valide la méthode utilisée ici.

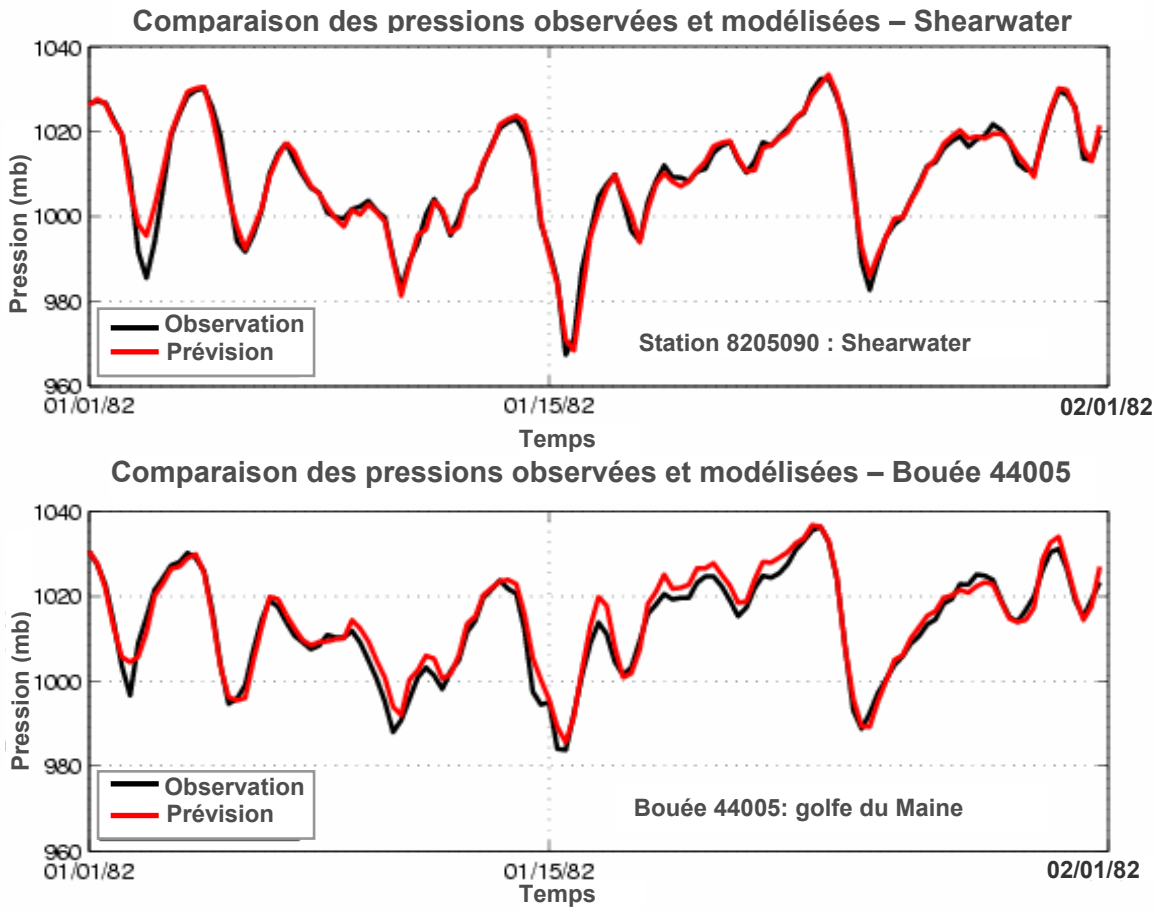


Figure 6. Série chronologique des pressions en surface observées (noir) et inférées (rouge) pour janvier 1982. Le panneau du haut montre la série chronologique pour Shearwater et celui du bas pour la bouée 44005 (située dans le golfe du Maine) pour cette période.

4.3.5.1 Ondes de tempête reconstruites et exactitude des reconstructions

Le modèle d'ondes de tempête a été exécuté pour le nord-ouest de l'Atlantique (figure 7) pour la période de 1960 à 1999, régi par les vents AES40 et les pressions atmosphériques inférées. Les résultats en sont des cartes horaires des niveaux marins, illustrées dans les deux rangées du haut de la figure 8. Pour valider la reconstruction sur 40 ans, les ondes du modèle ont été comparées aux différentiels (le niveau de la mer mesuré moins la marée) observés filtrés pour en enlever les signaux haute fréquence non résolus par le modèle (c-à-d. que les périodes inférieures à 12 heures ne sont pas résolues à cause de la fréquence de Nyquist de 12 heures associée aux forçages du vent et de la pression aux 6 heures). Dans l'ensemble, il y avait une assez bonne concordance entre les reconstructions d'ondes de tempête et les différentiels observés, comme le montre le panneau du bas de la figure 8. De toute évidence, le modèle reproduit bien l'amplitude du gros épisode de tempête. La structure dépendante de la fréquence des ondes reconstruites se compare elle aussi généralement bien avec celle des différentiels observés (comparez la ligne noire avec la ligne rouge).

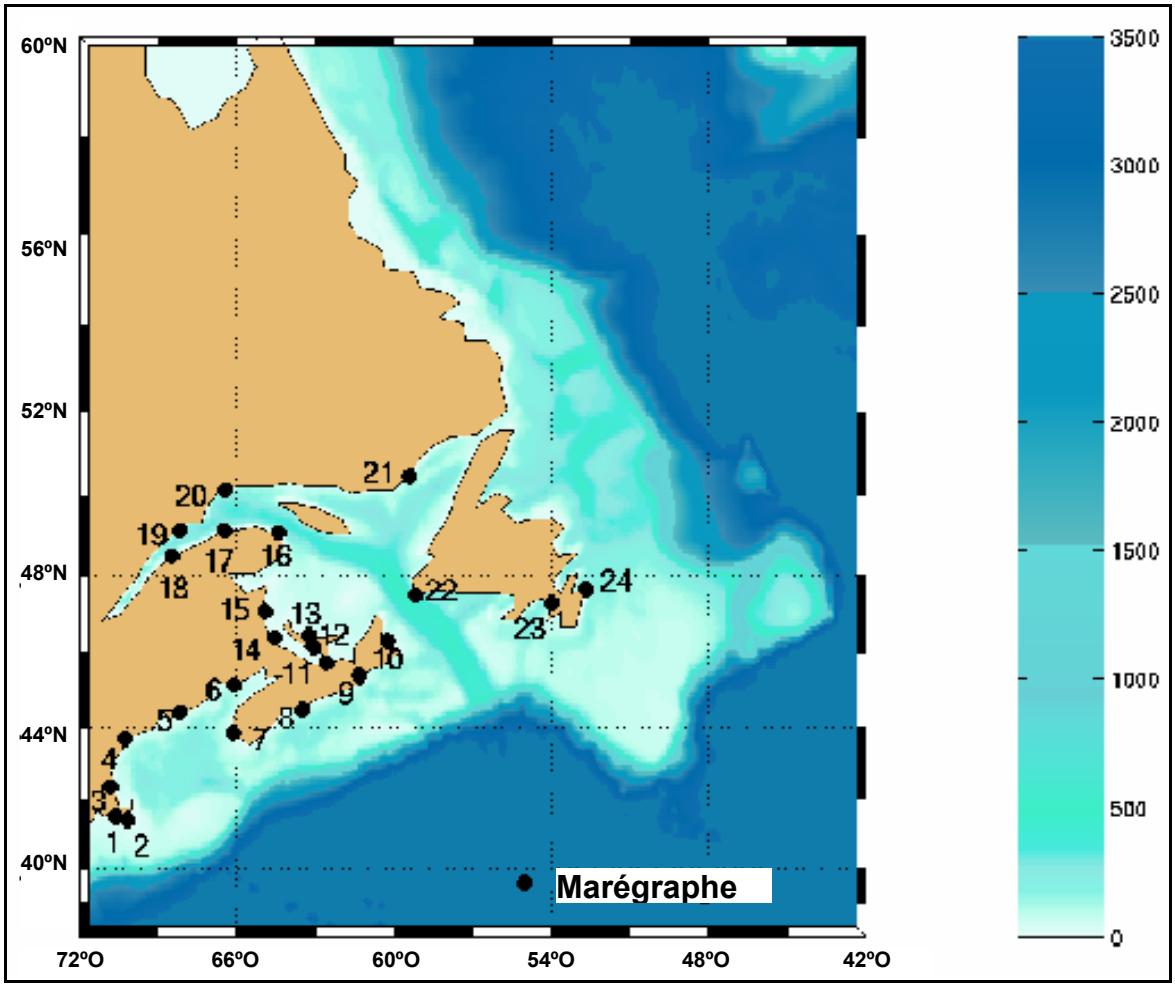


Figure 7. Domaine du modèle des ondes de tempête et emplacement des marégraphes. Les teintes de bleu indiquent la profondeur en mètres. Les points marquent l'emplacement des marégraphes fournissant des données horaires sur le niveau de la mer à des fins de validation

des reconstructions d'ondes de tempête (tableau 1). Les chiffres portés sur la carte sont les codes de station utilisés dans la présente étude.

La comparaison des ondes reconstruites et des différentiels observés présentée à la figure 8 est caractéristique. Nous avons aussi été encouragés en constatant que l'erreur reconstruite restait relativement constante quand on la calculait séparément pour chaque mois des 40 ans de la reconstruction. L'écart type de l'erreur de la prévision est en général inférieur à 10 cm. Comme le niveau de la mer fait intervenir le forçage du vent et de la pression, une erreur de reconstruction assez constante sous-entend que l'exactitude des vents AES40 et les pressions atmosphériques inférées sont assez stables sur la période à l'étude.

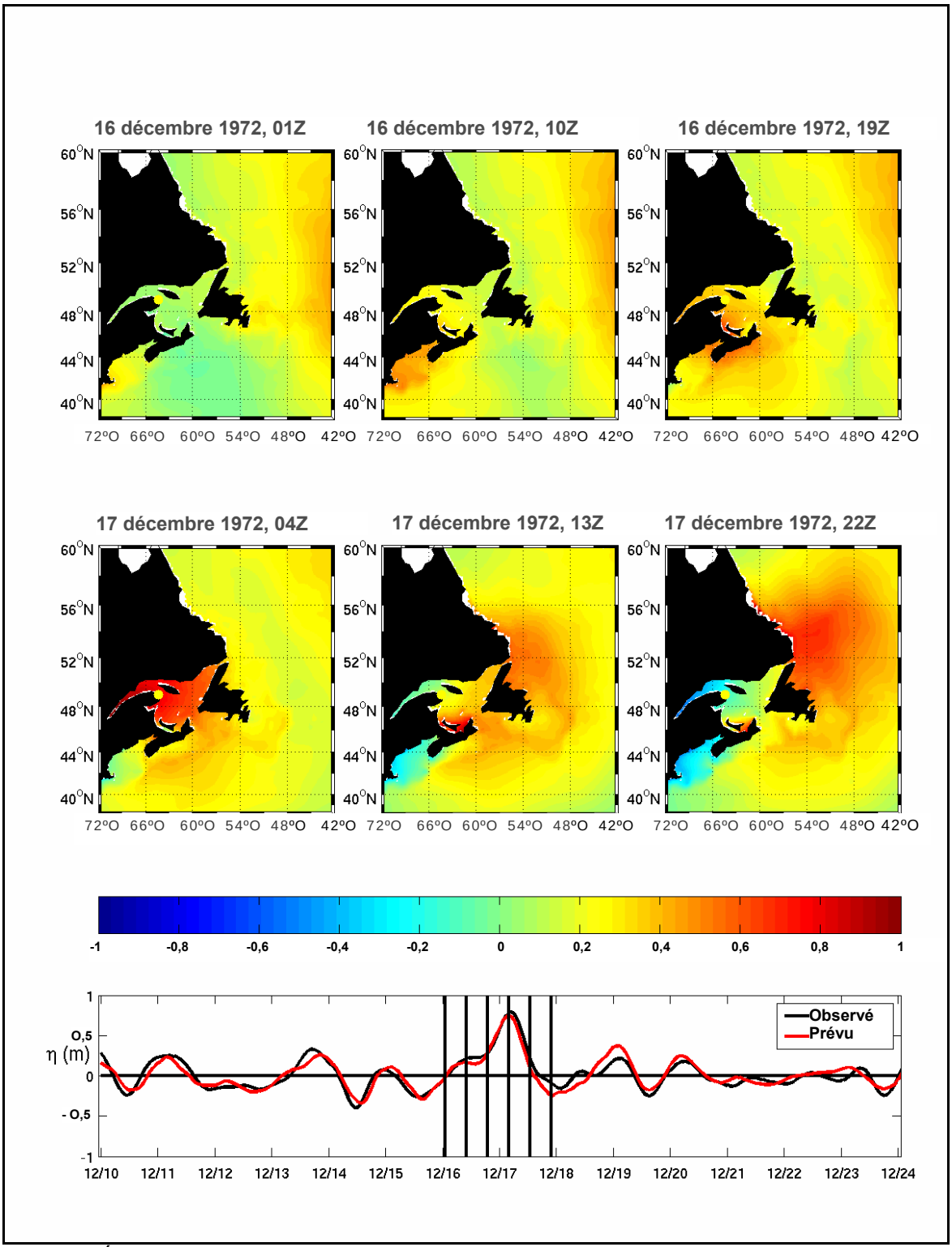


Figure 8. Évolution de l'onde de tempête de décembre 1972. Les six panneaux du haut sont des instantanés des ondes reconstruites, pris à intervalles de 9 heures. La barre qui suit donne les couleurs correspondant aux niveaux de l'onde en mètres. Le panneau du bas montre les différentiels filtrés observés (noir) et les ondes reconstruites (rouge) à la station marégraphique

marquée par le point jaune. La série couvre deux semaines de part et d'autre de l'épisode d'onde du 17 décembre 1972. Les traits verticaux marquent les heures auxquelles ont été pris les instantanés.

4.3.5.2 Analyse extrémale des ondes observées et reconstruites

La présente étude vise la distribution des ondes et niveaux marins extrêmes. Autrement dit, même si de petites erreurs dans le moment de survenue des ondes reconstruites peuvent entraîner d'importantes erreurs de la reconstruction, elles n'auront que peu d'effet sur les ondes extrêmes. Les périodes de récurrence des différentiels observés et des ondes reconstruites ont donc été calculées pour toutes les stations; c'est ce qui est illustré à la figure 9 à l'aide des enregistrements d'observation de Charlottetown et Saint John.

On peut comparer les maximums et minimums de différentiels extrêmes à l'aide de la figure 9. On voit d'emblée que la pente des maximums (soit la différence entre le niveau à récurrence de 2 ans et celui pour 40 ans) est souvent plus prononcée que celle des minimums. À la plupart des stations, la valeur absolue des plus petits maximums annuels est plus grande que celle des minimums annuels. Les pentes diffèrent aussi, celle des maximums étant plus grande que celle des minimums (en négligeant le signe moins) à 18 des 24 stations. À noter que 5 des 6 stations présentant les plus grandes plages de minimums sont situées sur le Saint-Laurent. Les plus grands écarts entre les maximums et les minimums sont aux stations les plus méridionales, où l'on sait que les ouragans donnent des surcotes (différentiels positifs) extrêmes. La plus grande plage de maximums concorde en général avec l'asymétrie des champs de forçage (Bernier, 2005). D'autres facteurs, comme une augmentation du frottement apparent sur le fond associée à une baisse de la profondeur d'eau pendant les grands épisodes de décote (différentiel négatif), peuvent contribuer à limiter l'amplitude des ondes de tempête et expliquer que les surcotes sont plus grandes que les décotes.

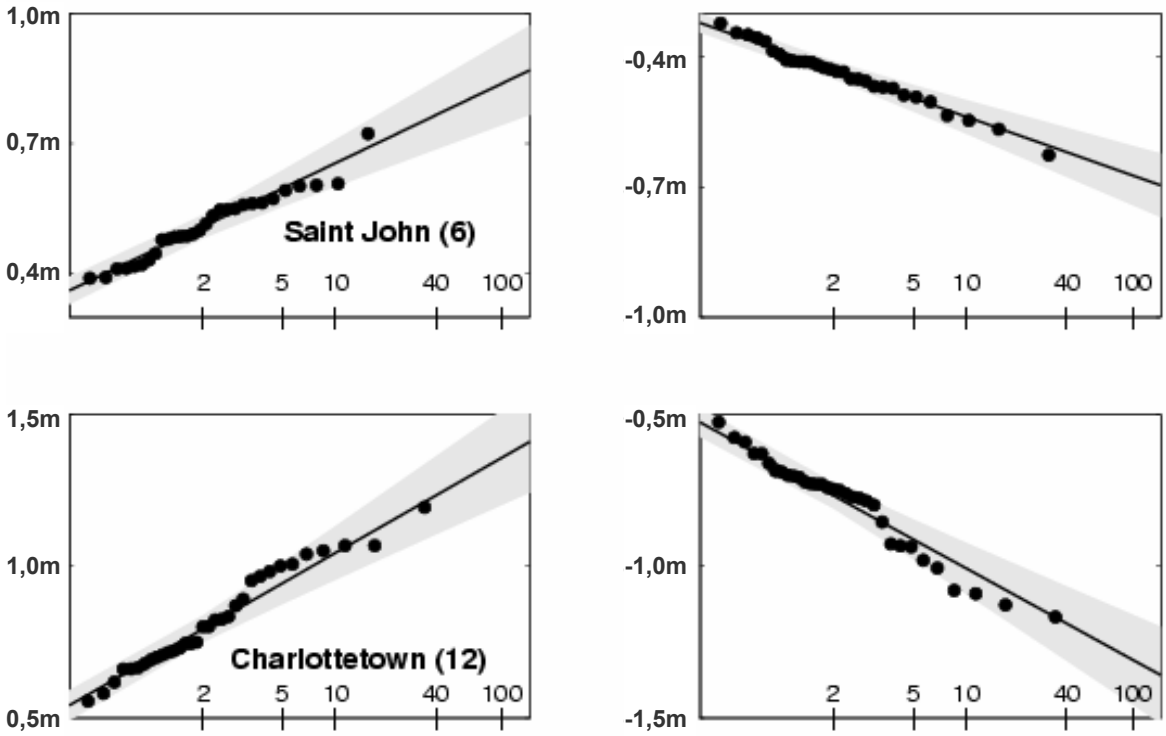


Figure 9. Période de récurrence des surcotes et des décotes maximales observées. L'axe des x est la période de récurrence, en années. L'axe des y est le niveau de récurrence critique, en mètres. Les points sont les maximums annuels observés (classés) des surcotes (colonne de gauche), et les minimums annuels des décotes (colonne de droite), disponibles pour la période 1960-1999. Les lignes ont été ajustées à l'aide de la méthode de vraisemblance maximale. Les zones ombrées marquent les intervalles de confiance 95 % obtenus par la méthode delta. Noter la différence dans la plage des surcotes et dans celle des décotes.

Pour valider le modèle en ce qui concerne les ondes extrêmes, nous avons comparé le niveau de retour sur 40 ans des ondes reconstruites (panneaux du bas de la figure 10), calculé à partir d'une analyse extrémale de type I, avec le niveau de récurrence de 40 ans des différentiels filtrés (panneaux du haut de la figure 10).

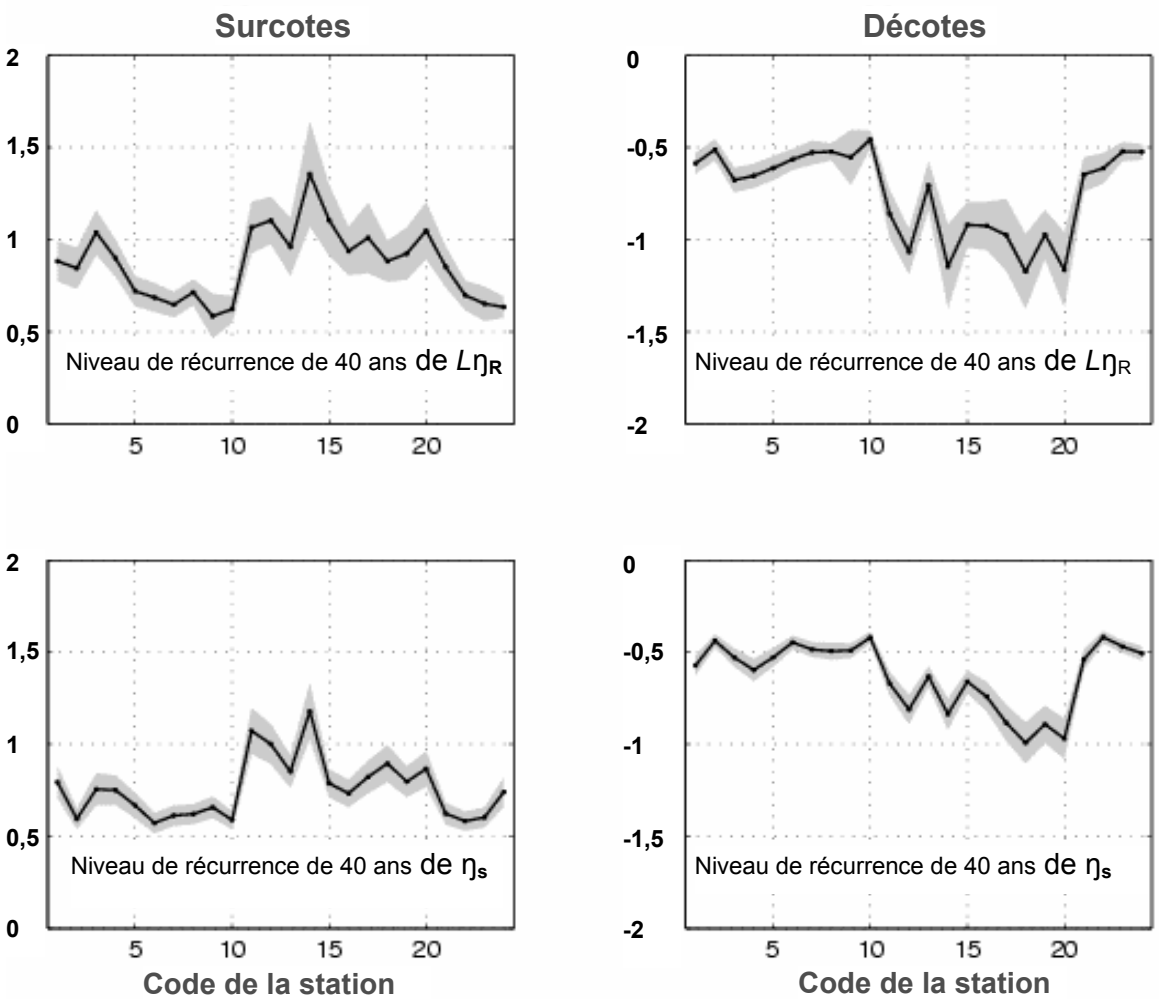


Figure 10. Niveau de récurrence sur 40 ans des surcotes et des décotes. L'axe des x montre le code de la station (figure 7). L'axe des y est le niveau de récurrence de 40 ans, en mètres, calculé à partir de la distribution extrémale de type I ajustée aux surcotes (à gauche) et aux décotes (à droite) annuelles corrigées, présentées à la figure 4. Les zones ombrées marquent les intervalles de confiance de 95 % à une période de récurrence de 40 ans. Le panneau supérieur gauche montre les niveaux de récurrence des surcotes observées, et le panneau inférieur gauche ceux des surcotes reconstruites. Le panneau supérieur droit montre les niveaux de récurrence des décotes observées, et le panneau inférieur droit ceux des décotes reconstruites. C'est dans le golfe du Saint-Laurent qu'on observe les niveaux de récurrence les plus élevés. En règle générale, les panneaux du bas montrent la même variabilité entre stations que les panneaux du haut. Pour certaines stations, le modèle sous-estime le niveau de récurrence de 40 ans mais, dans l'ensemble, rend bien le signal spatial et donne des niveaux de récurrence qui se situent dans les intervalles de confiance des niveaux observés, tant pour les surcotes que pour les décotes.

Les niveaux de récurrence prévus montrent une variabilité spatiale semblable à celle des niveaux observés. On note une certaine tendance à la sous-estimation du niveau de récurrence de 40 ans; cependant, il a été encourageant de constater que nos estimations tombent généralement dans l'intervalle de confiance des niveaux observés. C'est à

Boston, à Saint John et dans la baie de Shediac que les différences sont le plus visibles (comparez les panneaux de droite de la figure 10). À Boston, deux des plus importants épisodes sont associés à des ouragans (en général, la résolution de nos champs de forçage est trop grossière pour résoudre les ouragans, et nous avons tendance à sous-estimer ces derniers). À Boston et à Saint John, les différences peuvent aussi être dues à la résolution horizontale du modèle et aux difficultés de la modélisation des effets du port. Dans la baie de Shediac, la différence des périodes de récurrence tient surtout au fait que l'on a comparé une analyse extrémale basée sur un enregistrement de 12 ans à une autre basée sur 40 ans. Comme les périodes de récurrence des différentiels reconstruits concordaient généralement bien avec les observations, nous avons réalisé une carte du niveau de récurrence sur 40 ans pour la zone à l'étude (figure 11). C'est la première fois qu'une telle carte a été dressée. La carte a été obtenue en ajustant une distribution de type I aux 40 maximums annuels à chaque point de grille. La figure 11 met en évidence la variabilité spatiale des niveaux de récurrence de 40 ans.

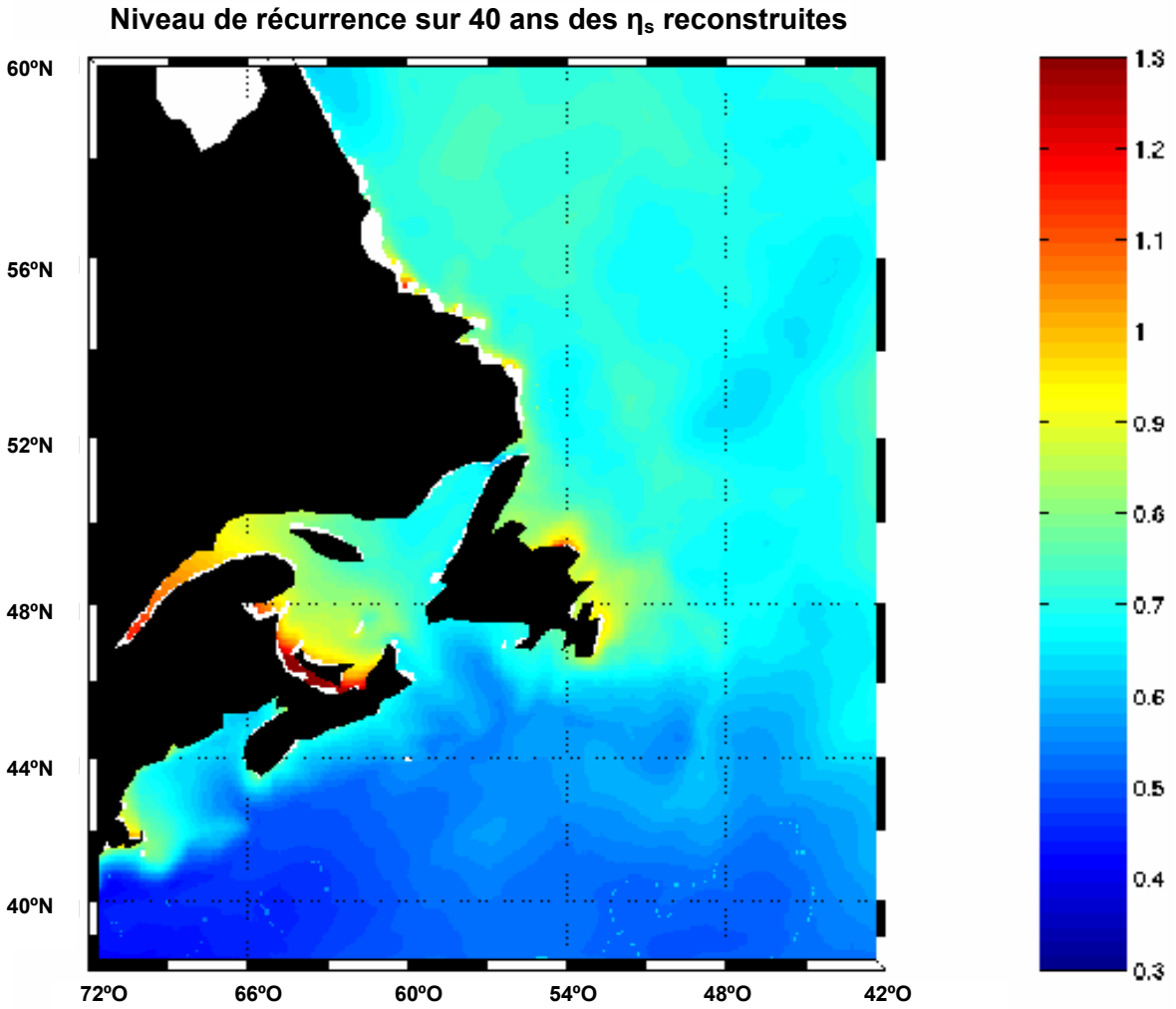


Figure 11. Niveau de récurrence sur 40 ans des surcotes reconstruites, basé sur la reconstruction sur 40 ans. La barre donne les couleurs correspondant aux niveaux de surcote sur 40 ans, en mètres. Le graphique présente une très grande variabilité spatiale. Les épisodes d'ondes les plus extrêmes devraient frapper les régions côtières portant les couleurs les plus chaudes.

4.3.5.3 Tendances pluridécennales des ondes extrêmes

Nous examinerons ici l'existence de tendances des maximums et des minimums annuels.

On utilise souvent la distribution extrémale de type I dans l'étude des enregistrements du niveau de la mer (p. ex., Dixon et Tawn, 1999; Lowe *et al.*, 2001; Woodworth et Backman, 2002; Bernier et Thompson, soumis; Bernier *et al.*, soumis). Elle a la formule suivante :

$$\Pr(M_n < \eta_c) = \exp\{-\exp[-(\eta_c - a_n)/b_n]\} \qquad (2)$$

où $\Pr$ est une probabilité, M_n les maximums d'une séquence de n variables aléatoires indépendantes à distribution identique, η_c le niveau critique, a_n un paramètre d'emplacement et b_n un paramètre d'échelle. Il y a deux paramètres dans (2) qui peuvent varier avec le temps : le paramètre d'emplacement a_n, qui est une mesure de la moyenne, et le paramètre d'échelle b_n, qui est une mesure de l'étalement (Coles, 2001).

Les tendances du paramètre d'étalement $a_n = a_{n0} + a_{n1}t$, où t indique le temps et où a_{n0}, a_{n1} sont des paramètres estimés à partir des maximums ou des minimums annuels observés (voir les détails dans Coles, 2001, ou Bernier, 2005), ont été calculées à chaque point de grille de la reconstruction pour les maximums et pour les minimums. Les tendances des différentiels maximums sont significativement différentes de 0 à seulement 3 des 24 stations, avec un taux moyen de –0,4 mm/an. La tendance des maximums reconstruits a_{n1}^{+} est négative sur la région, à l'exception de la plate-forme et de la mer du Labrador et du nord-est du golfe du Saint-Laurent (panneau supérieur gauche de la figure 12). Quelques points présentent des tendances significativement différentes de 0 (panneau inférieur gauche de la figure 12). En combinaison, ces chiffres donnent à penser qu'il y a une baisse légère, mais de grande étendue spatiale, des surcotes extrêmes d'ondes de tempête sur la période 1960-1999.

Les tendances des différentiels minimums sont significativement différentes de 0 à seulement 4 des 24 stations, avec un taux moyen de 0,1 mm/an. On notera ici qu'une tendance positive signifie que les décotes (négatives) deviennent plus négatives. Les tendances des minimums a_{n1}^{-} ont aussi été calculées à chaque point de grille de la reconstruction (non montrées). Comme dans le cas des maximums, quelques points présentent des tendances significativement différentes de zéro. La tendance généralement positive des décotes annuelles indique donc que leur amplitude augmente avec le temps.

Pour explorer plus avant les causes des tendances des surcotes maximales et des décotes minimales annuelles, les tendances ont aussi été ajustées aux maximums et aux minimums annuels de la pression (p. ex., colonne de droite de la figure 12). Les tendances des décotes sont basées sur l'écart à une valeur de pression déterminée, telle qu'une tendance négative indique une diminution de l'occurrence de systèmes dépressionnaires. On remarquera que la zone de tendance positive des minimums

annuels (panneau inférieur droit de la figure 12) couvre la même zone, avec la même amplitude, que celle de tendance des surcotes maximales (panneau inférieur gauche). Les tendances des maximums de pression (associés à des anticyclones) sont positives, ce qui indique une augmentation des systèmes de haute pression. Les tendances des décotes minimales sont significatives et elles aussi sont positives sur la même zone (non montrées). Il s'ensuit que les tendances des niveaux tant maximums que minimums du niveau de la mer non seulement sont présentes dans les champs de pression, mais aussi qu'elles affichent les mêmes signaux temporels et spatiaux. Il apparaît donc que les tendances des surcotes et décotes sont régies surtout par les changements des champs de pression. Plus précisément, il est probable que ce soit une tendance à des anticyclones plus forts et à des dépressions moins intenses qui induise les tendances des surcotes maximales et des décotes minimales.

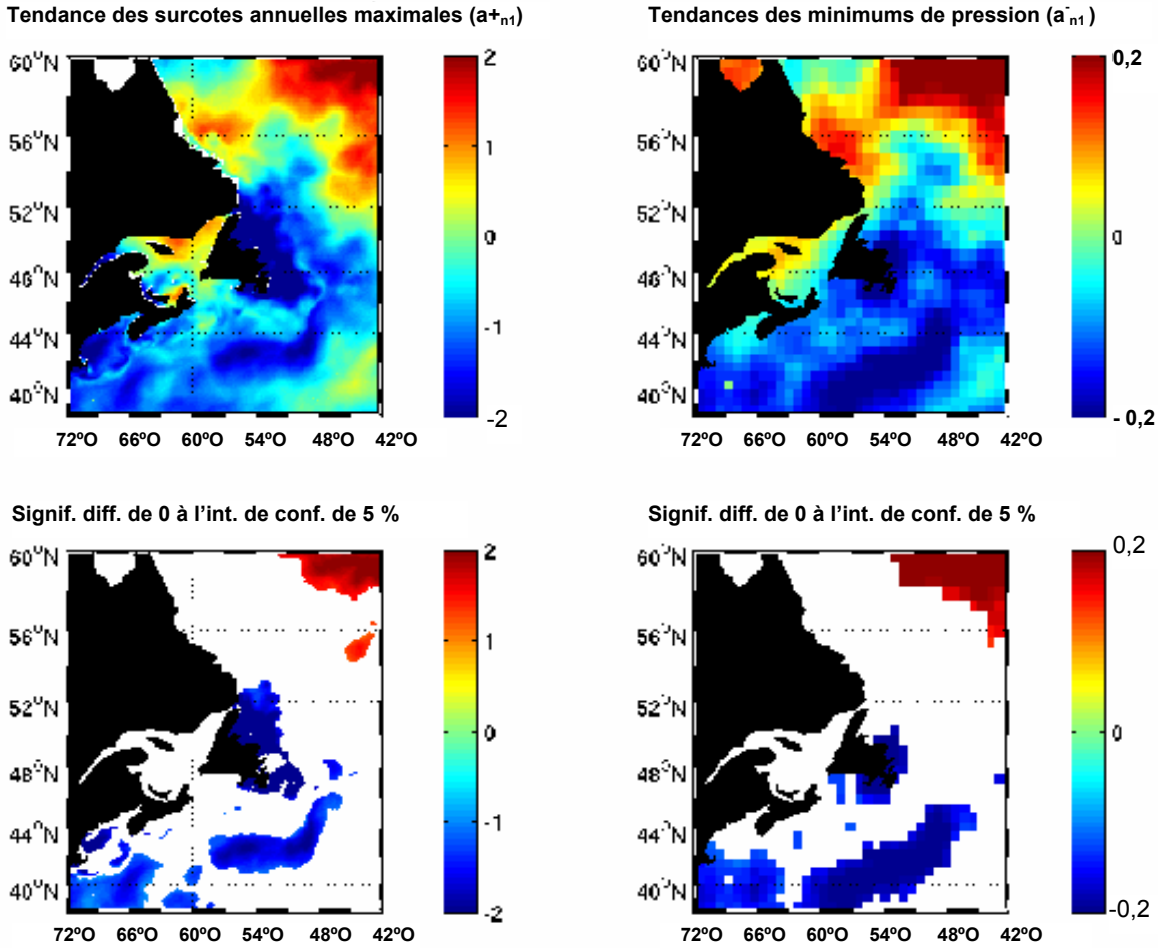


Figure 12. Tendances des valeurs reconstruites des surcotes annuelles maximales et des minimums annuels de la pression. La barre donne les couleurs correspondant aux tendances des paramètres d'emplacement (en mm/an pour la colonne de gauche et en mb/an pour la colonne de droite), des valeurs négatives indiquant que les extrêmes deviennent moins extrêmes. Les panneaux de gauche représentent les tendances des surcotes reconstruites, le panneau du bas ne montrant que les tendances qui sont significativement différentes de 0 au niveau de signification de 5 %. Les panneaux de droite donnent les mêmes informations, mais pour les

tendances des minimums annuels de pression (qui induisent les surcotes par « effet de baromètre inverse »). On remarquera que la variabilité spatiale des tendances des surcotes correspond à celle des minimums de pression. À noter aussi que les plages des tendances sont comparables, surtout négatives et significatives sur les mêmes régions. La différence d'un facteur de 10 entre les deux colonnes est due à l'effet de baromètre inverse.

4.3.6 Analyse des tendances et des extrêmes des niveaux d'eau totaux

Les enregistrements des observations horaires du niveau de la mer pour les 24 sites ont été soumis avant l'analyse à un soigneux contrôle de la qualité, avec inspection visuelle de toutes les grosses valeurs enregistrées. Tous les enregistrements utilisés dans cette étude comportent un minimum de 10 ans d'observations entre 1960 et 1999. Les moyennes à long terme ont été extraites de tous les enregistrements avant l'analyse.

Les estimations de la fréquence des inondations côtières sont le plus souvent basées sur l'analyse des maximums annuels. On illustre l'application de la théorie pour Charlottetown, un des quelques endroits de la zone à l'étude pour lesquels on dispose d'un long enregistrement d'observations (de 1938 à nos jours) raisonnablement complet. Les maximums et minimums annuels (autour de la moyenne annuelle) ont d'abord été extraits de l'enregistrement (panneau supérieur de la figure 13). On notera la différence dans les variabilités interannuelles des maximums et des minimums, et le décalage entre le niveau moyen de la mer et les extrêmes, qui reflète l'effet des marées à Charlottetown.

Les surcotes maximales et les décotes minimales ont été ordonnancées et pointées sur un papier à échelle de probabilité de type I. Les points indiquent les maximums annuels (panneau inférieur gauche de la figure 13) et les minimums annuels (panneau inférieur droit). Les lignes ont été ajustées à l'aide de la méthode de vraisemblance maximale. Les zones ombrées marquent les intervalles de confiance de 95 % obtenus à l'aide de la méthode delta (p. ex., Coles, 2001). On remarquera la différence de pente entre les droites de niveau de récurrence (p. ex., la différence entre la période de retour de 2 ans et celle de 40 ans) des surcotes et des décotes. Les plus grandes différences de pente entre ces droites se retrouvent aux stations les plus méridionales, où l'on sait que les ouragans entraînent des surcotes extrêmes. D'autres facteurs, comme une augmentation du frottement apparent sur le fond marin associée à une baisse de la profondeur d'eau pendant les épisodes de forte décote, peuvent limiter l'amplitude des surcotes/décotes (p. ex., Grant et Madsen, 1979) et mener à des surcotes plus grandes que les décotes.

Les maximums annuels par rapport à la moyenne annuelle correspondante pour Charlottetown sont également présentés à la figure 13. La tendance linéaire du paramètre d'emplacement, basée sur les maximums annuels de 1960-1999, est de -2,0 mm/an. Les tendances linéaires dans le paramètre d'emplacement de la distribution extrémale de type I, calculées pour toutes les autres stations, révèlent que seulement une station présente une tendance significativement différente de 0. Il faut cependant noter que 18 des 24 stations présentent des tendances négatives, avec un taux médian de -1,8 mm/an. Cet état de choses donne à penser que, pour cette zone, il y a eu une baisse légère, mais de grande étendue spatiale, des surcotes pendant la période de 1960 à 1999.

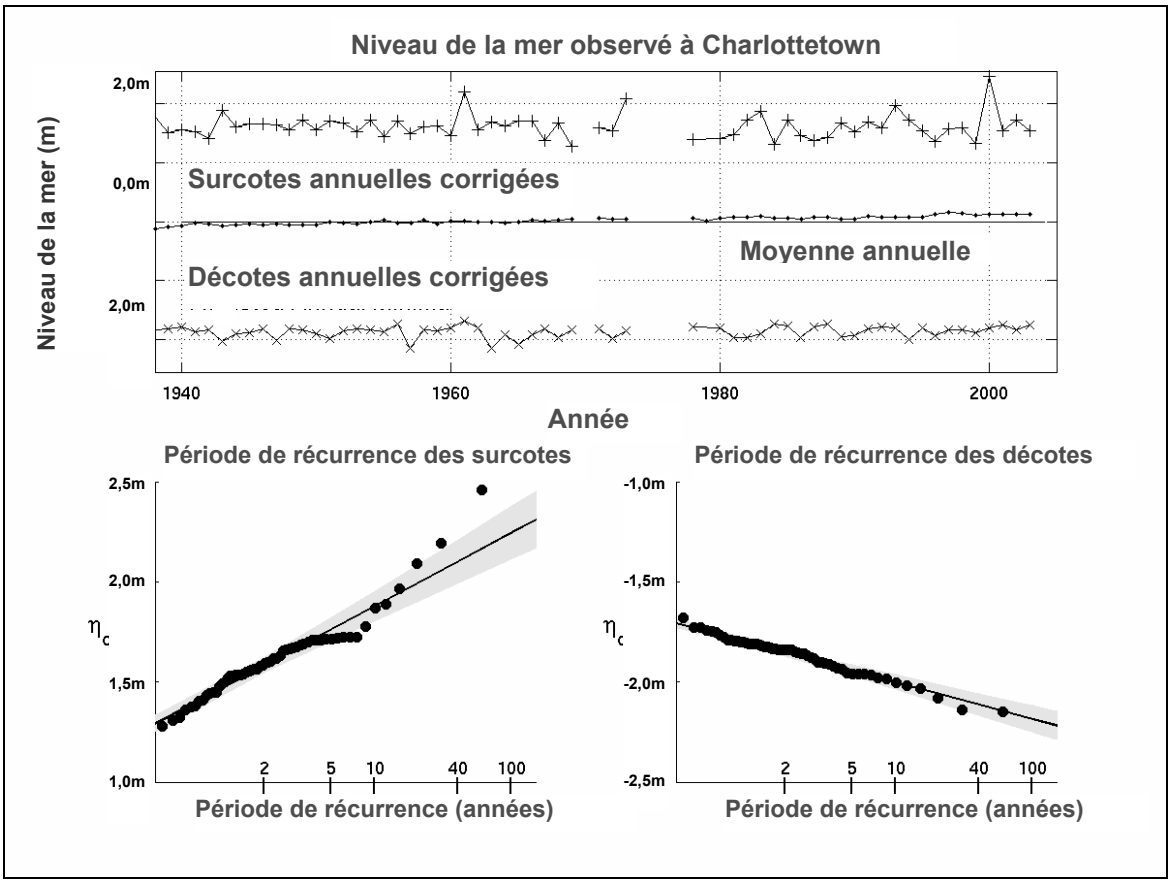


Figure 13. Niveau de la mer observé à Charlottetown. Le panneau du haut montre la moyenne annuelle par rapport à la moyenne à long terme, en mètres. On notera la tendance des moyennes annuelles. Les surcotes et les décotes annuelles corrigées sont aussi pointées sur le graphique. La différence moyenne entre les moyennes et les maximums et minimums est due en grande partie aux marées. Les deux panneaux du bas sont des pointages de type I des surcotes et des décotes par rapport aux moyennes annuelles. Les axes des x donnent la période de récurrence, en années, et les axes des y les niveaux de récurrence, en mètres. Les points indiquent les valeurs observées et ordonnancées des surcotes (en bas à gauche) et des décotes (en bas à droite) annuelles, de 1938 à 2004.

Les minimums annuels par rapport à la moyenne annuelle correspondante pour Charlottetown sont également présentés à la figure 13. La tendance linéaire du paramètre d'emplacement, basée sur les maximums annuels de 1960-1999, est de 0,7 mm/an. Elle n'est pas significativement différente de zéro au niveau de signification de 5 %. Une analyse semblable effectuée pour les autres stations révèle que seulement deux stations présentent une tendance significativement différente de zéro, avec un taux médian de –0,9 mm/an.

Les tendances des paramètres d'emplacement pour les maximums et les minimums annuels corrigés montrent des configurations spatiales quelque peu semblables, mais diffèrent de celles trouvées pour les surcotes maximales et les décotes minimales. Ces différences ne surprennent pas. Une des raisons en est que la simultanéité des surcotes maximales et des décotes minimales annuelles avec les marées est telle que ce sont

rarement les plus grosses ondes de tempête qui entraînent des niveaux marins totaux extrêmes. Ce sont plutôt les ondes moyennes à fortes survenant à marée haute ou presque qui le font. La modulation du cycle des marées peut aussi influer considérablement sur l'amplitude des niveaux marins extrêmes. C'est près du détroit de Northumberland que ce signal est le plus faible et le moins visible, les marées dominantes y étant diurnes et non semi-diurnes.

4.3.6.1 Tendances et extrêmes d'endroits de la reconstruction sur 40 ans

Une sérieuse limite de la théorie extrémale standard est qu'elle exige de disposer d'enregistrements horaires du niveau de la mer dépassant une trentaine d'années. Or, c'est malheureusement rarement le cas (tableau 1). Pour le Canada atlantique, il n'existe que peu de ces enregistrements. Pour le golfe du Saint-Laurent, région régulièrement troublée par de forts épisodes d'inondation, il n'en existe qu'un. Un autre problème est que la distribution tant des marées que des ondes de tempête varie considérablement sur la région. Connaître la distribution des extrêmes à un endroit ne fournit donc pas une bonne estimation de la distribution des extrêmes ailleurs. La solution que nous avons trouvée consiste à utiliser un modèle validé des ondes de tempête afin de reconstituer de longs enregistrements pour les régions pauvres en données. La période de récurrence des niveaux marins extrêmes saisonniers est alors calculée à partir des maximums saisonniers de ces enregistrements reconstruits.

L'idée de base sous-jacente à notre approche est simple : ajouter la reconstruction pluridécennale des ondes de tempête aux prévisions de marée pour la période de reconstruction (calculée à partir des constantes de marée de l'enregistrement court) et soumettre l'enregistrement de niveau de la mer total reconstruit à une analyse extrémale standard basée sur ses maximums annuels. Nous tenons à rappeler que l'objectif n'est pas ici de modéliser l'occurrence exacte d'un extrême donné; nous nous concentrons plutôt sur notre capacité de reproduire la distribution des maximums annuels et donc la période de récurrence de niveaux marins extrêmes.

Tableau 1. Description des marégraphes dont les données ont été utilisées pour l'étude. Les colonnes indiquent : (i) le nom de la station, (ii) son code, (iii) sa latitude, en degrés, (iv) sa longitude, en degrés, (v) les années de fonctionnement et (vi) la couverture (pourcentage de l'enregistrement contenant des observations).

Nom de la station	Code	Lat.	Long.	Enregistrement	Couverture
Woods Hole –RI	1	41,52	70,67	1958 -	91,98
Île Nantucket – RI	2	41,29	70,10	1965 -	96,39
Boston – MA	3	42,36	71,05	1921 -	99,11
Portland – ME	4	43,66	70,25	1910 -	97,23
Bar Harbor – ME	5	44,39	58,21	1950 -	91,05
Saint John – N.-B.	6	45,25	66,06	1896 -	77,13
Yarmouth – N.-É.	7	43,84	66,12	1900 -	34,87
Halifax – N.-É.	8	44,66	63,58	1898 -	78,56
Point Tupper – N.-É.	9	45,60	61,37	1971 – 1992	81,82
North Sydney – N.-É.	10	46,22	60,25	1970 -	96,62
Pictou – N.-É.	11	45,68	62,70	1957 – 1996	29,52
Charlottetown – Î.-P.-É.	12	46,23	63,11	1911 -	80,32
Rustico – Î.-P.-É.	13	46,47	63,58	1972 – 1996	84,55
Baie de Shediac – N.-B.	14	46,23	64,55	1971 -	56,27

Nom de la station	Code	Lat.	Long.	Enregistrement	Couverture
Bas Escuminac – N.-B.	15	47,08	64,88	1963 -	70,02
Rivière-au-Renard – Qc	16	49,00	64,38	1969 -	87,49
Sainte-Anne-des-Monts – Qc	17	49,13	66,48	1967 -	80,73
Pointe-au-Père – Qc	18	48,52	68,47	1897 – 1989	74,80
Sept-Îles – Qc	19	50,22	66,40	1972 -	85,67
Baie-Comeau – Qc	20	49,23	68,13	1962 – 1991	71,27
Harrington Harbour – Qc	21	50,50	59,48	1939 – 1989	58,57
Port-aux-Basques – (T.-N.)	22	47,57	59,13	1935 -	62,29
Argentia – (T.-N.)	23	47,30	53,98	1971 -	91,65
St. John's – (T.-N.)	24	47,57	52,72	1935 -	69,20

L'objectif de la présente étude n'est pas de faire une reconstruction d'ondes de tempête particulières; il s'agit d'estimer les probabilités d'inondation à certains moments de l'année. Voici, par exemple, la démarche que nous avons suivie pour le calcul des périodes de récurrence saisonnières pour un endroit donné avec seulement 5 ans de données :

- Étape 1 : les marées, η_T , sont prévues pour 4 ans à l'aide d'un ensemble de marées (p. ex., Pawlowicz *et al.*, 2002) basé sur les constantes de marées ajustées à la cinquième année des observations.

- Étape 2 : les niveaux marins observés, pour les 4 ans non utilisés dans l'analyse des marées, sont écrits sous la forme $\eta = \eta_T + \eta_S + \eta_R^{'}$, où η est le niveau de la mer observé, η_S l'onde reconstruite et $\eta_R^{'}$ une erreur de reconstruction qui inclut les effets des seiches et les effets barocliniques non rendus par le modèle d'ondes de tempête, ainsi que les erreurs de la prévision de marées à partir des données d'une autre année.

- Étape 3 : les valeurs $\eta_R^{'}$ peuvent être stockées par époque de l'année pour refléter la saisonnalité dans la distribution de $\eta_R^{'}$ lorsqu'on reconstruit des enregistrements saisonniers plutôt qu'annuels. Nous avons utilisé deux groupes saisonniers dans cette étude : printemps-été et automne-hiver.

- Étape 4 : nous prédisons les marées sur 40 ans en utilisant les constantes auparavant ajustées à une année d'observations. (À noter que l'ensemble de marées de Pawlowicz *et al.*, 2002 n'offre pas la possibilité de prendre en compte la modulation nodale de 18,6 années. Nous avons vérifié qu'elle se retrouvait dans les marées prévues.) Nous ajoutons alors, pour la saison concernée, l'enregistrement prévu sur 40 ans des marées, la reconstruction des ondes et un enregistrement synthétique $\eta_R^{'}$ obtenu par échantillonnage aléatoire avec remplacement à partir de l'enregistrement regroupé $\eta_R^{'}$ (voir les détails dans Bernier, 2005, et dans Bernier et Thompson, 2006). Pour tenir compte de la variabilité d'échantillonnage, on génère dix réalisations, toutes de 40 saisons.

- Étape 5 : on utilise la médiane des maximums saisonniers des dix réalisations dans l'analyse extrémale standard.

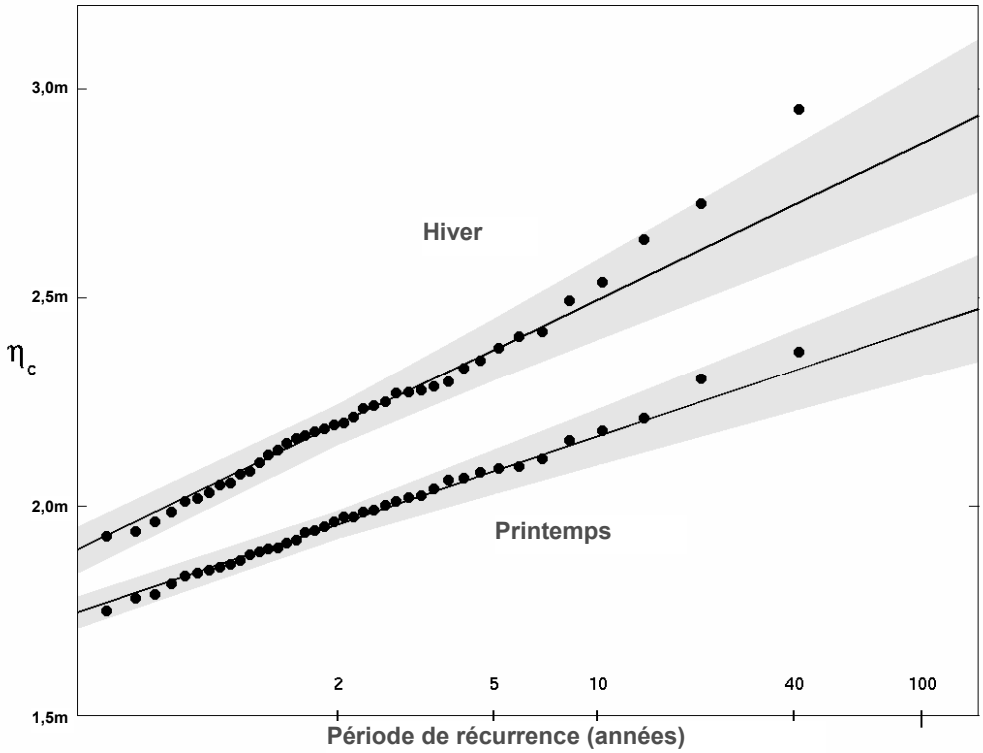


Figure 14. Période de récurrence saisonnière des niveaux marins totaux extrêmes à Pointe-du-Chêne, calculés dans les conditions actuelles à l'aide des enregistrements saisonniers reconstruits. L'axe des x est la période de récurrence des maximums saisonniers, en années. L'axe des y est le niveau de récurrence saisonnier, en mètres. À noter les différences à la fois dans le point d'origine et dans la pente des droites de niveaux de récurrence entre la période hivernale (janvier à mars), où il y a plus de tempêtes, et la période de printemps (avril à juin), plus tranquille.

L'analyse extrémale des maximums saisonniers reconstruits est présentée à la figure 14 pour les périodes de récurrence en hiver et au printemps à Pointe-du-Chêne (figure 7, station 14). Il y a un décalage entre l'hiver, caractérisé par des tempêtes, et le printemps, plus calme, pour ce qui est du point d'origine et de la pente des deux droites. Les deux sont surtout dus à ce que l'activité cyclonique est plus faible au printemps (p. ex., Koutitonsky et Budgen, 1991), ce qui entraîne des valeurs plus faibles à la fois pour a_n (tempêtes généralement moins intenses) et b_n (plus basse variabilité dans la distribution des ondes de tempête à cette époque de l'année).

La capacité de notre approche à estimer les périodes de récurrence annuelles et saisonnières à tous les endroits a été évaluée en comparant les niveaux de récurrence

reconstruits aux niveaux observés. Les résultats ont montré une bonne concordance entre les niveaux marins annuels et saisonniers reconstruits. Comme prévu, les niveaux de récurrence les plus élevés (pour une période de récurrence donnée) concernent les stations à grande amplitude de marée (p. ex., Saint John, dans la baie de Fundy, au Nouveau-Brunswick). C'est ce qu'illustre la figure 15, où les amplitudes de marée maximales observées sont pointées en regard du niveau de récurrence sur 40 ans des niveaux marins observés pour chaque station (tableau 2). La grande différence dans la structure spatiale des niveaux marins totaux extrêmes n'est pas due seulement à des différences dans l'amplitude des ondes de tempête; elle tient surtout aux grandes différences spatiales des amplitudes de marée. La figure 15 montre aussi que la marée seule n'est pas une bonne approximation des niveaux de récurrence des niveaux marins totaux extrêmes. À des périodes de retour de 40 ans, la marée maximale observée est généralement à plus de 0,5 m sous la ligne du niveau de récurrence. À mesure que la période de récurrence augmente, l'amplitude de marée maximale reste la même et, progressivement, constitue une estimation de plus en plus mauvaise du niveau de récurrence des niveaux marins totaux extrêmes. En général, les niveaux de récurrence annuels sur 40 ans basés sur les enregistrements reconstruits sont à moins d'une dizaine de centimètres des niveaux de récurrence annuels observés (tableau 2). Les niveaux de récurrence saisonniers sur 40 ans reconstruits montrent la même variabilité de station à station que les niveaux de récurrence saisonniers observés. On peut donc générer des extrêmes annuels et saisonniers avec des enregistrements de seulement 5 ans et notre reconstruction des ondes de tempête sur 40 ans.

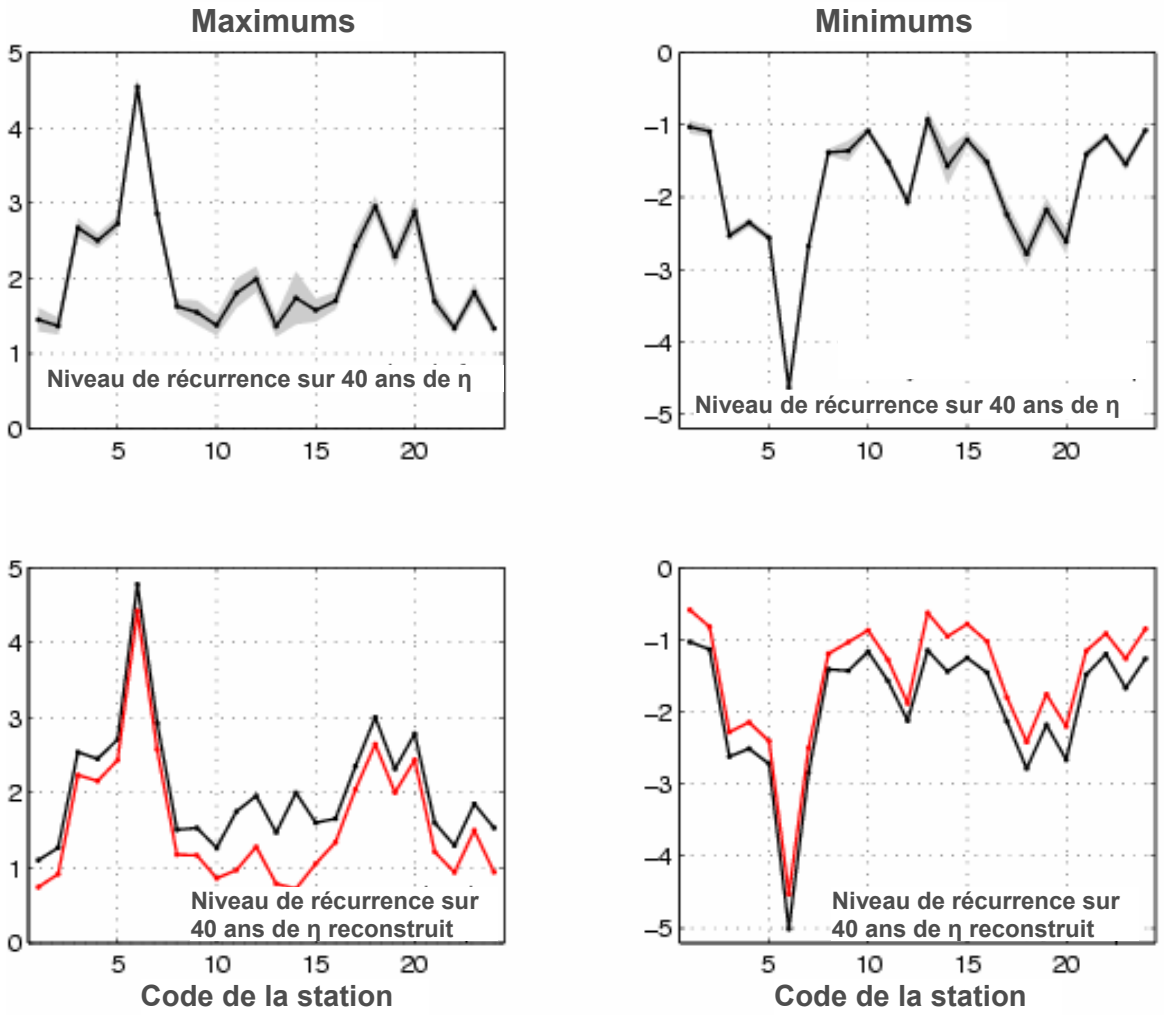


Figure 15. Niveau de récurrence sur 40 ans des niveaux marins totaux, positifs et négatifs. L'axe des x indique le code de la station. L'axe des y est le niveau de récurrence sur 40 ans, en mètres, calculé à partir de la distribution de type I ajustée aux maximums (à gauche) et aux minimums (à droite) corrigés montrés à la figure 9. Les zones ombrées marquent l'intervalle de confiance de 95 % à des périodes de récurrence de 40 ans. Le panneau supérieur gauche montre les niveaux de récurrence positifs observés, et le panneau inférieur gauche les niveaux positifs sur 40 ans reconstruits (en noir) obtenus à l'aide de 5 années d'observations horaires du niveau de la mer, de la reconstruction sur 40 ans et de la plus forte marée enregistrée (en rouge). Le panneau supérieur droit montre le niveau de récurrence de 40 ans des niveaux marins totaux négatifs. Le panneau inférieur droit représente les niveaux de récurrence de 40 ans négatifs reconstruits (en noir; également obtenus à partir de seulement 5 ans d'observations horaires du niveau de la mer) et de la plus forte marée enregistrée (en rouge). À noter que les panneaux du bas présentent la même variabilité de station à station que ceux du haut, ce qui montre qu'il suffit de 5 ans de données et de la reconstruction des ondes de tempête pour obtenir des niveaux de récurrence de 40 ans qui sont raisonnables.

Tableau 2. Niveaux de récurrence observés et reconstruits sur 40 ans aux 24 stations marégraphiques. Les colonnes indiquent : (i) le nom de la station, (ii) son code, (iii) le niveau de récurrence positif observé sur 40 ans (en mètres), le signe ± indiquant l'intervalle de confiance de 95 %, (iv) le niveau de récurrence positif reconstruit sur 40 ans basé sur la reconstruction de 40 ans et 5 années de données, (v) le niveau de récurrence négatif observé sur 40 ans (en mètres), le signe ± indiquant l'intervalle de confiance de 95 %, (vi) le niveau de récurrence négatif reconstruit sur 40 ans basé sur la reconstruction de 40 ans et 5 années de données.

Nom de la station	Code	Maximums observés	Maximums reconstruits	Minimums observés	Minimums reconstruits
Woods Hole	1	1,45±0,16	1,10	-1,02±0,09	-1,03
Île de Nantucket	2	1,36±0,11	1,25	-1,09±0,07	-1,14
Boston	3	2,67±0,13	2,53	-2,53±0,07	-2,62
Portland	4	2,50±0,10	2,45	-2,35±0,06	-2,51
Bar Harbor	5	2,73±0,10	2,72	-2,56±0,05	-2,72
Saint John	6	4,55±0,11	4,78	-4,64±0,08	-5,00
Yarmouth	7	2,86±0,10	2,93	-2,68±0,07	-2,84
Halifax	8	1,63±0,09	1,52	-1,38±0,05	-1,41
Point Tupper	9	1,54±0,16	1,53	-1,36±0,14	-1,43
North Sydney	10	1,37±0,13	1,27	-1,08±0,06	-1,17
Pictou	11	1,80±0,20	1,76	-1,51±0,08	-1,57
Charlottetown	12	1,99±0,17	1,92	-2,07±0,08	-2,12
Rustico	13	1,36±0,14	1,47	-0,92±0,12	-1,15
Baie de Shediac	14	1,74±0,35	1,91	-1,57±0,25	-1,45
Bas Excuminac	15	1,57±0,15	1,55	-1,20±0,09	-1,26
Rivière-au-Renard	16	1,70±0,11	1,65	-1,51±0,12	-1,46
Sainte-Anne-des-Monts	17	2,43±0,18	2,35	-2,24±0,16	-2,13
Pointe-au-Père	18	2,96±0,13	3,01	-2,79±0,17	-2,79
Sept-îles	19	2,29±0,14	2,30	-2,17±0,16	-2,18
Baie-Comeau	20	2,89±0,18	2,77	-2,61±0,17	-2,66
Harrington Harbour	21	1,69±0,13	1,61	-1,40±0,07	-1,49
Port-aux-Basques	22	1,33±0,08	1,28	-1,16±0,06	-1,20
Argentia	23	1,81±0,12	1,87	-1,54±0,08	-1,67
St. John's	24	1,33±0,08	1,55	-1,07±0,06	-1,26

4.3.6.2 Extrêmes dans des scénarios réalistes de changement climatique

Cette section examine rapidement comment le changement climatique peut modifier la période de récurrence de niveaux marins extrêmes. Les niveaux de récurrence présentés jusqu'ici sont basés sur une reconstruction pour une période d'observation fixe. Il est possible d'élargir l'approche en incluant certains éléments de changement climatique. Par exemple, il est relativement facile d'en arriver approximativement à l'effet de l'élévation du niveau de la mer en ajoutant simplement une hauteur constante aux niveaux de récurrence, comme on l'a fait dans la section précédente. Cependant, dans la région qui nous intéresse, il n'est pas possible d'ajouter un taux uniforme dans l'espace d'élévation du niveau de la mer, l'effet des mouvements verticaux de la croûte terrestre étant variable dans l'espace (Peltier, 2004) et du même ordre de grandeur que le taux généralement accepté d'élévation du niveau de la mer à l'échelle planétaire, soit 1-2 mm/an (Church *et al.*, 2001 [rapport du GIEC]). Les taux d'élévation du niveau de la mer doivent donc être dépendants de la station. À Pointe-du-Chêne, proche de l'emplacement du MAN, le niveau relatif de la mer devrait avoir monté de 0,8 m d'ici

2100, alors que l'élévation serait de 0,7 m à Halifax. Pour ce qui est des changements de l'activité cyclonique, il semble y avoir consensus sur une augmentation du nombre d'épisodes de vents forts associés à une augmentation du nombre de dépressions profondes, bien qu'on s'attende à ce que le nombre global de dépressions baisse (p. ex., Lambert, 2004). Les impacts de l'élévation du niveau de la mer et de l'augmentation de l'activité cyclonique sur la période de récurrence des niveaux marins extrêmes sont examinés par la suite.

Trois scénarios de changement climatique sont envisagés. Ce sont des scénarios illustratifs plus que définitifs, qui se concentrent sur les extrêmes annuels plutôt que saisonniers. Nous nous concentrons également sur Halifax, grosse ville de la côte est du Canada pour laquelle on dispose d'un long enregistrement du niveau de la mer. Il est facile d'élargir la méthode à d'autres endroits et des extrêmes annuels à saisonniers.

Aux fins de cet exercice, on présume que les différentiels filtrés à Halifax entre 1960 et 1999 représentent les conditions actuelles; ils sont notés par $\eta_{prés}$. Ainsi, l'enregistrement du niveau de la mer observé à Halifax est donné exactement par $\eta = \eta_T + \eta_{prés} + \eta_R^{'}$, où $\eta_R^{'}$ inclut, comme précédemment, les effets de seiche et de baroclinicité. On postule en outre que l'impact du changement climatique peut être exprimé simplement par une transformation mathématique de $\eta_{prés}$. La valeur $\eta_{prés}$ transformée sera désignée par $\eta_{c\lim}$, les différentiels modifiés par le climat.

4.3.6.2.1 Scénario 1

On présume que les conditions atmosphériques, c.-à-d. le forçage des vents et de la pression, restent les mêmes à mesure qu'on avance dans le siècle. On présume aussi que le niveau de la mer à Halifax, la station représentative, aura monté de 0,7 m d'ici 2100. Cette élévation est superposée sur les différentiels actuels $\eta_{prés}$ pour obtenir $\eta_{c\lim}$, soit les différentiels modifiés par le climat. L'effet sur les différentiels est illustré au panneau de gauche de la figure 16. La ligne noire représente $\eta_{prés}$ pointée par rapport à elle-même comme référence. La ligne bleue représente $\eta_{c\lim} = 0.7 + \eta_{prés}$, donc les différentiels actuels plus l'élévation du niveau de la mer pointés en fonction de $\eta_{prés}$. En termes de la fonction de densité de probabilité (ou de même de l'histogramme), appliquer l'élévation du niveau de la mer décale la fonction de densité de probabilité de $\eta_{c\lim}$ vers la droite de 0,7 m (non montré).

Le décalage de la fonction de densité de probabilité fait monter les maximums annuels de 0,7 m (et aussi a_n, le paramètre d'emplacement de la distribution de type I ajusté aux maximums annuels), ce qu'illustre le pointage de type I (panneau droit de la figure 16). Le graphique est obtenu en ajustant une ligne dans les maximums annuels ordonnancés de $\eta = \eta_T + \eta_{prés} + \eta_R^{'}$ (trait noir) et $\eta = \eta_T + \eta_{c\lim} + \eta_R^{'}$ (trait bleu). Le pointage de la période de récurrence montre que l'impact de l'élévation du niveau de la mer est si important que des niveaux extrêmes qui ont actuellement une période de récurrence de 100 ans pourraient devenir des phénomènes courants d'ici 2100.

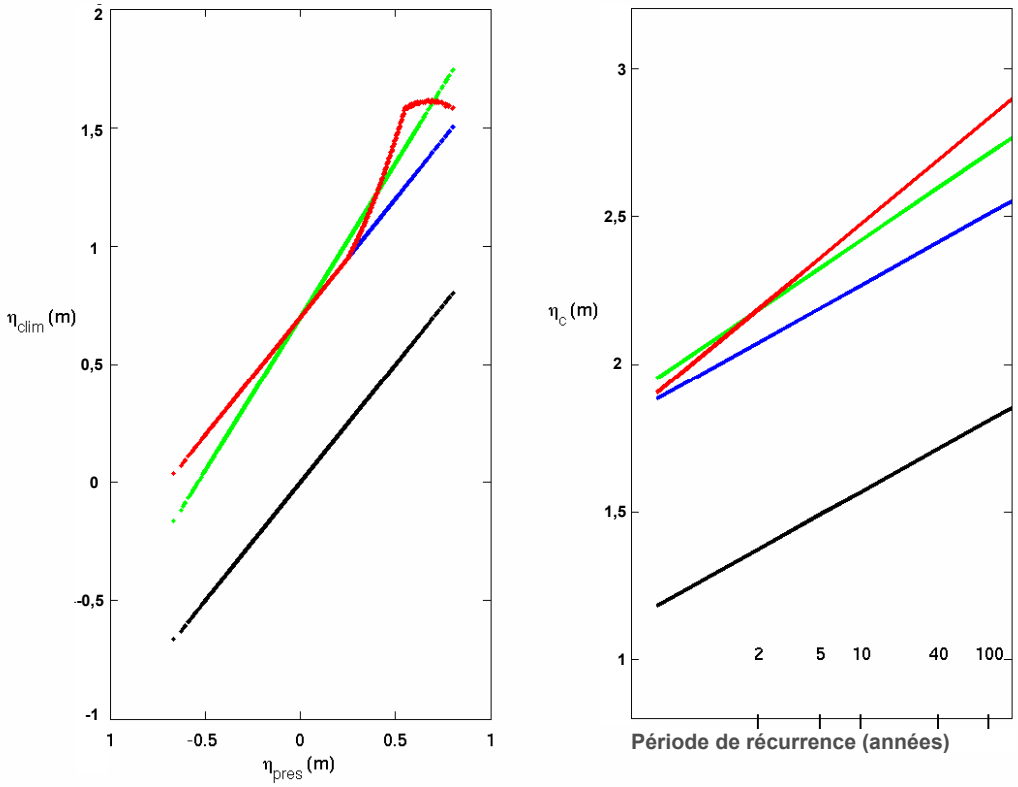


Figure 16. Période de récurrence de niveaux marins totaux extrêmes dans le prochain siècle pour Halifax. Le panneau de gauche montre les différentiels modifiés par le climat, $\eta_{c\lim}$, par rapport aux différentiels actuels, $\eta_{prés}$. $\eta_{prés}$ est pointée par rapport à elle-même en noir comme référence. Les surcotes/décotes dues à l'élévation du niveau de la mer (ligne bleue) et aux effets combinés de l'élévation du niveau de la mer et des changements de l'activité cyclonique (ligne verte et ligne bleue) sont aussi pointées. Le panneau de droite représente les niveaux marins totaux extrêmes associés à chaque scénario de changement climatique. Chaque ligne est basée sur une analyse extrémale des maximums annuels de niveaux marins totaux modifiés par chaque climat, $\eta = \eta_T + \eta_{c\lim} + \eta_R^{'}$. Les niveaux de récurrence sont présentés pour (i) les conditions actuelles (ligne noire), (ii) l'élévation du niveau de la mer (ligne bleue), (iii) l'élévation du niveau de la mer et une augmentation linéaire des amplitudes des différentiels (ligne verte), et (iv) l'élévation du niveau de la mer et un accroissement de l'amplitude des ondes de milieu de plage (ligne rouge).

4.3.6.2.2 Scénario 2

On postule que, combiné à l'élévation du niveau de la mer, l'accroissement de l'activité cyclonique entraînera une augmentation linéaire des différentiels modifiés par le climat. Donc, $\eta_{c\lim} = 0.7 + \alpha\eta_{prés}$, où α est un facteur de mise à l'échelle choisi arbitrairement (on a pris ici $\alpha = 1{,}3$). Les différentiels ainsi modifiés par le climat sont alors pointés en fonction de $\eta_{prés}$ (en vert) sur le panneau de gauche de la figure 16. L'augmentation

linéaire de l'intensité des ondes s'est décalée et a étiré la fonction de densité de probabilité de $\eta_{prés}$.

Le paramètre d'emplacement α_n se trouve augmenté par l'inflation des maximums annuels. Le paramètre de forme b_n, une mesure de l'étalement, augmente aussi. Le pointage des périodes de récurrence des maximums annuels ordonnancés de $\eta = \eta_T + \eta_{c\lim} + \eta_R^{'}$ est présenté en vert sur le panneau de droite de la figure 16. L'incidence de l'augmentation linéaire de l'amplitude des ondes sur la période de récurrence est double : la ligne des niveaux de récurrence monte et sa pente s'accentue. L'effet général est une réduction supplémentaire des périodes de récurrence des niveaux marins totaux extrêmes.

4.3.6.2.3 Scénario 3

On postule que, en combinaison avec l'élévation du niveau de la mer, les dépressions faibles auront tendance à se creuser davantage, alors que les dépressions intenses resteront relativement sans changement. L'effet sur l'amplitude des ondes est présumé être le suivant : les différentiels de moyenne amplitude sont accrus, alors que les plus importants restent tels quels. C'est ce qu'illustre le panneau de gauche de la figure 16 (ligne rouge). L'effet de la mise à l'échelle triangulaire choisie est de gonfler la fonction de densité de probabilité aux amplitudes moyennes (c.-à-d. dans la queue positive de la distribution) tout en gardant la plage constante.

L'impact de l'augmentation des ondes de mi-amplitude semble plus important que celui d'une augmentation linéaire de l'amplitude des ondes (comparez la ligne rouge et la ligne verte du panneau de la figure 16). Ce résultat rappelle que ce sont rarement les surcotes les plus extrêmes qui entraînent les maximums annuels. Les niveaux marins extrêmes sont en fait généralement dus à la simultanéité d'une surcote importante (mais pas inhabituelle) et d'une marée haute.

Les résultats présentés à la figure 16 donnent à penser que, sur le prochain siècle, l'accroissement du risque d'inondation sera surtout lié à l'élévation du niveau de la mer (en supposant que cette élévation soit comparable à ce à quoi on s'attend pour Halifax). L'étude de sensibilité simple présentée ici montre aussi qu'il ne faut pas négliger les changements de l'activité cyclonique quand on prévoit le risque d'inondation pour le prochain siècle.

4.3.7 Affichage sur le Web

Les données horaires du niveau de la mer à Pointe-du-Chêne, Wood Islands et 12 autres stations marégraphiques du Canada atlantique sont envoyées chaque jour à Dalhousie par le SDMM. Elles font l'objet d'un contrôle des erreurs, puis sont traitées et affichées sur le Web avec les prévisions issues du modèle des ondes de tempêtes. On peut voir ces résultats à l'adresse http://www.cmep.ca/. Il faut cliquer sur « Shelf », puis sur « Flooding Forecasts ». On peut ensuite choisir une station et une période à l'aide d'une carte interactive (figure 17).

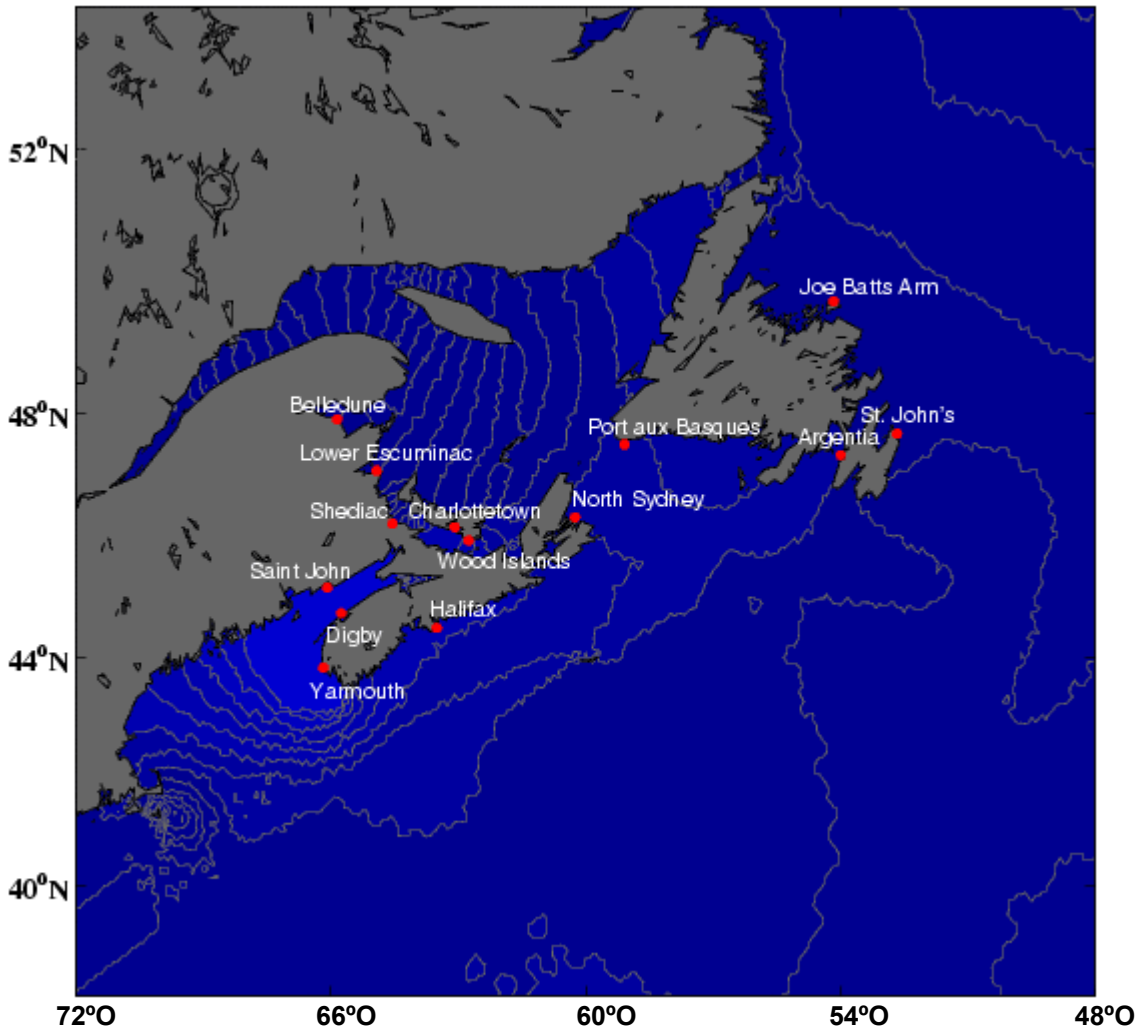


Figure 17. Carte tirée de l'affichage Web en temps quasi réel des données des stations marégraphiques et des prévisions d'ondes de tempête, pour le Canada atlantique. La carte indique l'emplacement des marégraphes. Après avoir cliqué sur un point rouge, on doit spécifier la période d'intérêt, ce qui fait afficher les pointages de séries chronologiques (semblables à la figure 3). Il est à noter que le marégraphe de Shediac est situé à Pointe-du-Chêne.

Les mises à niveau suivantes ont été apportées au site Web pendant la durée du projet :

- Le format des pointages de séries chronologiques a été amélioré par l'ajout de lignes horizontales qui facilitent la comparaison avec des niveaux d'inondation spécifiés. Nous avons aussi automatisé le choix de position optimale du tracé pour les légendes. On règle ainsi le problème de superposition identifié.

- Un album de photos montre maintenant les sites des marégraphes et les séquelles d'importantes inondations (cliquez sur « Images »).

- On a ajouté des archives d'animation sur les ondes de tempête passées. C'est un outil intéressant pour ceux qui ont besoin d'un sommaire graphique des ondes de tempête.

On a aussi ajouté un zoom des prévisions d'inondations dans le sud du golfe du Saint-Laurent.

En plus des tracés des séries chronologiques des niveaux marins horaires, et de la comparaison avec les prévisions pour une journée, on peut voir des « films » de la distribution du niveau de la mer au Canada atlantique pour les deux jours à venir. Il faut pour cela cliquer sur « Movies of Atlantic Canada » dans le menu de gauche. On a alors trois choix : Tide (marée prévue basée sur les éléments marées de WebTide, aimablement fournis par Charles Hannah, de l'Institut océanographique de Bedford); Storm Surge (prévisions issues du modèle d'ondes de tempête de Dalhousie); Total Sea Level (somme de la marée et de l'onde de tempête).

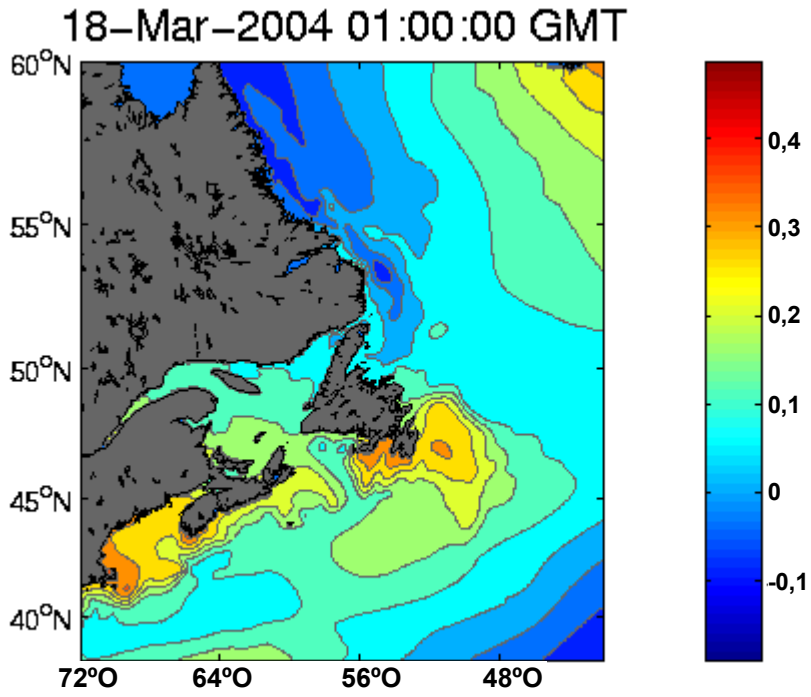


Figure 18. Instantané de la prévision d'onde de tempête pour le 18 mars 2004. Les hauteurs sont en mètres (comme l'indique la barre de droite).

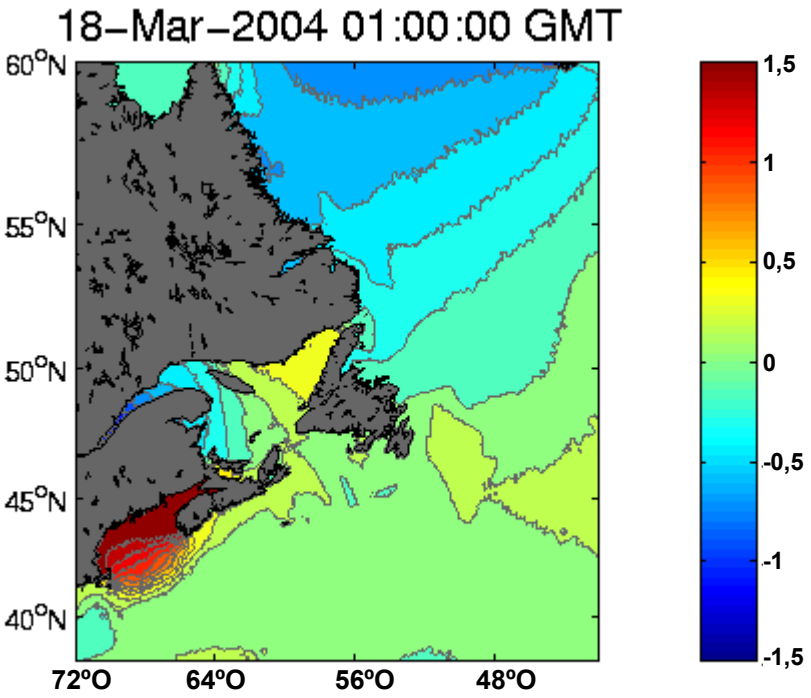


Figure 19. Identique à la figure 18, mais pour le niveau d'eau total (onde et marée combinées). Notez la différence d'échelle.

4.3.8 Mise à l'échelle des municipalités du risque d'inondation

Cette section décrit comment nous ramenons les statistiques d'inondation au niveau des municipalités (c.-à-d., ramener les résultats de l'analyse extrémale à une résolution horizontale de l'ordre des mètres). Il faut donc calculer des statistiques des extrêmes qui soient propres à l'endroit et au moment, ce qui est une information essentielle pour élaborer des stratégies judicieuses d'adaptation en réponse au changement climatique.

Dans cette section, on utilise un MAN pour la région de la baie de Shediac qui couvre une importante aire de nidification du Pluvier siffleur (panneau supérieur de la figure 20) pour effectuer une réduction d'échelle de la période de récurrence des niveaux marins sur la saison de nidification (printemps). Le Pluvier siffleur est une espèce en péril, qu'on trouve sur les rivages du détroit de Northumberland, aux Îles-de-la-Madeleine et sur certaines plages de la Nouvelle-Écosse, de l'Île-du-Prince-Édouard et de Terre-Neuve. En 2001, on ne comptait plus qu'environ 220 couples de pluviers et 43 individus seuls (source : Environnement Canada – espèces en péril http://www.speciesatrisk.gc.ca/). Les pluviers siffleurs commencent à arriver sur les aires de nidification du Canada atlantique à la fin d'avril. On considère que, outre les prédateurs et les perturbations par l'homme, la perte d'habitat due aux ondes de tempête et à l'élévation du niveau de la mer est une menace pour l'espèce. On utilise donc le MAN d'une importante aire de nidification du Pluvier siffleur (panneau supérieur de la figure 20) pour effectuer une réduction d'échelle de la période de récurrence des niveaux marins sur la saison de nidification (printemps).

Les périodes de récurrence pour l'hiver sont aussi ramenées à cette échelle à des fins de comparaison.

L'approche consiste à inonder le MAN jusqu'à un niveau donné (η_c), ou des périodes de récurrence équivalentes, pour identifier les zones à risque. Le MAN peut donc être utilisé pour évaluer l'étendue d'un épisode d'inondation prévu ou reconstruit. À remarquer que l'inondation doit être dépendante des voies de communication, p. ex., une petite vallée ne peut être inondée que si les terres qui la séparent de l'océan sont elles aussi inondées. Il faut aussi tenir compte des ponceaux qui peuvent influer sur l'étendue de l'inondation mais ne sont pas détectés par le système utilisé pour réaliser le MAN. À noter également que le MAN est un tant soit peu inondé en ce sens qu'on ne prévoit pas de décalage temporel pour que l'inondation se propage par un ponceau ou que les eaux se retirent d'une région inondée. Il existe des modèles à cet effet, qui pourraient être utilisés dans des études ultérieures.

Les fréquences d'inondation sont obtenues en appliquant une analyse extrémale aux maximums annuels ou saisonniers. Pour Shediac, l'analyse doit être effectuée en utilisant les niveaux marins reconstruits, la station marégraphique de Pointe-du-Chêne n'ayant qu'une médiocre couverture de données. Les périodes de récurrence d'hiver et de printemps sont présentées à la figure 14. Le niveau de la mer auquel chaque point du MAN devient inondé est ensuite associé à une période de récurrence. On obtient ainsi une carte des périodes de récurrence des inondations pour les saisons d'hiver et de printemps (panneaux du milieu et du bas de la figure 20 respectivement). La figure 20 montre les différentes étendues des périodes de récurrence d'inondation pour l'hiver (en haut) et le printemps (en bas). On remarquera les différences de superficie vulnérable entre les saisons. À noter aussi comment l'étendue spatiale de la superficie à risque augmente avec l'augmentation des périodes de récurrence au printemps par rapport à l'hiver. En fait, le niveau de récurrence de 100 ans au printemps dépasse à peine le niveau de récurrence de 5 ans en hiver. C'est la première fois qu'on a produit des cartes des périodes de récurrence saisonnières, qui ont l'avantage d'être simples et de montrer les zones très vulnérables aux inondations pour certaines périodes précises.

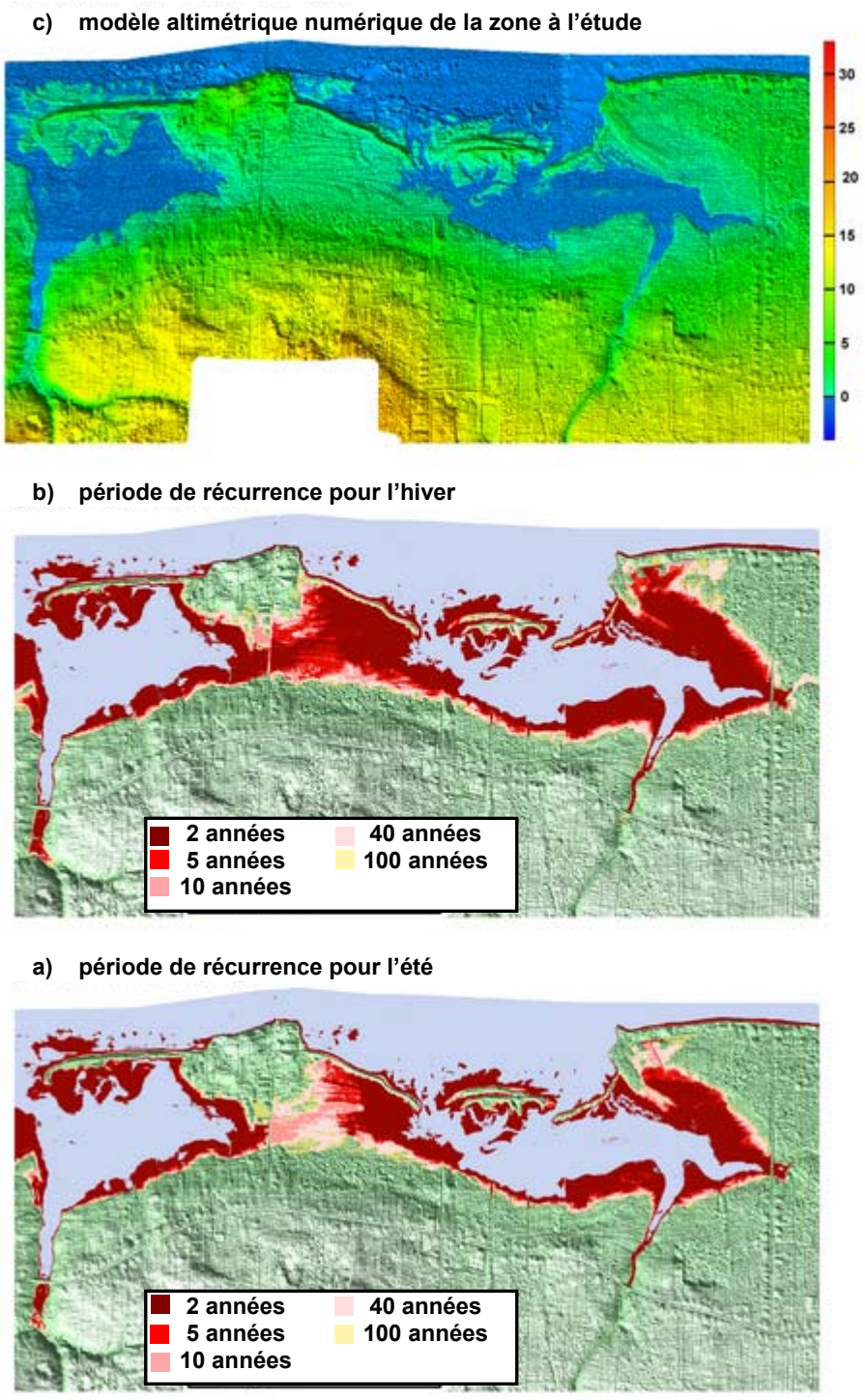


Figure 20. Cartographie spatiale des périodes de récurrence saisonnières des inondations à Shediac. Le panneau du haut est le MAN pour une zone située près de la station 14 (figure 7). La barre de couleurs à côté de ce panneau indique la hauteur au-dessus du zéro du MAN, qui est à 21 cm sous le niveau moyen de la mer. La résolution horizontale est de 1± 0,30 m, et la résolution verticale de 1± 0,11 m (comm. pers. de Tim Webster, du COGS). Le panneau du centre est une carte par période de récurrence des épisodes extrêmes d'hiver. Les périodes de récurrence sont

basées sur l'analyse extrémale des maximums hivernaux reconstruits (figure 14). Le panneau du bas est une carte par période de récurrence des épisodes extrêmes de printemps.

4.3.8.1 Visualisation du risque d'inondation dans un climat en évolution

Il est difficile de prévoir les changements dans l'intensité des tempêtes et ces prévisions devraient à terme être basées sur des forçages haute résolution fiables issus de modèles du climat du globe, dont on ne dispose pas encore. Nous avons donc effectué des études de sensibilité préliminaires en modifiant la forme de la courbe de distribution des ondes observées. Nous avons constaté que les changements de l'activité cyclonique représentés par de grandes augmentations de l'amplitude des différentiels forts ou moyens avaient moins d'impact sur la période de récurrence de niveaux marins extrêmes que l'élévation réaliste du niveau de la mer prévue pour certains endroits de la région à l'étude (p. ex., la plate-forme néo-écossaise) au cours du prochain siècle. Cela ne signifie pas que les changements de l'intensité des tempêtes influent peu sur la période de récurrence des épisodes extrêmes. Cette étude de sensibilité met plutôt en lumière le fait que, dans les zones où l'élévation du niveau de la mer est considérable (de l'ordre de 1 m), elle entraîne à elle seule un raccourcissement spectaculaire de la période de récurrence des épisodes extrêmes au cours du prochain siècle.

L'élévation du niveau de la mer dans cette zone devrait être, dans les 25 prochaines années, d'environ 0,2 m dans la région de Shediac pour laquelle on dispose du MAN. Sur le graphique de la période de récurrence (figure 14), cette élévation amènera l'actuelle ligne de récurrence de printemps à peu près à l'actuelle ligne pour l'hiver. On s'attend donc à ce que le risque d'inondation pendant la période de nidification augmente suffisamment pour que, dans 25 ans, le graphique des périodes de récurrence de printemps et la carte de vulnérabilité ressemblent à ceux des conditions d'hiver actuelles (panneau du centre de la figure 20). Nous ne parlerons pas ici de l'impact de cet état de choses sur la population d'oiseaux, qui devra être évalué par les experts concernés.

On trouvera à l'annexe A un autre ensemble de cartes des périodes de récurrence, pour des régions proches de la baie de Shediac. La méthodologie utilisée pour calculer ces cartes, identique à celle utilisée dans le présente section, repose sur les niveaux de récurrence extrêmes calculés à partir de l'enregistrement du niveau de la mer de Shediac. Comme, dans cette région, la hauteur et la phase des marées peuvent changer rapidement à des échelles de l'ordre des dizaines de kilomètres, nous avons limité la couverture spatiale des cartes aux alentours immédiats de la baie de Shediac. Les cartes (exemple, figure 21) présentent l'étendue des inondations pour le niveau de la mer actuel (ligne bleue) et dans un scénario d'élévation de 60 cm du niveau de la mer (ligne rouge).

Pour les autres régions, des cartes (exemple, figure 22) ont été produites pour représenter les étendues d'inondation de la tempête du 21 janvier 2000, pour le niveau de la mer actuel (ligne bleue) et dans un scénario d'élévation de 60 cm du niveau de la mer (ligne rouge). On les trouvera à l'annexe B.

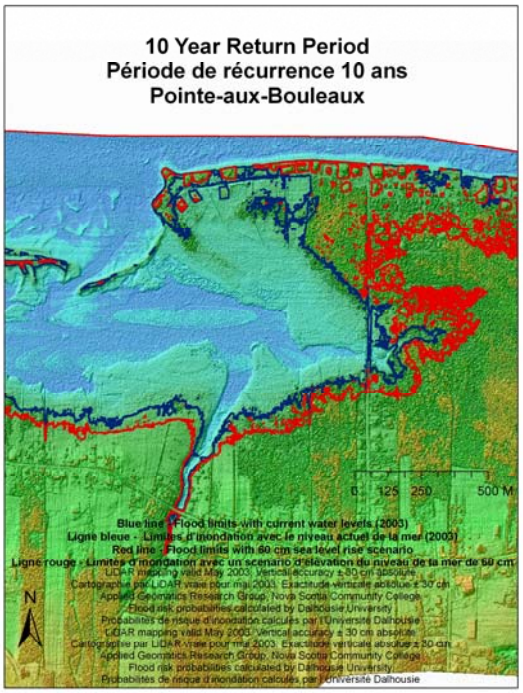


Figure 21. Carte de période de récurrence

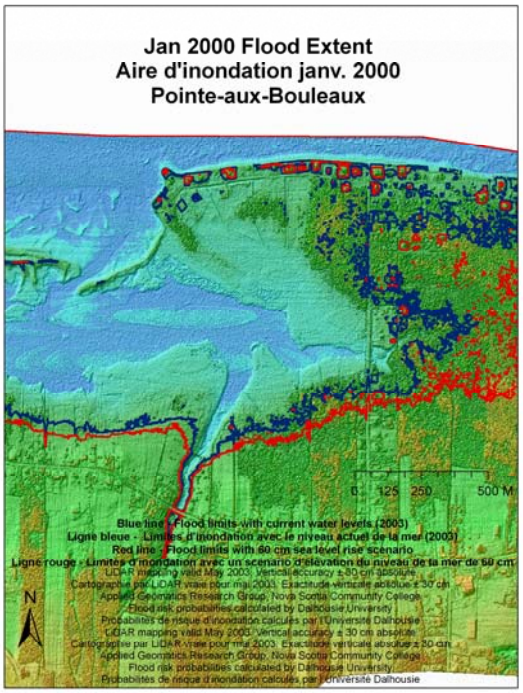


Figure 22. Carte de l'onde de tempête du 21 janvier 2000

4.3.9 Sommaire et conclusions

Au cours de cette étude, nous avons développé une approche face au risque d'inondation sur la côte du Nouveau-Brunswick, qui repose sur les observations du niveau de la mer, l'analyse extrémale et un modèle d'ondes de tempête. L'approche demandait que soient installés deux nouveaux marégraphes, pour fournir des données indépendantes sur le niveau de la mer afin de tester le modèle, et qu'on analyse les observations du niveau de la mer effectuées au cours du dernier siècle. Nous nous sommes beaucoup attachés à rendre l'information utile pour des non-scientifiques. Par exemple, nous avons développé un site Web à accès libre pour fournir au grand public des prévisions d'inondation quotidiennes. Nous avons aussi conçu de nouvelles manières de visualiser le risque d'inondation, qui puissent être facilement comprises par les intéressés.

Les deux nouveaux marégraphes ont été installés à Pointe-du-Chêne et à Wood Islands, afin de recueillir des données sur des endroits pour lesquels on ne disposait pas assez d'observations pour évaluer avec précision la performance de notre modèle d'ondes de tempête. Une analyse ultérieure donne à penser que les prévisions d'une journée issues du modèle pour ces marégraphes sont exactes à moins de 10 cm près.

Une reconstitution sur 40 ans des ondes de tempête a été effectuée pour le nord-ouest de l'Atlantique afin de quantifier la période de récurrence de niveaux marins extrêmes. Il a été encourageant de constater que l'écart type de l'erreur de la reconstruction (les écarts entre les différentiels observés des marées et les ondes reconstruites par le modèle) est de l'ordre de 8 cm et se compare bien avec l'erreur habituelle de prévision opérationnelle. Les reconstitutions des ondes de tempête présentaient de plus les

mêmes variations saisonnières et interannuelles de l'écart type que les différentiels observés. Ayant fait la preuve de la valeur de la reconstruction, nous avons réalisé des cartes de l'écart type des ondes, par saison, pour le nord-ouest de l'Atlantique. Comme nous nous y attendions, la variance des ondes était maximale en automne et en hiver. Nous avons également montré que les régions présentant la variance des ondes la plus élevée étaient le sud du golfe du Saint-Laurent et la côte est de Terre-Neuve.

Pour estimer la fréquence des niveaux marins totaux extrêmes (par opposition aux ondes extrêmes), nous avons fait intervenir la marée et d'autres processus physiques non résolus par le modèle d'ondes de tempête. Il est à cet égard important de remarquer que l'approche adoptée ici ne demande que quelques années d'observation horaire du niveau de la mer pour estimer les niveaux de récurrence pluridécennaux du niveau de la mer total. Dans l'ensemble, les niveaux de récurrence sur 40 ans prévus pour le niveau de la mer total (marée plus onde) se situent à une dizaine de centimètres des niveaux de récurrence observés sur 40 ans. La méthode a également été adaptée pour calculer la période de récurrence d'épisodes extrêmes pour une saison donnée.

Il est difficile d'évaluer les changements de fréquence et d'intensité des tempêtes (selon les scénarios de changement climatique); il faudrait à terme se baser pour cela sur des scénarios fiables de changement climatique issus de modèles du climat du globe. Étant donné que nous ne disposions pas de champs de forçage ramenés à cette échelle, nous avons effectué certaines études de sensibilité de l'effet des changements de la distribution des ondes sur la fréquence des niveaux marins totaux extrêmes et en avons comparé les impacts avec ceux de l'élévation du niveau de la mer. Nous avons trouvé que des changements significatifs de l'activité cyclonique, représentés par de grands changements de la distribution des ondes de tempête, avaient moins d'impact sur la période de récurrence de niveaux marins extrêmes que l'importante élévation du niveau de la mer prévue pour certaines zones de la région à l'étude (p. ex. plate-forme néo-écossaise). On ne devrait pas en conclure que les changements de l'intensité des tempêtes n'auraient pas d'impact sur la période de récurrence des épisodes extrêmes. L'étude de sensibilité suggère plutôt que, dans les régions où l'élévation du niveau de la mer prévue pour le prochain siècle est considérable (de l'ordre de 1 m), elle entraînera à elle seule un abaissement spectaculaire de la période de récurrence des épisodes extrêmes.

Grâce à la disponibilité d'un modèle altimétrique numérique (MAN), on a pu opérer une réduction d'échelle sur les résultats d'une analyse extrémale pour réaliser des cartes de la période de récurrence de l'étendue des inondations. Les cartes de période de récurrence présentées ici ont l'avantage de la simplicité. Elles sont faciles à comprendre et permettent de visualiser rapidement quelles zones sont le plus menacées par les inondations. Elles constituent donc, pour les planificateurs et responsables des politiques, un bon outil pour identifier les zones où il faudrait limiter l'aménagement, mettre en place des mesures d'adaptation et envisager une gestion de l'écosystème. On peut aussi évaluer, à partir d'enregistrements courts, la période de récurrence de décotes. Les résultats de l'analyse extrémale des niveaux minimums peuvent eux aussi subir une réduction d'échelle à l'aide de modèles MAN et de bathymétries haute résolution. Dans les zones où la navigation maritime exige une profondeur d'eau minimale pour que les navires puissent entrer au port ou naviguer en toute sécurité, on

peut alors réaliser des cartes des périodes de récurrence et de l'étendue des bas niveaux de l'eau.

On trouvera à la section 5.0 (Annexe A) un ensemble de cartes des périodes de récurrence, pour des régions proches de la baie de Shediac. La méthodologie utilisée pour calculer ces cartes repose sur les niveaux de récurrence extrêmes calculés à partir de l'enregistrement du niveau de la mer de Shediac. Pour les autres régions, des cartes ont été produites pour représenter les étendues d'inondation de la tempête du 21 janvier 2000, pour le niveau de la mer actuel et dans un scénario d'élévation de 60 cm du niveau de la mer. On les trouvera à la section 5.0 (Annexe B).

À noter que, dans la baie de Shediac, le niveau de récurrence de 40 ans des ondes de tempête devrait devenir plutôt un niveau de récurrence de 5 ans dans un scénario d'élévation du niveau de la mer de 60 cm, conditions qui devraient être atteintes en 2100.

4.3.10 Remerciements

Nous tenons à remercier le Programme sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques et Sécurité publique et Protection civile Canada pour l'appui financier qu'ils ont fourni aux présents travaux. Nous voulons aussi souligner l'appui du Service hydrographique du Canada (Charles O'Reilly et Fred Carmichael) et d'Environnement Canada (Jim Abraham) pour ce qui est des installations marégraphiques. Les éléments marée de WebTide ont été généreusement fournis par Charles Hannah, de l'Institut océanographique de Bedford. Merci également à Tim Webster, qui nous a donné accès au MAN et prodigué des conseils précieux.

4.3.11 Références

Bernier, N.B. 2005. Annual and Seasonal Extreme Sea Levels in the Northwest Atlantic: Hindcasts Over the Last 40 Years and Projections for the Next Century, thèse de doctorat, université Dalhousie.

Bernier, N.B, et Thompson, K.R. 2006. Predicting the frequency of storm surges and extreme sea levels in the Northwest Atlantic, Journal of Geophysical Research-Oceans, présenté.

Bernier, N.B., Thompson, K.R., Ou, J. et Ritchie, C.H. 2006. Mapping the return periods of extreme sea levels: Allowing for short sea level records, seasonality, and climate change, Global and Planetary Change, numéro spécial sur les phénomènes extrêmes et leurs impacts, 2005, accepté.

Bobanovic, J. et Thompson, K.R. 2001. The influence of local and remote winds on the synoptic sea level variability in the Gulf of Saint Lawrence. *Continental Shelf Research*, **21**, 129–144.

Church, J.A., Gregory, J.M., Huybrechts, P.,Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M.T., Qin, D. et Woodworth, P.L. 2001. Changes in Sea Level. *In* Climate Change: The Scientific Basis. Contribution du Groupe de travail I au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. et Johnson, C.A. (dir. de publ.)], rapport technique. p. 639-693.

Coles, S., 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer Series in Statistics, Springer.

Dixon, M.J., et Tawn, J.A. 1999. The effect of non-stationarity on extreme sea-level estimation, Journal of the Royal Statistical Society Series C-Applied Statistics, 48, 135-151.

Gal-Chen, T. 1978. A method for the initialization of the anelastic equations: Implications for matching models with observations, Monthly Weather Review, 106, 587-606.

Gal-Chen, T., et Kropfli, R.A. 1984. Buoyancy and pressure perturbations derived from dual-Doppler radar observations of the planetary boundary layer: Applications for matching models with observations, Journal of the Atmospheric Sciences, 41, 3007-3020.

Grant, W.D., et Madsen, O.S. 1979. Combined wave and current interaction with a rough bottom, Journal of Geophysical Research, 84, 1797-1808.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, R. Jenne et D. Joseph, 1996.The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, Bulletin de l'American Meteorological Society, 77, 437-471.

Koutitonsky, V.G. et Bugden, G.L. 1991. The physical oceanography of the Gulf of St. Lawrence: A review with emphasis on the synoptic variability of the motion, Fisheries and Aquatic Science, 113, 57-90.

Lambert, S.J. 2004. Changes in winter cyclone frequencies and strengths in transient enhanced greenhouse warming simulations using two coupled climate models, Atmosphere-Ocean, 42, 173-181.

Liou, Y.-C. 2001.The derivation of absolute potential temperature perturbations and pressure gradients from wind measurements in three-dimensional space, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18, 577-590.

Lowe, J.A., Gregory, J.M. et Flather, R.A. 2001. Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models, Climate Dynamics, 18, 179-188.

Mellor, G.L. 1998. *Users' guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model.* Technical Report 08544-0710, Princeton University, Princeton, New Jersey.

Parsons, D.B., Mohr, C.G. et Gal-Chen, T. 1987. A severe frontal rainband. Part III: Derived thermodynamic structure, Journal of the Atmospheric Sciences, 12, 1615-1631.

Pawlowicz, R., Beardsley, B. et Lentz, S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE, Computers and Geosciences, 28, 929-937.

Peltier, W.R. 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: The ice-5G (VM2) model and GRACE, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 32, 111-149.

Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. et Vetterling, W.T. 1986. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press.

Swail, V.R. et Cox, A.T. 2000. On the use of NCEP-NCAR reanalysis surface marine wind fields for a long-term North Atlantic wave hindcast. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 17, 532-545.

Swail, V.R., Ceccafi, E.A. et Cox, A.T. 2000. The AES40 North Atlantic wave reanalysis: Validation and climate assessment, *in* 6th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Monterey, Californie, É.-U.

Woodworth, P.L. et Blackman, D.L. 2002. Changes in extreme high waters at Liverpool since 1768, International Journal of Climatology, doi:10.1002/joc.761, 697—714.

4.4 Modèle altimétrique numérique LiDAR et cartographie des risques d'inondation

Tim L. Webster[1]*, Donald L. Forbes[2], Edward MacKinnon[1], Daniel Roberts[1]

[1]. Applied Geomatics Research Group, Centre of Geographic Sciences (COGS), Nova Scotia Community College, 295 Main St., Middleton, Nouvelle-Écosse, Canada B0S 1M0
[2]. Commission géologique du Canada (Atlantique), Ressources naturelles Canada, Institut océanographique de Bedford, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada

* contact avec l'auteur : timothy.webster@nscc.ca

4.4.1 Introduction

Les ondes de tempête ont généralement une hauteur variant de 0,6 à 2 m dans la région (Parkes *et al.*, 1997), ce qui nécessite des technologies d'une précision verticale nettement plus grande que ces valeurs pour établir des cartes de risques d'inondation de résolution convenable. Le LiDAR (détection et télémétrie par ondes lumineuses) aéroporté est une technologie émergente qui offre la précision verticale et la haute densité d'échantillonnage spatial requises pour prendre ces mesures. En effet, de nombreux systèmes LiDAR offrent une exactitude altimétrique de l'ordre de 30 cm ou moins. Bien que cette technologie ait fait ses preuves lors de travaux de cartographie bathymétrique en eaux peu profondes (p. ex. Guenther *et al*., 2000), les coûts qui lui sont associés demeurent un obstacle à son utilisation répandue pour de telles tâches. La technologie peut en outre être utilisée pour l'acquisition d'images de la surface des étendues de terres et d'eau (Hwang *et al*., 2000), comme dans la présente étude. Les travaux de Wehr et Lohr (1999) donnent un aperçu général de la technologie et des principes des systèmes laser aéroportés à balayage. Des études sur l'application de ces méthodes aux processus littoraux ont été menées aux États-Unis par Sallenger *et al.* (1999), Krabill *et al.* (1999) et Stockdon *et al.* (2002), entre autres. Les essais préliminaires dans la région de l'Atlantique canadien ont été documentés par O'Reilly (2000) et les expérimentations subséquentes décrites par Webster *et al.* (sous presse, 2004b). La majeure partie des côtes continentales américaines ont été cartographiées à l'aide de cette technologie (Brock *et al.*, 2002).

Dans cette section, nous présentons les méthodes appliquées et les résultats obtenus à l'utilisation de deux systèmes LiDAR pour l'établissement de modèles altimétriques numériques (MAN) de haute résolution et pour la cartographie des risques d'inondation sur la côte du Nouveau-Brunswick, le long du détroit de Northumberland (figure 1) (MacKinnon, 2004). Ce projet ajoute aux connaissances acquises lors de l'application de la technologie LiDAR pour la cartographie des risques d'inondation à l'Île-du-Prince-Édouard (Dickie, 2001; McCulloch *et al.*, 2002; Webster *et al.*, 2002, 2004a; Webster et Forbes, 2006).

4.4.2 Méthodes

4.4.2.1 Systèmes LiDAR

La cartographie par LiDAR implique l'émission depuis un aéronef d'impulsions laser orientées vers la terre et la mesure du temps requis par celles-ci pour revenir à leur source (voir Webster *et al.*, 2004a). Le balayage laser est réalisé par la répétition rapide de l'impulsion laser et la déflexion du faisceau perpendiculairement à la trajectoire de vol à l'aide d'un miroir oscillant, ce qui produit un motif en zigzag de points laser sur les surfaces au sol exposées au rayonnement (figure 2). Un intervallomètre embarqué enregistre l'angle de balayage du miroir, le moment d'émission de l'impulsion, l'instant de retour du faisceau réfléchi et, dans certains cas, l'intensité de la réflexion. La configuration de l'intervallomètre détermine s'il enregistrera le premier ou le dernier écho. Les LiDAR de nouvelle génération peuvent enregistrer les premiers, les derniers et les échos intermédiaires d'intensités variables. Le volume de données obtenues avec ces nouveaux capteurs peut être problématique, et le contenu en information des échos intermédiaires fait l'objet de recherches actives. L'utilisation du GPS (*Global Positioning System*) différentiel de précision pour déterminer la position de l'aéronef (Krabill & Martin, 1987) et d'une unité de navigation inertielle (UNI) pour capter les données sur son comportement en vol (roulis, lacet, tangage) permet de déterminer l'emplacement précis d'où proviennent des échos individuels captés par l'intervallomètre (figure 2). Dans le cadre de la présente étude, deux systèmes LiDAR distincts ont été utilisés pour les levés : le système Mark I lors des levés de 2003 et le système Mark II pour ceux de 2004.

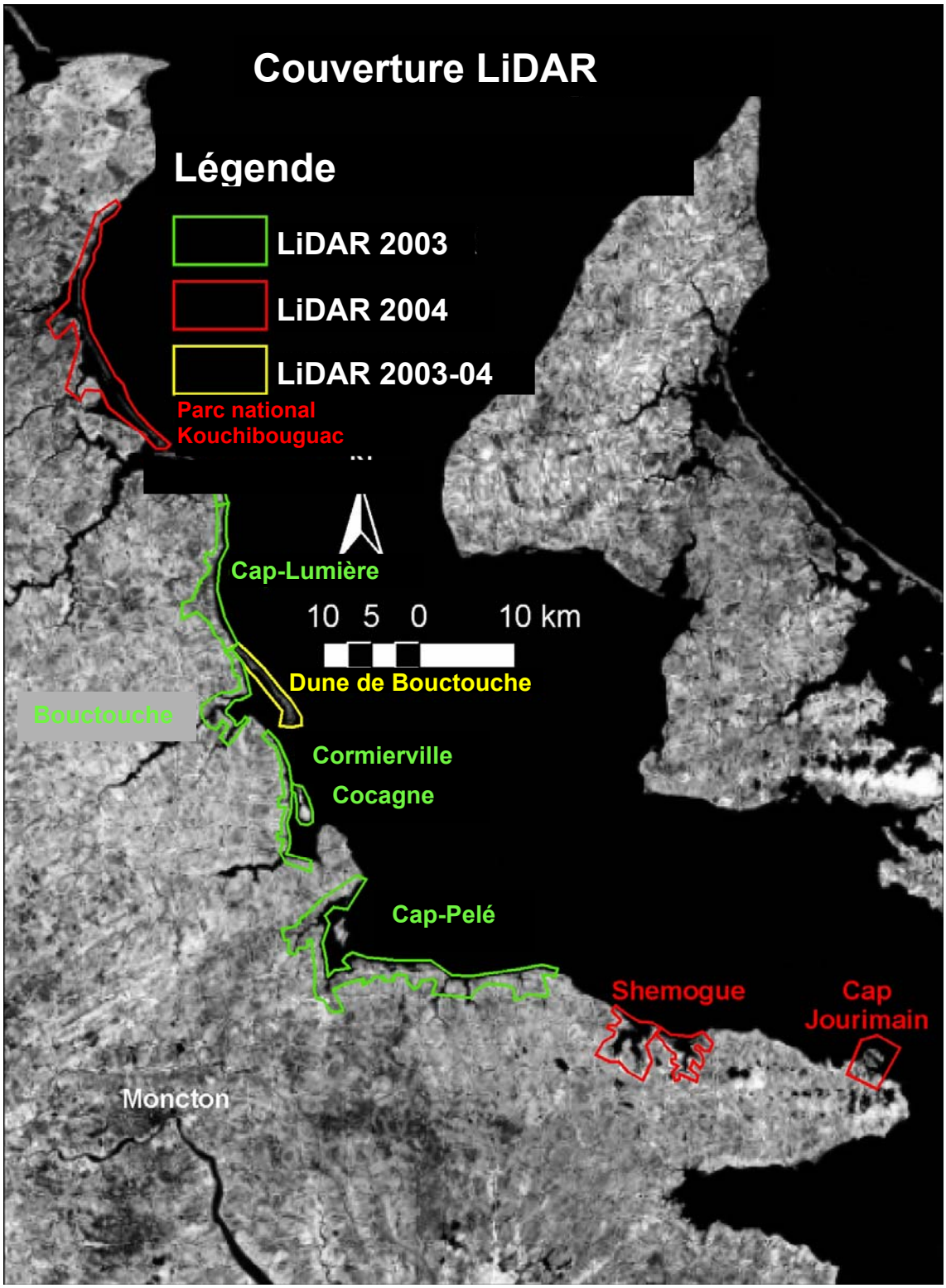


Figure 1. Les polygones à couvrir lors des levés LiDAR en 2003 et en 2004 sur la zone côtière du détroit de Northumberland au Nouveau-Brunswick.

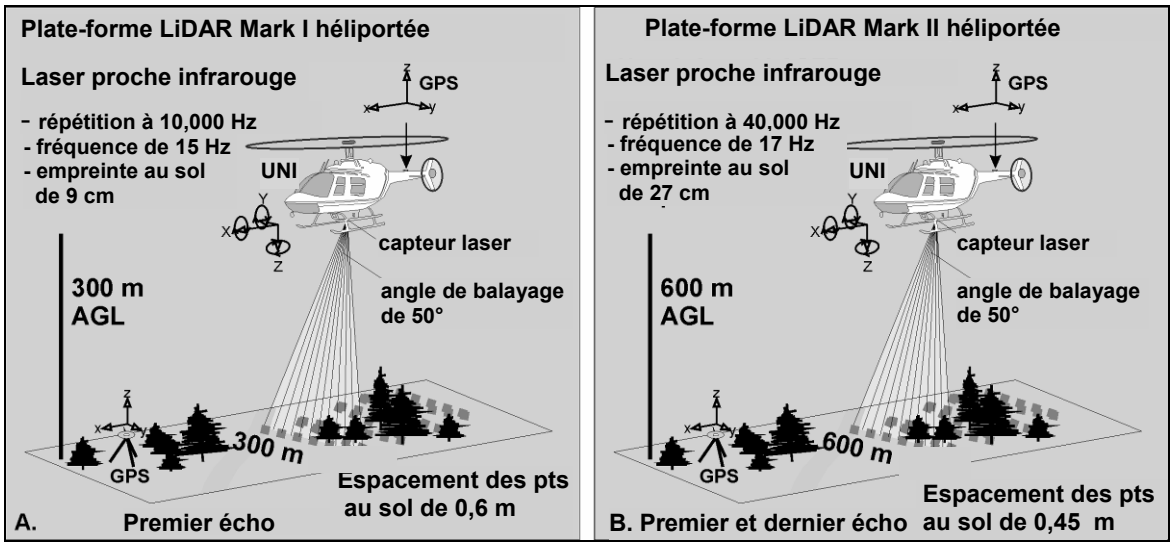


Figure 2. Configuration des LiDAR. A. Le système Mark I utilisé en 2003. B. Le système Mark II utilisé en 2004.

L'exactitude nominale des systèmes utilisés lors des levés est d'environ 30 cm sur l'horizontale et la verticale. Les données préliminaires comprennent les coordonnées géographiques (longitude et latitude) et l'altitude (en mètres) de chaque réflexion laser, d'après l'ellipsoïde du *World Geodetic System* de 1984 (WGS 84), l'ellipsoïde de référence du GPS. Pour que les données soient utilisables dans le cadre d'un système d'information géographique comme pour la cartographie des risques d'inondation, les coordonnées planimétriques doivent être converties dans le système de projection cartographique voulue, dans le cas présent le quadrillage de la projection de Mercator transverse universelle (MTU). Sur la plupart des cartes topographiques, l'altitude est fournie par rapport à un système de référence géodésique altimétrique. Au Canada, on utilise le Système canadien de référence altimétrique (CGVD28). Ainsi, pour de multiples applications, dont la cartographie des risques d'inondation, les altitudes relevées par LiDAR par rapport à l'ellipsoïde sont transformées en hauteurs orthométriques. Ces dernières sont basées sur le géoïde, une surface équipotentielle définie d'après le champ gravitationnel terrestre et à peu près analogue au niveau moyen de la mer. Pour obtenir des hauteurs orthométriques, des corrections doivent être apportées en fonction des écarts verticaux entre l'ellipsoïde et le géoïde. La différence entre l'ellipsoïde WGS84 et le géoïde CGVD28 est établie d'après le modèle HT1_01E, remplacé depuis par le modèle HTv2.0, d'une exactitude de ±5 cm à un niveau de confiance de 95 % pour le sud du Canada (Ressources naturelles Canada - Division des levés géodésiques, http://www.geod.nrcan.gc.ca/products_e.php#software).

4.4.2.2 Les systèmes LiDAR Mark I et Mark II de Terra Remote Sensing

L'entreprise Terra Remote Sensing Inc. de Sidney en Colombie-Britannique (Canada) a été retenue sous contrat pour l'acquisition des données LiDAR dans les régions à l'étude. La densité des points laser demandée en terrain découvert était de un tous les 60 cm. L'exactitude absolue sur la verticale demandée pour les données LiDAR acquises dans le cadre de cette étude était de ±30 cm. Deux systèmes LiDAR distincts ont été utilisés pour recueillir les données au printemps des années 2003 et 2004, juste après la fonte

des neiges, lorsque les arbres n'ont pas encore de feuilles. En 2003, le système Mark I (figure 2A) a été utilisé pour recueillir des données sur quatre des sept polygones de levés (figure 1). En 2004, le système Mark II (figure 2B), plus évolué, a été utilisé pour recueillir des données sur les trois polygones restants. Les levés ont été menés dans des conditions voisines de la marée basse où cela était possible et à des distances inférieures à 50 km des lignes de base GPS, pour minimiser les erreurs de trajectoire de l'aéronef.

Monté sur une nacelle fixée sous le fuselage d'un hélicoptère Bell 206L, le Mark I est un système LiDAR de premier retour conçu à l'origine pour la cartographie de corridor (figure 2A). Le faisceau laser a une empreinte au sol d'un diamètre de 9 cm et l'espacement des points est en moyenne de 60 cm (figure 2A). L'étroitesse du faisceau en facilite la pénétration jusqu'au sol sur les surfaces végétalisées. Les levés ont été effectués entre le 23 mai et le 3 juin 2003 (figure 3).

Également monté sur une nacelle fixée sous le fuselage d'un hélicoptère Bell 206L, le système Mark II permet d'enregistrer le premier et le dernier écho de même que l'intensité de l'un des échos. Il a été décidé, lors de ces levés, d'enregistrer l'intensité d'un écho sur deux pour qu'ainsi l'intensité de chaque second et dernier écho soit enregistrée. Le faisceau laser a une empreinte au sol d'un diamètre de 27 cm et l'espacement des points est en moyenne de 45 cm (figure 2B). Comme le capteur Mark II permet d'enregistrer les premiers et derniers échos, son faisceau laser plus large peut tout de même pénétrer partiellement la voûte forestière pour être réfléchi au sol ou près du sol et enregistré en tant que dernier écho. Les levés ont été menés du 27 au 29 avril 2004 (figure 4). Le système Mark II offre une plus grande précision, soit ±15 cm ou mieux sur la verticale en raison de la plus grande précision de son système de télémétrie laser et de son UNI. Les spécifications techniques pour le projet exigeaient des exactitudes altimétriques et planimétriques inférieures ou égales à 30 cm par rapport aux points GPS mesurés.

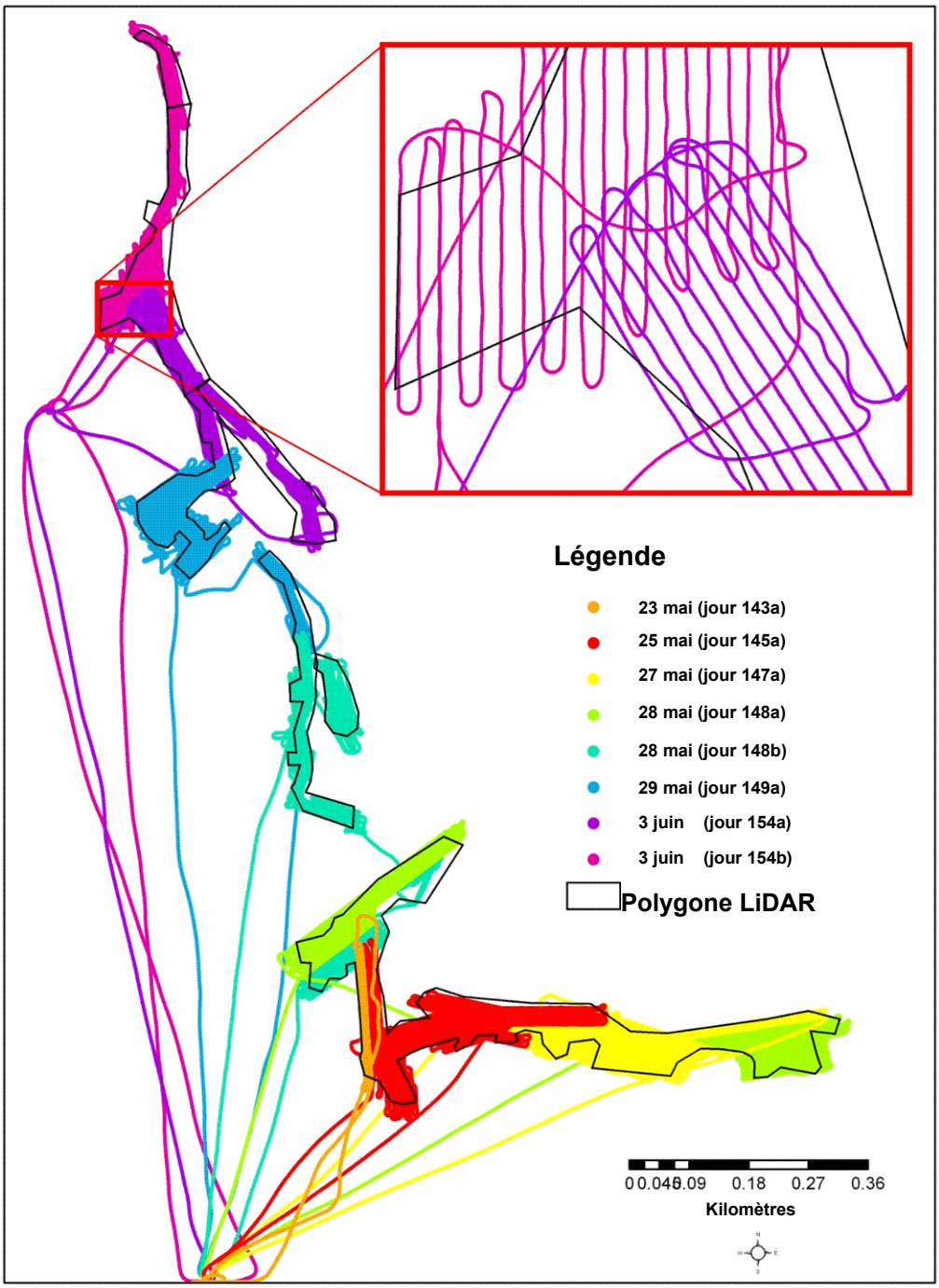


Figure 3. Dates des levés LiDAR et lignes de vol en 2003 (MacKinnon, 2004).

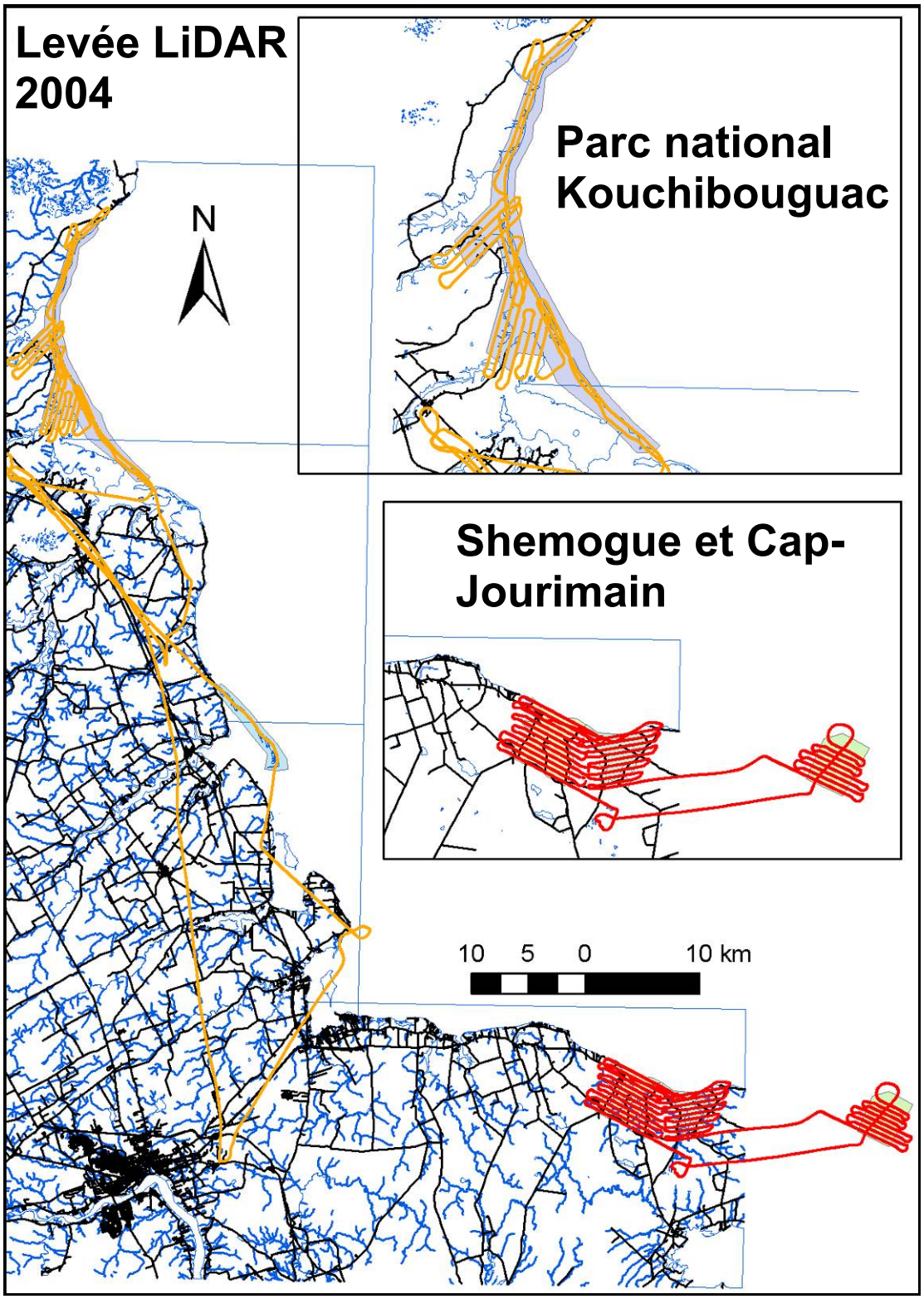


Figure 4. Dates des levés LiDAR et lignes de vol en 2004. Les lignes rouges sont les lignes de vol du 26 avril, et les lignes orange, celles du 29.

4.4.2.3 Attributs des points LiDAR

Les données de l'étude présentée ici ont été livrées en fichiers ASCII séparés en pavés de 2 km sur 2 km d'après le quadrillage MTU. Les fichiers de données de 2003 comprennent des champs de données pour chaque point LiDAR, dont sa position en abscisse et en ordonnée basée sur la zone MTU 20 suivant le NAD83, ses hauteurs ellipsoïdale et orthométrique, l'heure GPS de chaque tir laser et le numéro de ligne de vol. Ces deux derniers champs ont facilité l'examen des erreurs systématiques entre lignes de vol adjacentes ou entre les bandes (p. ex. Maas 2000, 2002). Les données de 2004 comprennent les mêmes champs que celles de 2003 en plus de ceux contenant le numéro de l'écho et l'intensité des échos alternatifs. Le numéro de l'écho est un code composé d'un nombre entier indiquant s'il s'agit du premier ou du dernier écho pour de multiples échos ou d'un écho unique (tableau 1).

Tableau 1. Codage des échos Mark II

Code d'écho	Explications
0	Écho unique
1	Premier écho si échos multiples
2	Dernier écho si deux échos
3	Dernier écho si multiples échos

4.4.2.4 Modèle altimétrique numérique

Les modèles altimétriques numériques (MAN) sont utilisés dans plusieurs applications géoscientifiques à des échelles entre 10^{-1} et 10^{-6} m. Certains d'entre eux ont été compilés d'après des isohypses ou des points cotés dérivés par photogrammétrie classique. Ces méthodes de détermination de l'altitude sont d'une exactitude dégradée en terrain végétalisé, là où l'altitude du sol est déduite de la hauteur du couvert forestier. Les meilleurs MAN régionaux disponibles pour cette région à l'étude sont à l'échelle de 1/10 000 et d'une exactitude altimétrique de l'ordre de ±2,5 m, et ont été établis d'après des méthodes photogrammétriques classiques; ils sont disponibles au site Web de Services Nouveau-Brunswick à l'adresse suivante : https://www.web11.snb.ca/snb7001/f/2000/2900f_1c_i.asp. D'autres MAN de haute résolution (échelles du mètre au centimètre) peuvent être établis avec l'équipement de levés GPS au sol, mais sont de couverture restreinte (p. ex. une plage ou un ouvrage côtier). Dans la présente étude, des levés LiDAR de la zone côtière ont été exécutés afin d'obtenir des MAN de haute résolution permettant de cartographier les risques d'inondation résultant de l'élévation du niveau de la mer. Le résultat d'un levé par LiDAR est un nuage de points représentant les échos laser sous forme d'un amas de points dans l'espace. Les points sont classés en cibles représentant des entités « sol » ou « non-sol », le plus souvent de la végétation ou des bâtiments. Ces points ont été analysés et utilisés pour dresser des modèles de la surface dans un système d'information géographique (SIG). Tous les points LiDAR (« sol » et « non-sol ») ont servi pour la production de modèles numériques de surface (MNS). Toutefois, pour la cartographie des risques d'inondation, un MAN à « terre nue » a été dressé par interpolation des seuls points LiDAR « sol ». Les données du capteur LiDAR Mark II comprenaient aussi l'intensité d'échos alternés. Des cartes d'intensités en tons de gris ont aussi été interpolées d'après certaines données Mark II en utilisant les deux classes de points LiDAR pour générer une carte de « rétrodiffusion » LiDAR analogue au MNS. Cette carte d'intensités ressemble à une photographie en noir et blanc dans le proche infrarouge.

4.4.2.5 Modèles de surface LiDAR (MAN, MNS, cartes d'intensité)

Différentes surfaces du terrain ont été construites d'après les points LiDAR. La surface du MNS a été interpolée linéairement en un quadrillage à mailles de 1 m d'après un réseau triangulaire irrégulier composé de l'ensemble des points LiDAR. Les points « sol » ont servi à établir un MAN par la même méthode. Bien que d'autres méthodes d'interpolation aient été évaluées (p. ex. pondération selon l'inverse de la distance), celle du réseau triangulaire irrégulier s'est révélée la plus efficace pour la représentation des valeurs d'intensité de tous les échos de LiDAR (« sol » et « non-sol »). Même si les surfaces d'intensité LiDAR n'ont pas été tellement utilisées dans cette projection, Brennan et Webster (2006) ont montré qu'une classification exacte du couvert terrestre pouvait être obtenue par l'utilisation de cartes d'intensités en conjonction avec un MNS, un MAN, un quadrillage de hauteurs normalisées (MNS – MAN) et l'information des échos.

Des modèles en couleurs à représentation du relief par ombres portées ont été générés pour le MAN et pour le MNS en éclairant artificiellement les surfaces depuis le nord-ouest suivant un angle zénithal de 45º et en appliquant un coefficient d'exagération verticale de 5. Pour faire en sorte que les surfaces LiDAR de polygones côtiers adjacents (figure 1) coïncident, on a déterminé l'étendue maximale de la plage d'altitude de la région des levés et on l'a appliquée à la coloration de toutes les surfaces. L'altitude maximale utilisée était de 38 m pour le MAN et de 58 m pour le MNS.

4.4.2.6 Validation du MAN LiDAR

Dans cette étude, une exactitude absolue des MAN LiDAR était requise pour établir des cartes et des modèles exacts des risques d'inondation; c'est pourquoi de nombreuses validations au sol par des méthodes de levés GPS et classiques ont été menées pour l'établissement d'un canevas d'appui aux données LiDAR (figure 5). La méthodologie décrite dans Webster (2005) et Webster et Dias (sous presse) a été utilisée pour comparer les données des points de validation aux points LiDAR « sol » et aux MAN dérivés. Les ouvrages côtiers (p. ex. les quais) dans le MAN ont été comparés à leur représentation sur les orthophotos numériques pour s'assurer de l'exactitude de leur représentation. Les points du canevas étaient levés par GPS cinématique en temps réel (RTK : *Real-Time Kinematic)* le long de routes, sur les quais et les plages ainsi que par des méthodes de levé classiques avec des stations totalisatrices sur des transects dunaires et sous le couvert forestier (Webster *et al.*, sous presse).

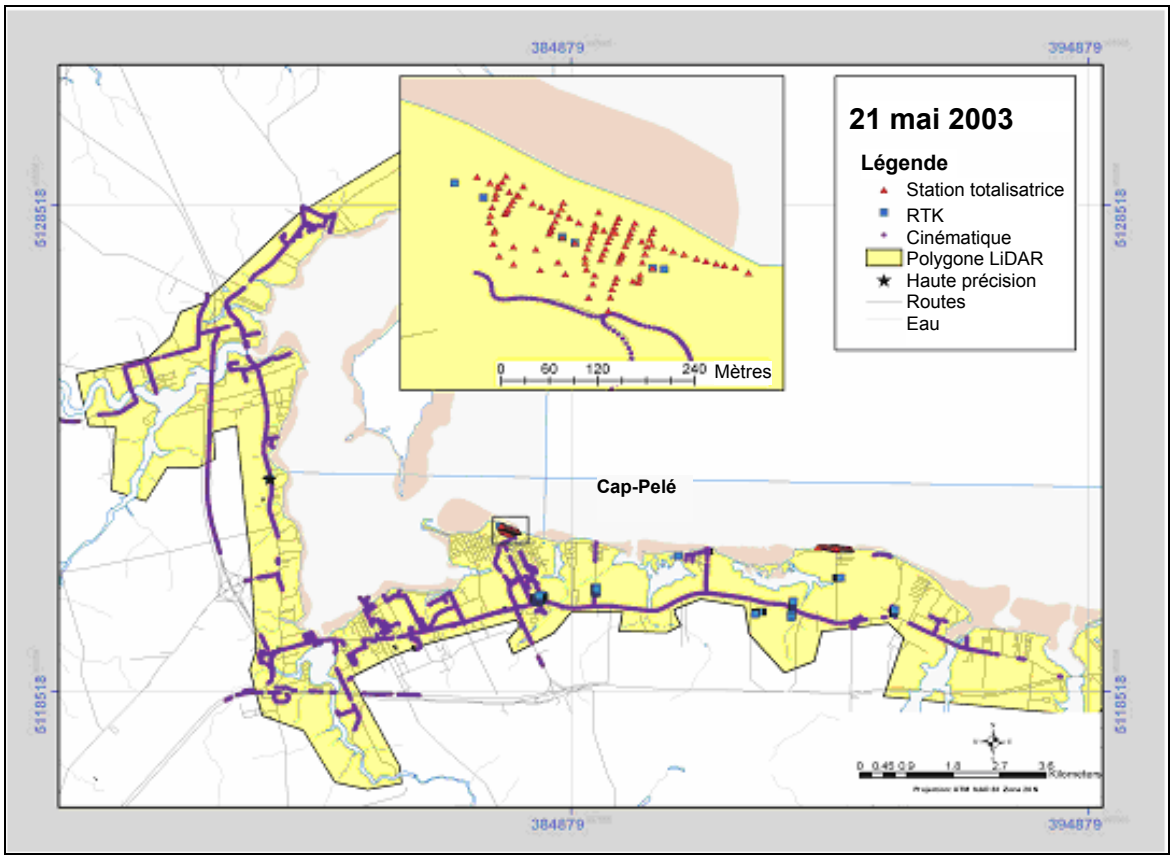


Figure 5. Exemple de points de canevas de validation pour la zone de levé de Cap-Pelé (MacKinnon, 2004).

4.4.2.7 Niveaux de la mer causant l'inondation

La tempête des 21-22 janvier 2000 a généré une onde de tempête dont les niveaux d'eau ont été parmi les plus élevés enregistrés dans la région du détroit de Northumberland (Parkes et Ketch, 2002; Forbes *et al.*, 2004). Le marégraphe d'Excuminac, ayant gelé avant que le niveau de l'eau ne culmine pendant la tempête, n'a pas enregistré cet événement. Toutefois, des membres du personnel d'Environnement Canada avaient alors marqué la laisse de crue des eaux en plantant des clous dans les poteaux de lignes électriques et d'autres structures en bois de plusieurs des municipalités côtières touchées. Ces indicateurs avaient ensuite été relevés par GPS RTK en 2002 avec une précision verticale de l'ordre de 2 à 5 cm et utilisés pour estimer les niveaux d'eau de l'onde de tempête de janvier 2000 (Webster *et al.*, sous presse). On estime que le niveau de la mer a alors atteint une hauteur de 2,55 m au-dessus du CGVD28. Le niveau moyen de la mer est approximativement 19 cm au-dessus du CGVD28 pour cette région. Trois niveaux d'eau probables ont ensuite été choisis pour établir des modèles initiaux de risques d'inondation : le niveau atteint lors de la tempête de janvier 2000 (2,55 m au-dessus du CGVD28) et deux autres niveaux plus élevés de 50 et de 70 cm respectivement par rapport à ce premier niveau. Ceux-ci représentent les niveaux qui seraient atteints lors d'une tempête analogue au siècle prochain pour deux prévisions d'élévation du niveau de la mer (50 et 70 cm par siècle) (Church *et al.*, 2001). Étant donné que ces estimations des futurs niveaux de la mer sont conjecturales, d'autres

cartes des risques d'inondation à des niveaux de la mer s'élevant par incréments de 10 cm ont été dressées, et ce jusqu'à un niveau maximal de 4 m au dessus du CGVD28.

4.4.2.8 Modélisation et cartographie des risques d'inondation

Des fonctionnalités standard de SIG et de traitement d'image ont été combinées avec le MAN LiDAR pour modéliser les zones d'inondations éventuelles à des niveaux de la mer compris entre 0 et 4 m (CGVD28). Galy et Sanders (2002) ont adopté une approche semblable en utilisant un MAN pour cartographier les risques d'inondation le long de la Tamise au Royaume-Uni. Nous considérons dans nos méthodes que, lors d'un phénomène d'onde de tempête, l'élévation du niveau de l'eau donnerait lieu à la formation d'un plan d'eau horizontal s'avançant sur les terres depuis l'océan. Les effets hydrauliques, les décalages de temps associés, la progression ou l'amortissement de l'inondation n'ont donc pas été pris en compte dans la modélisation.

Webster *et al.* (2004a) ont exposé les conditions requises pour que les zones du MAN sous un niveau d'inondation donné soient incluses lorsqu'elles présentent un lien libre avec l'océan. Pour la présente étude, l'utilisation de couches d'une carte topographique à 1/10 000 combinée au MAN avec représentation en couleurs et par ombres portées a servi à identifier les emplacements de ponceaux et de ponts. Ces endroits seraient par ailleurs représentés sur le MAN comme des digues, ce qui couperait le lien entre l'océan et les zones basses en amont. Des « encoches » ont donc été pratiquées à travers les routes sur le MAN aux emplacements des ponts ou des ponceaux; on a assigné aux encoches ainsi créées une altitude égale à celle de la zone du chenal la plus proche en amont. Une routine automatisée du SIG a été testée sur le MAN modifié avec ses « voies de pénétration hydrauliques » pour déterminer l'étendue de l'inondation sur les terres. Lors du traitement SIG, un seuil est appliqué au MAN modifié pour simuler un niveau d'inondation donné, ce qui donne une trame binaire qui est ensuite convertie en polygones vectoriels avec attributs calculés de périmètre et de superficie. Le plus grand polygone (superficie) ainsi généré représente les zones inondées à l'intérieur des terres reliées à l'océan alors que les polygones plus petits, sans lien avec l'océan, sont éliminés. Pour être en mesure d'apprécier les dégâts potentiels d'une inondation causée par l'onde de tempête, Webster et Forbes (2006) ont souligné l'importance, en plus des cartes d'aire d'inondation, de cartes représentant la profondeur de l'eau dans les zones inondées. Après que l'aire d'inondation a été déterminée pour les trois niveaux d'inondation préalablement définis, des cartes de profondeur de l'eau ont été générées pour chacun de ces niveaux en soustrayant le MAN du niveau de l'eau recouvrant la zone inondée.

4.4.2.9 Détection des variations à la Dune de Bouctouche (2003-2004)

La Dune de Bouctouche, un des plus importants systèmes dunaires le long du littoral du Nouveau-Brunswick, héberge plusieurs espèces animales et végétales menacées. La dune a été intégralement levée au LiDAR en 2003 et une partie en a été levée de nouveau en 2004 pour y évaluer les changements de morphologie. Une onde de tempête importante, survenue en février 2004, a causé une erosion des côtes et des inondations dans la région. Bien que les levés LiDAR aient été menés pendant des saisons similaires les deux années, les conditions de marées et la précision des deux systèmes utilisés étaient différentes. Les surfaces LiDAR de la Dune de Bouctouche ont été quadrillées à une résolution de 1 m et soustraites l'une de l'autre (MAN 2004 - 2003) pour mettre en évidence les zones ayant subi d'importants changements de morphologie. En raison de

la précision moindre des levés de 2003, tout changement inférieur à 0,3 m entre les MAN était considéré comme du bruit et, par conséquent, ignoré. Les changements ont été classés suivant des incréments verticaux de 0,5 m et examinés pour y découvrir les différences importantes. Des profils topographiques ont ensuite été extraits des deux MAN LiDAR et utilisés pour décrire le type de changement (p. ex. abaissement de la crête ou recul de la dune).

4.4.3 Résultats

4.4.3.1 Exemples de modèles de surface d'après les levés LiDAR de 2003 (MAN, MNS)

Les données LiDAR de 2003 ont été inspectées pour s'assurer que la totalité des polygones côtiers avaient été levés et pour vérifier que des MAN exacts avaient été construits. On a observé dans les données de 2003 des erreurs dans la classification des points LiDAR; ces erreurs étaient associées à des ouvrages côtiers qui présentaient des faces verticales par rapport au terrain adjacent. Par exemple, les bords des quais ont été classés comme des points « non-sol », d'où leur représentation inexacte dans le MAN initial. Les points erronément classés pour ces zones ont été utilisés pour établir des MAN qui représentaient les entités côtières avec exactitude en utilisant une méthode décrite dans Webster *et al.* (2004a). Le MNS et le MAN ont été comparés à l'information interprétée d'après la série de produits cartographiques tirés des orthophotos numériques de Services Nouveau-Brunswick pour assurer une classification exacte des points LiDAR (figure 6). Une configuration systématique a été observée dans les données LiDAR acquises au-dessus des surfaces planes, comme les plans d'eau. Cette configuration, qu'on retrouve dans d'autres systèmes LiDAR et chez d'autres fournisseurs de données (D. Whalen, Commission géologique du Canada, comm. pers., 2005) a reçu le nom « d'effet de fil du bois ». Ce phénomène est causé par l'effet combiné de la précision limitée du système de télémétrie laser et du mouvement de l'aéronef. La variance de la configuration ne dépasse pas les écarts maximaux tolérés pour les levés, mais elle diminue la fidélité des cartes couleurs en relief par ombres portées du MAN et du MNS.

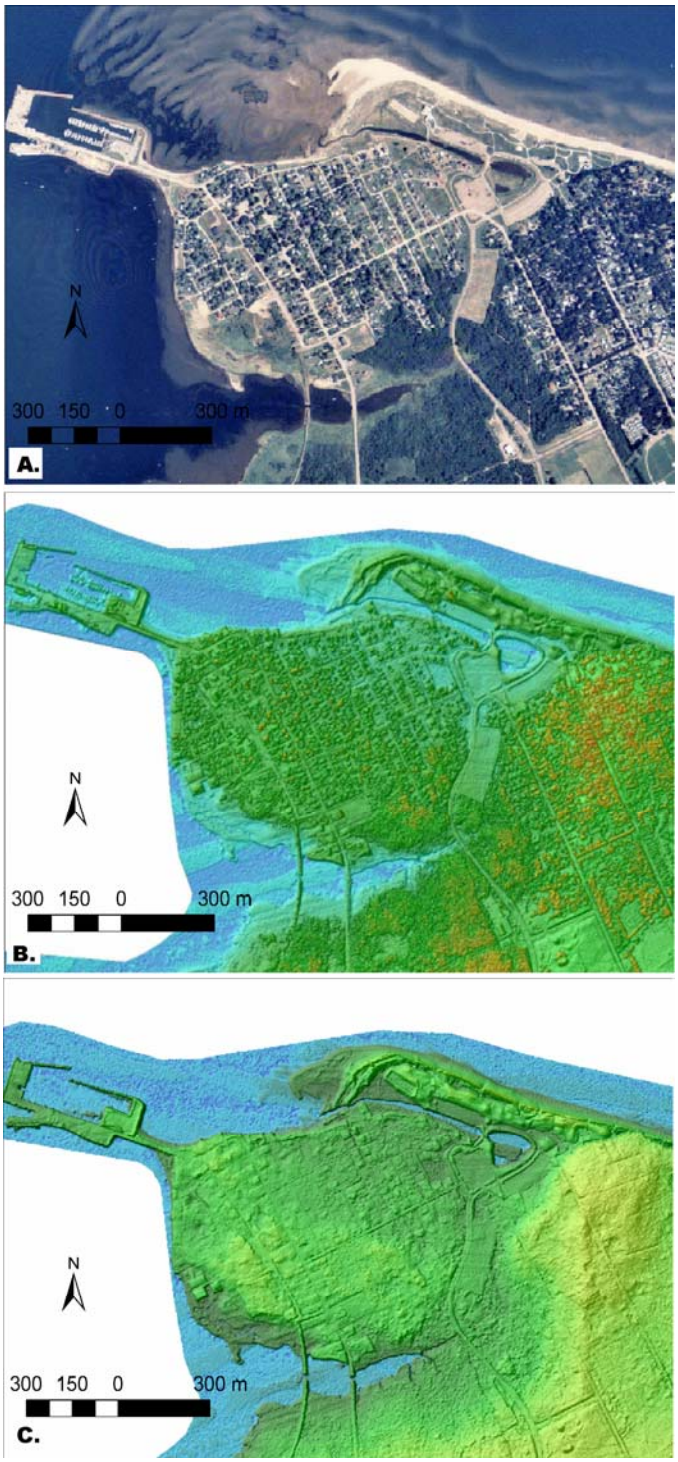


Figure 6. Exemples d'orthophotos et de modèles de surface LiDAR pour Pointe-du-Chêne. A. Orthophoto en couleurs (de Services Nouveau-Brunswick). B. Modèle numérique de surface LiDAR (MNS). C. Modèle altimétrique numérique LiDAR (MAN).

4.4.3.2 Exemples de modèles de surface d'après les levés LiDAR de 2004 (MAN, MNS et intensité)

Les données LiDAR de 2004 ont été inspectées pour s'assurer que la totalité des polygones côtiers ont été couverts et pour vérifier si des MAN exacts ont été construits. La classification erronée comme points « non-sol » des ouvrages côtiers dans les données LiDAR de 2003 ne s'est pas retrouvée, dans la plupart des cas, dans les données de 2004. Les cartes de MNS et de MAN ne montrent pas de signes de l'effet « de fil du bois » (figure 7). L'absence de cet artéfact résulte de la précision accrue du système de télémétrie laser Mark II utilisé lors des levés de 2004. Les données d'intensité des échos LiDAR ont servi à établir des cartes de la région du Parc national Kouchibouguac, ainsi qu'à la construction des cartes de MNS et de MAN (figure 7). Bien que l'intensité des échos provenant des bords de la zone balayée ait tendance à être plus faible que l'impulsion nadirale de certains systèmes LiDAR, les valeurs d'intensité de ces données sont constantes sur toute la fauchée, sauf pour les balayages nadiraux au-dessus de plans d'eau, ce qui permet d'établir des mosaïques d'intensités exemptes d'artéfacts majeurs entre les lignes de vol (figure 7).

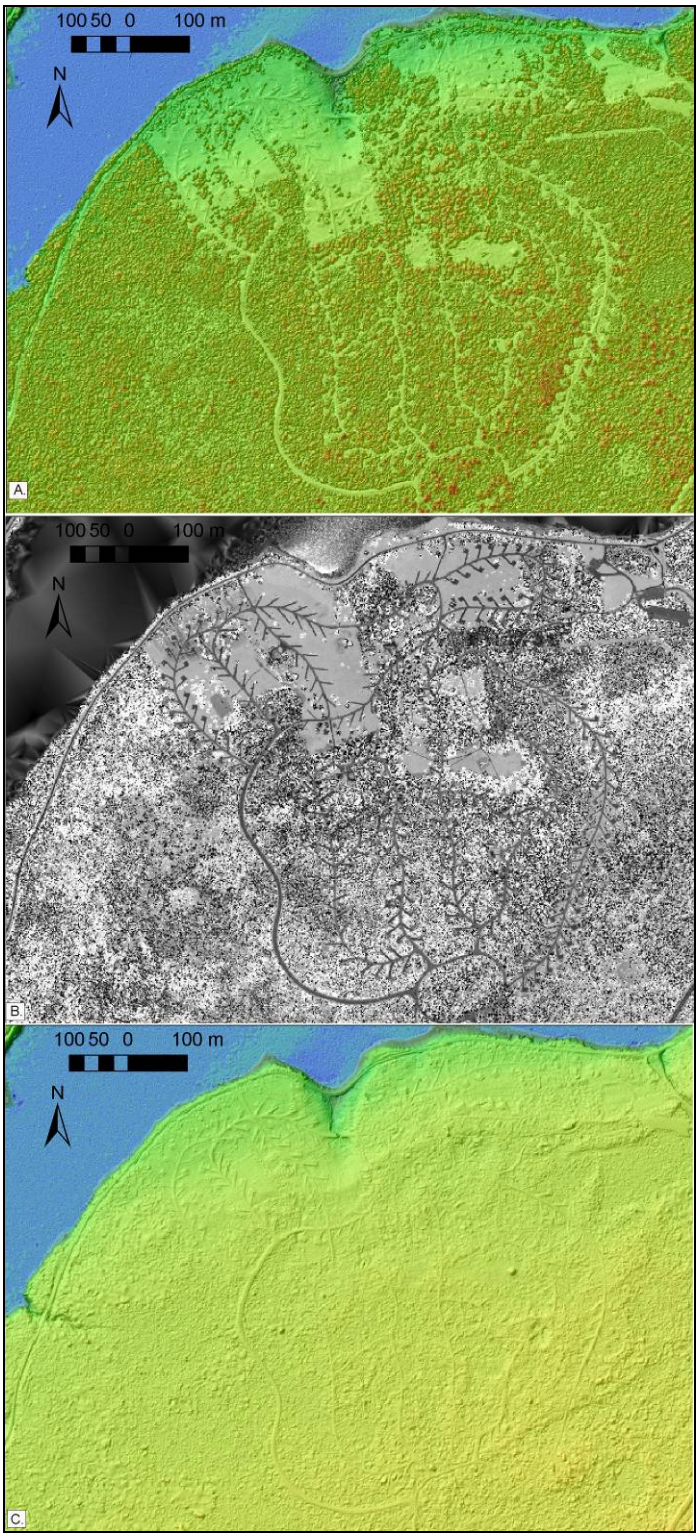


Figure 7. Exemples de surfaces issues des levés de 2004 par système LiDAR Mark II. On y voit le terrain de camping du parc national Kouchibouguac. A. MNS. B. Intensités de tous les échos réfléchis. C. MAN.

4.4.3.3 Validation des hauteurs LiDAR (données de 2003 et 2004)

Les données LiDAR de 2003 et de 2004 respectaient les spécifications d'après la comparaison des données GPS et des stations totalisatrices avec les points LiDAR et les MAN dérivés. Les statistiques sommaires de comparaison entre les données des MAN issues des points LiDAR de 2003 et les levés GPS sont présentées au tableau 2 et à la figure 8A. La différence moyenne des hauteurs entre les données GPS et celles du MAN pour les polygones de levés de 2003 est de 0,11 m avec un écart type de 0,11 m et une erreur type de 0,16 m.

Les statistiques sommaires de comparaison entre les données des MAN issues des points LiDAR de 2004 et les levés GPS sont présentées au tableau 3 et à la figure 8B. La différence moyenne des hauteurs entre les données GPS et celles du MAN pour les polygones de levés de 2004 est de 0,11 m avec un écart type de 0,08 m et une erreur type de 0,12 m.

En règle générale, les MAN de 2004 sont plus précis que ceux de 2003 avec des décalages moyens légèrement moins marqués et des écarts type plus faibles. Les données du MAN de 2004 sont plus exactes, grâce à la précision accrue du faisceau laser et à la plus grande exactitude de l'unité de navigation inertielle du système Mark II.

Tableau 2. Résultats de la validation des MAN de 2003

Polygone LiDAR	Différence moyenne (m) GPS - MAN	Écart type (m) GPS - MAN	Erreur type (m) GPS - MAN	Nombre de points GPS
Cap-Pelé	0,04	0,11	0,11	20 748
Cormierville	0,21	0,12	0,24	2426
Bouctouche	0,12	0,10	0,16	3125
Cap-Lumière	0,07	0,12	0,14	810

Tableau 3. Résultats de la validation des MAN de 2003

Polygone LiDAR	Différence moyenne (m) GPS - MAN	Écart type (m) GPS - MAN	Erreur type (m) GPS - MAN	Nombre de points GPS
Cap-Jourimain	0,10	0,09	0,14	1645
Shemogue	0,11	0,07	0,10	3333

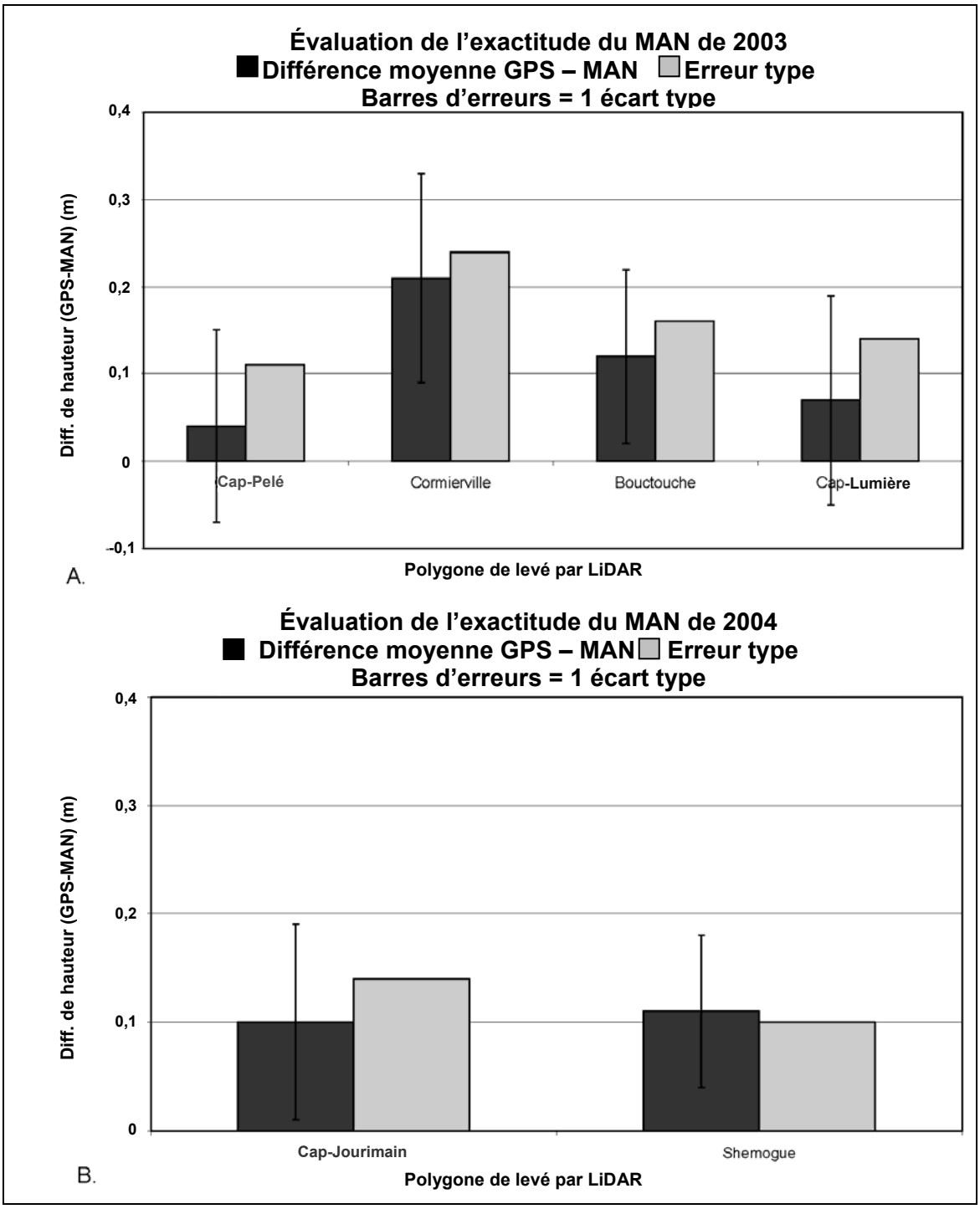


Figure 8. Représentation graphique des différences de hauteur entre le MAN LiDAR et les mesures GPS au sol. A. Différences GPS – MAN pour les polygones des levés de 2003. B. Différences GPS – MAN pour les polygones des levés de 2004.

4.4.3.4 Exemples de cartes des risques d'inondation (tempête de janvier 2000 plus élévation du niveau de la mer)

Les MAN LiDAR encochés ont été utilisés pour dresser les cartes des risques d'inondation en fonction de trois niveaux d'eau. Ces niveaux sont basés sur celui associé à la tempête de janvier 2000, établi à 2,5 m au-dessus du niveau du MAN, et sur la même tempête dans 100 ans, avec des niveaux relatifs de la mer projetés de 50 et de 70 cm au-dessus du niveau actuel. Ces cartes représentent les zones inondées par l'océan à un niveau de l'eau donné. Seules les zones basses qui communiquent directement avec l'océan ont été inondées. Un exemple de trois aires d'inondation (tempête de janvier 2000, même tempête dans 100 ans avec élévation du niveau relatif de la mer de 50 et de 70 cm) est présenté à la figure 9A pour la région de Petit-Cap près de Shemogue.

Des cartes de profondeur de l'eau dans les zones inondées ont été dressées pour mieux estimer les incidences éventuelles d'inondations en zone côtière sur l'économie et sur l'écosystème. La profondeur de l'eau a été calculée pour les trois niveaux mentionnés ci-haut (figure 9B). Les cartes de profondeur de l'eau de l'inondation de janvier 2000 ont été utilisées pour valider les résultats de la modélisation d'inondation. Certains membres du personnel d'Environnement Canada ont visité plusieurs communautés dans toute la région à l'étude pour évaluer les cartes d'aire d'inondation et de profondeur de l'eau. Les profondeurs de l'eau mesurées sur le terrain concordent avec les cartes de ce paramètre dressées pour la tempête de janvier 2000 et les écarts verticaux entre les deux sont inférieurs à 10 cm (R. Daigle, Environnement Canada, comm. pers., 2005).

Des cartes additionnelles des risques d'inondation ont été dressées pour chaque accroissement de 10 cm du niveau de l'eau, ce qui fournit ainsi une estimation plus précise des régions touchées par une éventuelle élévation des niveaux de la mer ou par une onde de tempête. Les aires d'inondation par incréments de 10 cm se présentent sous forme de polygones vectoriels représentant la zone touchée par l'inondation.

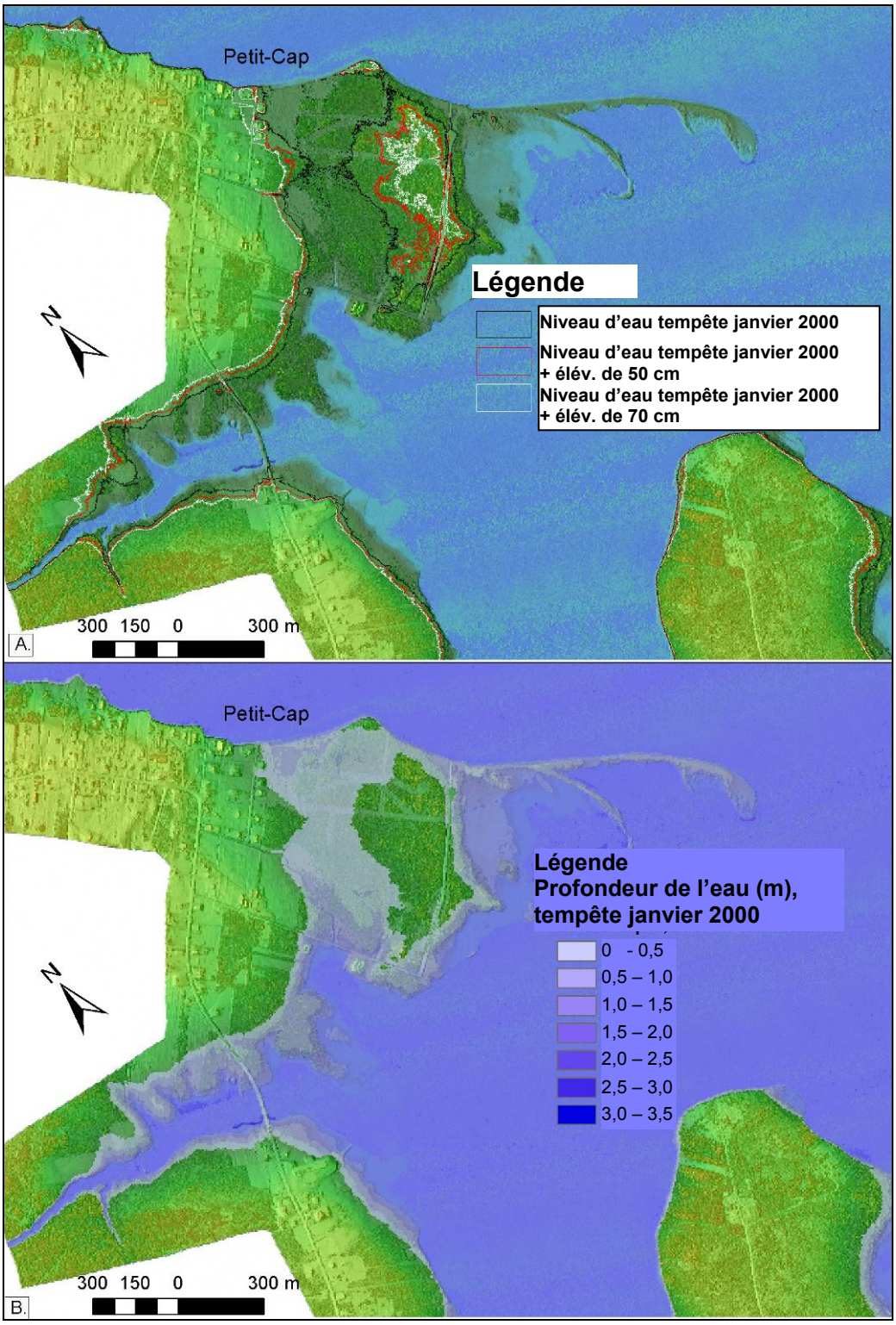


Figure 9. Exemples de cartes des risques d'inondation à Petit-Cap. A. Aire à risque lors de la tempête de janvier 2000 et lors d'une tempête du même ordre dans 100 ans, avec des élévations du niveau relatif de la mer projetées de 50 et de 70 cm. B. Profondeur de l'eau lors de la tempête de janvier 2000.

4.4.3.5 Visualisation des modèles altimétriques et des cartes des risques d'inondation

Pour visualiser l'inondation résultant d'une onde de tempête superposée à un niveau de la mer plus élevé, des séquences animées ont été construites pour certaines régions. Elles ont en arrière-plan une image constituée de la carte LiDAR couleur en relief par ombres portées ou d'une image satellite drapée sur le MNS pour simuler une vue en perspective du paysage. On élève ensuite le niveau de l'eau jusqu'à atteindre celui d'une onde de tempête ou d'un niveau plus élevé de la mer s'avançant à l'intérieur des terres. Le niveau de l'eau dans l'animation est élevé progressivement par incréments de 10 cm, jusqu'à atteindre 4 m au-dessus du CGVD28. Cette manière de présenter la modélisation des risques d'inondation est très efficace et aisément compréhensible par le grand public. On présente à la figure 10 un exemple de l'effet visuel de ces animations pour la région du havre de Shemogue. Une image satellite haute résolution Quickbird (DigitalGlobe) est drapée sur le MNS LiDAR au niveau normal de l'eau (figure 10A), puis on élève ce niveau jusqu'à celui de l'onde de tempête de janvier 2000 (figure 10B).

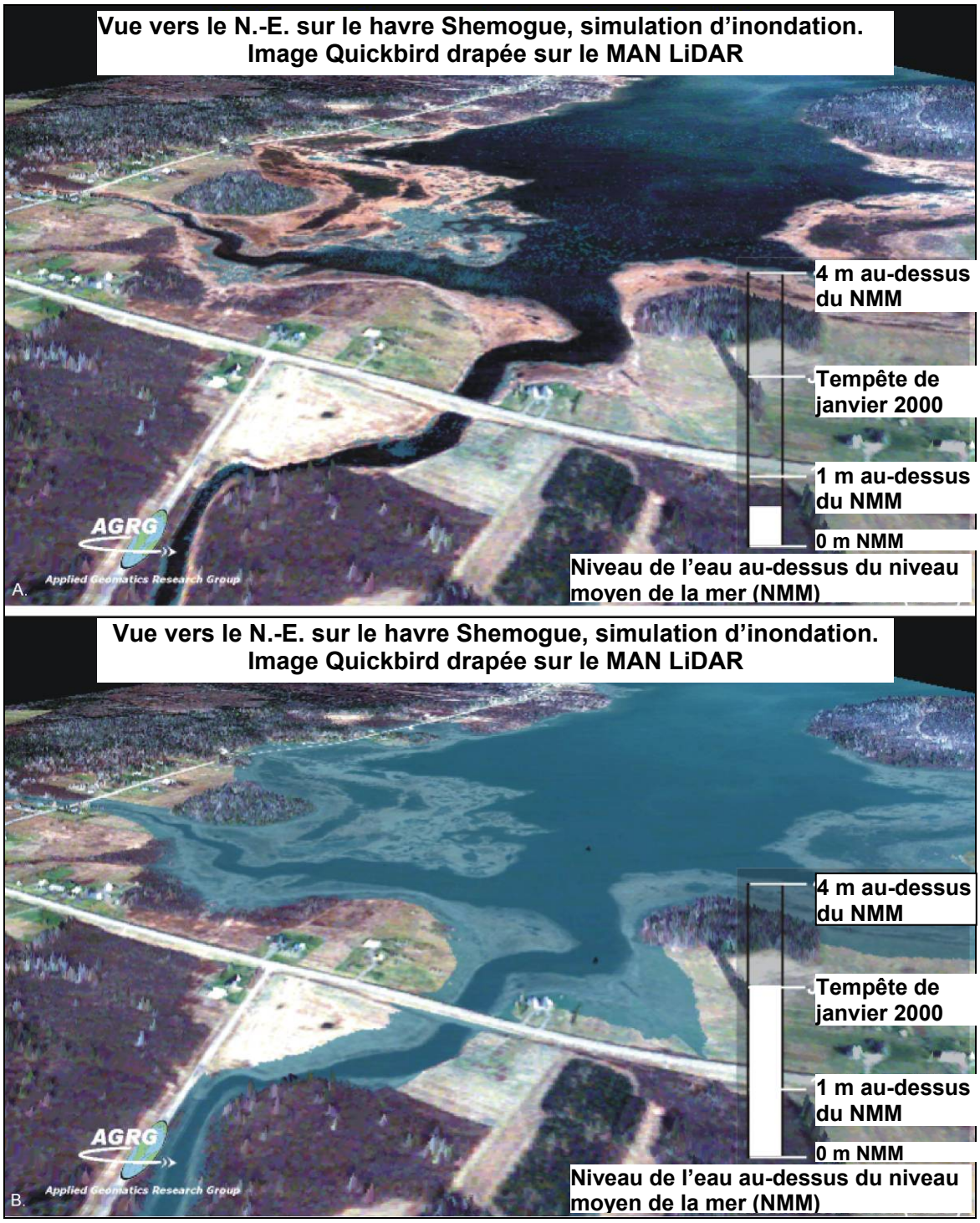


Figure 10. Exemple de représentation visuelle des risques d'inondation. A. Image satellite Quickbird en couleurs réelles drapée sur le MNS LiDAR, le niveau de l'eau est normal dans le cadre du cycle des marées. B. Niveau d'eau simulé d'après les données de l'onde de tempête de janvier 2000. Comprend des données (2004) © DigitalGlobe, Inc. Tous droits réservés.

4.4.3.6 Détection des changements le long de la Dune de Bouctouche (2003-2004)

Les résultats obtenus en soustrayant le MAN de 2003 de celui de 2004 pour la Dune de Bouctouche a permis de mettre en évidence des zones de changement le long du système dunaire (figure 11). La carte des changements de la surface montre les variations par incréments verticaux de 0,5 m et a été examinée pour y découvrir les zones où ces changements sont importants. La variation maximale d'altitude de la dune entre les levés est un abaissement de l'ordre de 3,2 m. La zone la plus touchée par les variations se trouve du coté est de la dune, qui fait face à la mer, comme on pourrait s'y attendre lors d'une onde de tempête. Deux zones ont été examinées en détail en fonction des occurrences de changements importants détectées avec les deux MAN (figure 11). Les variations les plus importantes sont survenues sur le flanc est de la dune, et on observe une zone de variations moindres à l'extrémité sud de la dune (figure 11A). La tempête a fait baisser la dune de plus de 3 m et la plage allant du pied de la dune à la mer de 0,5 m (figure 11 B, C). Les variations à l'extrémité sud sont moins importantes, la dune ayant baissé de 1 m et sa crête ayant reculé de plus de 15 m (figure 11 D, E).

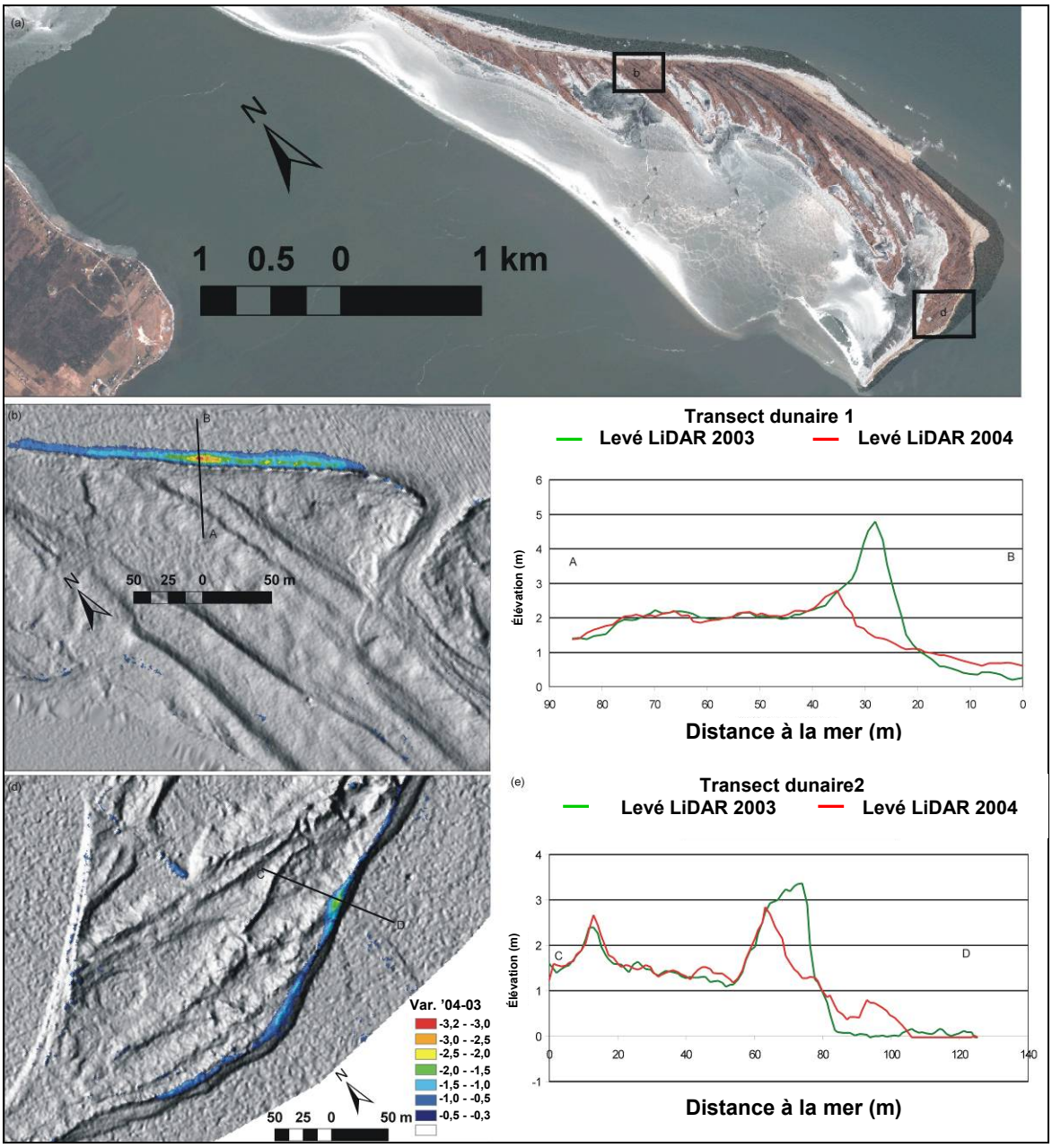


Figure 11. Détection des changements sur la Dune de Bouctouche entre 2003 et 2004. A. Image satellite Quickbird infrarouge en couleurs du système dunaire avec détail des variations (b et d). Comprend des données de 2004 © DigitalGlobe, Inc. Tous droits réservés. B. Variations verticales (en couleurs) de la dune entre 2003 et 2004 superposées au MAN LiDAR achromatique en relief par ombres portées. C. Profil de la dune en 2003 (vert) et en 2004 (rouge). D. Variations verticales (en couleurs) de la dune entre 2003 et 2004 superposées au MAN LiDAR achromatique en relief par ombres portées. E. Profil de la dune en 2003 (vert) et en 2004 (rouge).

4.4.4 Sommaire et conclusions

La cartographie par LiDAR implique l'émission depuis un aéronef d'impulsions laser orientées vers la terre et la mesure du temps requis par ces impulsions pour revenir à leur source. Le balayage laser est réalisé par la répétition rapide de l'impulsion laser et la déflexion du faisceau perpendiculairement à la trajectoire de vol à l'aide d'un miroir oscillant, ce qui produit un motif en zigzag de points laser sur les surfaces au sol exposées au rayonnement.

Des sondages LiDAR effectués en 2003 et en 2004 dans le sud-est du Nouveau-Brunswick ont servi de base à un modèle altimétrique numérique (MAN) à haute résolution qui illustre les zones inondables de la plupart des secteurs côtiers visés. D'autres produits LiDAR, à savoir des modèles numériques de surface (illustrant les bâtiments et les arbres) et des cartes de rétrodiffusion, ont également été créés pour les secteurs visés. Ces levés ont respecté les spécifications d'exactitude et fourni un échantillonnage de haute résolution le long du littoral, éléments nécessaires à l'établissement d'un MAN permettant de cartographier les risques d'inondation et la profondeur de l'eau lors de l'inondation. Les aires inondées et les profondeurs de l'eau associées à l'onde de tempête de janvier 2000 ont été qualitativement validées par des visites sur le terrain là où les niveaux d'eau atteints lors de cet événement sont connus. L'aire inondée associée à la tempête de janvier 2000 concorde généralement avec le modèle, tout comme la profondeur de l'eau, qui correspond généralement à 10 cm près aux profondeurs d'eau observées. Les données altimétriques du MAN sont celles du Plan de référence altimétrique du Canada 1928 (CGVD28), c'est-à-dire que le zéro orthométrique se trouve à une vingtaine de centimètres au-dessous du niveau moyen de l'eau mesuré par le marégraphe de Pointe-du-Chêne.

La trajectoire de l'eau dans les basses terres situées du côté terre des ponts-jetées et d'autres ouvrages connexes a été modélisée à l'aide de méthodes innovatrices, ce qui a permis de déterminer l'étendue possible des inondations à des intervalles de 10 cm jusqu'à un niveau d'eau correspondant à 4 m au-dessus du NMM. Ceci a permis de produire des animations et des simulations quasi continues. Cette capacité de générer une séquence complète de niveaux d'eau offrira aux planificateurs de mesures d'urgence un accès à plus d'informations pour la conception de plans d'urgence et de mesures d'adaptation aux changements climatiques.

Les levés LiDAR répétés à la Dune de Bouctouche ont permis d'évaluer la valeur de cette technologie pour la mesure des changements dans un système dunaire. De nombreuses variations ont été cartographiées entre les MAN de 2003 et de 2004. Les changements de la morphologie de la dune sont dus à l'importante tempête des 19 et 20 février 2004, qui a entraîné des niveaux d'eau plus élevés que la normale. La précision de la technologie LiDAR permet de détecter des variations décimétriques de l'altitude des entités côtières, comme le montre l'érosion des crêtes dunaires révélée par la présente étude.

En résumé, les cartes topographiques établies par LiDAR aéroporté ont permis de produire le MAN à haute résolution nécessaire à l'évaluation des risques d'inondation et d'érosion pour toutes les autres composantes du projet.

4.4.5 Remerciements

L'acquisition des données LiDAR a été financée par Environnement Canada et le Fonds d'innovation de l'Atlantique de l'Agence de promotion économique du Canada atlantique par l'entremise du Nova Scotia Community College (NSCC). Les données de validation ont été acquises par l'Applied Geomatics Research Group (AGRG) du NSCC et par la Commission géologique du Canada (CGC). L'imagerie QuickBird™ pour le littoral du Nouveau-Brunswick a été acquise en collaboration avec Gavin Manson (CGC) grâce à un financement dans le cadre du Programme des IGOT de l'Agence spatiale canadienne. Nous tenons à remercier David Finley et Bernier Conners, de Services Nouveau-Brunswick, pour les informations géodésiques de validation et les orthophotos numériques. Nous remercions aussi les étudiants de l'AGRG de 2002 à 2005 qui ont collaboré aux travaux sur le terrain et à la réduction de données; David Frobel, Gavin Manson et Paul Frase (CGC), qui ont contribué aux levés sur le terrain; Jennifer Strang (anciennement de la CGC), qui a produit les données de profils du cordon littoral et de la crête dunaire. Nous remercions finalement Bob Maher et Roger Mosher, de l'AGRG, ainsi que Gavin Manson et Dustin Whalen, de la CGC, pour leurs consultations et leur appui au projet.

4.4.6 Références

Brennan, R., et T.L. Webster. 2006. An Evaluation of LiDAR Intensity for Landcover classification. *Canadian Journal of Remote Sensing Symposium*, **32** (2), 167-172.

Brock, J.C., C.W. Wright, A.H. Sallenger, W.B. Krabill et R.N. Swift. 2002. Basis and methods of NASA airborne topographic mapper surveys for coastal studies. *Journal of Coastal Research*, Vol. **18**, p. 1-13.

Church, J.A., J.M. Gregory, P. Huybrechts, M. Kuhn, K. Lambeck, M.T. Nhuan, D. Qin et P.L. Woodworth. 2001. Changes in sea level. Chapitre 11 de *Climate change 2001: the scientific basis.* Contribution du Groupe de travail I au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge et New York, p. 639-693.

Dickie, S. 2001. *Storm-surge innundation mapping for Charlottetown, Prince Edward Island: Analysing flood risk using high-resolution imagery*. Rapport non publié de l'Applied Geomatics Research Group, NSCC, Middleton, N.-É.

Forbes, D.L., G.S. Parkes, G.K. Manson et L.A. Ketch. 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, Vol. **210**, p. 169-204.

Galy, H.M. et R.A. Sanders., 2002. Using synthetic aperture radar imagery for flood modelling. *Transactions in GIS*, Vol. **6**, no. 1, p. 31-42.

Guenther, G.C., M.W. Brooks et P.E. LaRocque. 2000. New capabilities of the SHOALS airborne bathymeter. Remote sensing of the Environment, Vol. **73**, p. 247-255.

Hwang, P.A., W.B. Krabill, W. Wright, R.N. Swift et E.J. Walsh. 2000. Airborne scanning measurement of ocean waves. Remote sensing of the Environment, Vol. **73**, p. 236-246.

Krabill, W.B., et C.F. Martin. 1987. Aircraft positioning using global positioning system carrier phase data. Navigation, Vol. **34**, p. 1-21.

Krabill, W.B., C. Wright, R. Swift, E. Frederick, S. Manizade, J. Yungel, C. Martin, J. Sonntag, M. Duffy et J. Brock. 1999. Airborne laser mapping of Assateague National

Seashore Beach. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. **66**, p. 65-71.

Levés géodésiques du Canada www.geod.nrcan.ca/index_e/products_e/software_e/gpsht_e.html, consulté en mai 2003.

Maas, H.G., 2000. Least-Squares Matching with Airborne Laserscanning Data in a TIN Structure. *International Archives of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **33** (B3/1), 548-555.

Maas, H.G., 2002. Methods for Measuring Height and Planimetry Discrepancies in Airborne Laserscanner Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **68** (9), 933-940.

MacKinnon, E. 2004. Three dimensional flood modelling with . Rapport non publié d'Applied Geomatics Research. 200 p.

McCulloch, M.M., D.L. Forbes, R.W. Shaw et l'équipe scientifique A041 du FACC. 2002. *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island*. Sous la dir. de Forbes, D.L., et R.W. Shaw. Commission géologique du Canada, dossier public 4261, xxxiv + 62 p. and 11 documents d'appui (sur CD-ROM).

O'Reilly, C. 2000. Defining the coastal zone from a hydrographic perspective. *Proceedings, Workshop on risk assessment and disaster mitigation: Enhanced use of risk management in integrated coastal management*. International Ocean Institute, Bermuda. *Backscatter*, avril 2000, p. 20-24

Parkes, G.S., et L.A. Ketch. 2002. Storm-surge climatology. In *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island*. Sous la dir. de Forbes, D.L., et R.W. Shaw. Commission géologique du Canada, dossier public 4261, document d'appui 2, 87 p. (sur CD-ROM).

Parkes, G.S., L.A. Ketch et C.T. O'Reilly. 1997. Storm-surge events in the Maritimes. Actes de la *Conférence canadienne sur le littoral 1997*. Canadian Coastal Science & Engineering Association, Guelph, Ontario, p.115-129.

Sallenger, A.B., Jr., W. Krabill, J. Brock, R. Swift, M. Jansen, S. Manizade, B. Richmond, M. Hampton et D. Eslinger. 1999. Airborne laser study quantifies El Niño- induced coastal change. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, Vol. **80**, p. 89, 92.

Stockdon, H.F., A.H. Sallenger, J.H. List et R.A. Holman. 2002. Estimation of shoreline position and change using airborne topographic data. *Journal of Coastal Research*, Vol. **18**, No. 3, p. 502-513.

Webster, T.L. 2005. LiDAR validation using GIS: A case study comparison between two LiDAR collection methods. *Geocarto International*, **20** (4), 11-19.

Webster, T.L. and Dias, G. 2006. An automated GIS procedure for comparing GPS and proximal LiDAR ground elevations. *Computers & Geosciences*, **32** (6), 713-726.

Webster, T.L. and Forbes, D.L. 2006. Airborne laser altimetry for predictive modelling of coastal storm-surge flooding. In *Remote sensing of aquatic coastal ecosystem processes: Science and management applications* (Richardson, L. and LeDrew, E., Editors). Remote Sensing and Digital Image Processing Series, Vol. 9, Springer, 325 p.

Webster, T.L., Forbes, D.L., Dickie, S., Covill, R. and Parkes, G.S. 2002. Airborne imaging, digital elevation models and flood maps. In *Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island* (Forbes, D.L. and Shaw, R.W., Editors). Open File 4261, Supporting Document 8, Geological Survey of Canada, 36 pp. (on CD-ROM).

Webster, T.L., Forbes, D.L., Dickie, S. and Shreenan, R. 2004a. Using topographic LiDAR to map flood risk from storm-surge events for Charlottetown, Prince Edward Island, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*, **30** (1), 1–13.

Webster, T.L., Christian, M., Sangster, C. and Kingston, D. 2004b. High-resolution elevation and image data within the Bay of Fundy coastal zone, Nova Scotia, Canada. In *GIS for coastal zone management* (Bartlett, D. and Smith, J., Editors). CRC Press, Boca Raton, Florida, pp.195–218.

Webster, T.L., Forbes, D.L., MacKinnon, E. and Roberts, D. 2006. Flood-risk mapping for storm-surge events and sea-level rise using LiDAR for southeast New Brunswick. *Canadian Journal of Remote Sensing.* **32** (2), 194-211

Wehr, A., et U. Lohr. 1999. Airborne laser scanning – An introduction and overview. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. **54**, p. 68-82.

4.5 Érosion des côtes

Stéphane O'Carroll[1], Dominique Bérubé[1]*, Donald L. Forbes[2], Alan R. Hanson[3], Serge Jolicoeur[4] et Amélie Fréchette[5]

[1]Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick, Direction des études géologiques, C.P. 50, Bathurst, Nouveau-Brunswick, Canada E2A 3Z1
[2]Commission géologique du Canada (Atlantique), Ressources naturelles Canada, C.P. 1006, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada B2Y 4A2
[3]Service canadien de la faune (Atlantique), Environnement Canada, C.P. 6227, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada E4L 1G6
[4]Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton, Campus de Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada E1A 3E9
[5]Parc national Kouchibouguac, Parcs Canada, 186, route 117, Kouchibouguac, Nouveau-Brunswick, Canada E4X 2P1

*contact avec l'auteur [courriel: Dominique.Berube@gnb.ca].

4.5.1 Introduction

L'un des impacts potentiels du changement climatique est l'élévation rapide du niveau de la mer et l'érosion subséquente de terrains à grande valeur écologique, économique ou culturelle. Dans le sud-est du Nouveau-Brunswick, les communautés côtières sont préoccupées par cette éventualité puisque l'érosion et la hausse du niveau de la mer ont déjà mené à d'importantes pertes de terrain, et les moyens pour lutter contre ces phénomènes sont limités et souvent coûteux. Une autre préoccupation des communautés est de connaître le moment précis de l'accélération de ce recul anticipé par les chercheurs.

D'après les diverses études d'érosion publiées pour le sud-est du Nouveau-Brunswick, les taux de recul côtier n'auraient pas significativement augmenté au cours de la seconde moitié du XX^{e} siècle. Cependant, la situation pourrait avoir changé depuis quelques années alors que les tempêtes ont été plus fréquentes et intenses, et qu'elles ont mené à de forts reculs de la côte dans plusieurs secteurs de la région. Le prochain défi pour les scientifiques sera donc de déterminer si la récente augmentation des taux de recul côtier traduit un accroissement réel et durable du rythme d'érosion à long terme et, le cas échéant, s'il peut être directement associé au changement climatique.

4.5.1.1 Objectifs de cette composante

Pour les scientifiques qui participaient à cette composante du projet, le premier objectif était de rassembler les résultats des diverses études d'erosion des côtes publiées pour le sud-est du Nouveau-Brunswick (section 4.5.2), et de produire de nouvelles études pour les secteurs où les tendances et les impacts de l'érosion n'étaient pas bien documentés (section 4.5.3). Le deuxième objectif était d'élaborer des scénarios sur ce que pourrait être la situation de l'erosion des côtes au cours des 100 prochaines années. Finalement, le dernier objectif était de familiariser les communautés côtières (transferts de connaissances) avec les concepts d'érosion et de migration de la côte, au moyen

d'ateliers publics, et de rendre accessibles les anciens taux d'érosion de la côte ainsi que les nouvelles données d'évolution acquises dans le cadre de ce projet.

Les premier et troisième objectifs ont été réalisés. Le deuxième objectif n'a été que partiellement atteint en raison du manque de données géoscientifiques pour la région, en particulier sur l'état des stocks de sédiments dans la zone littorale. Les scientifiques membres de cette composante sont toutefois satisfaits de l'avancée des connaissances qu'a permise la réalisation de cette étude, et ils espèrent que les informations présentées dans les sections qui suivent apporteront à tous ses utilisateurs des éclairages complémentaires, et parfois nouveaux, sur l'évolution récente et future des côtes du sud-est du Nouveau-Brunswick.

4.5.1.2 Érosion versus accumulation

L'augmentation de la vitesse du vent du large sur de courtes périodes (quelques heures à quelques dizaines d'heures) engendre des vagues énergétiques qui s'abattent à la côte. Cette combinaison de facteurs est considérée comme la plus importante cause de l'erosion des côtes. Une autre cause significative contribuant au recul des côtes est l'élévation du niveau de la mer relatif, qui permet aux vagues d'atteindre des terrains qui étaient autrefois hors de leur portée. Il est bien connu que l'erosion des côtes n'est pas un phénomène nouveau ni isolé. Les premières manifestations de l'erosion des côtes sont probablement survenues lors de la formation des premiers océans, il y a environ quatre milliards d'années. Toutefois, les «problèmes» engendrés par l'érosion des côtes sont probablement survenus peu de temps après le développement des premières communautés côtières permanentes, il y a environ 3 500 ans. L'occupation d'un milieu autant dynamique et changeant que la zone littorale donne inévitablement naissance à des situations conflictuelles entre la mobilité naturelle du milieu côtier et le désir de profiter, voire de faire perdurer les occasions économiques, stratégiques, sociales et culturelles qu'offre la côte.

Dans le sud-est du Nouveau-Brunswick, plusieurs problèmes d'érosion auraient pu être évités au cours du XX^{e} siècle si les promoteurs ou gestionnaires du développement côtier avaient eu une meilleure connaissance de la dynamique côtière et des processus à la base de l'érosion. En fait, l'érosion des côtes entraîne non seulement l'enlèvement de sédiments et la destruction de formes littorales, mais aussi une réorganisation de ces sédiments ailleurs le long des côtes; le transport et l'accumulation mènent souvent à la création de nouvelles formes littorales. Ce concept est important puisqu'il suggère que les impacts de l'érosion ne sont pas limités aux seuls sites marqués par ce processus, et que les conséquences de l'érosion ne sont pas toujours négatives. Dans un contexte de changement climatique et d'élévation rapide du niveau de la mer, le processus d'érosion peut même contribuer à la conservation des formes littorales; en voici deux exemples :

- Dans les secteurs caractérisés par des falaises, l'érosion et le recul de la côte mènent inévitablement à la destruction et à la disparition progressive des terres côtières. En contrepartie, les sédiments qui sont soustraits à ces terres s'accumulent généralement sur les rivages et contribuent au maintien, au déplacement, voire à la formation de nouvelles plages. Le recul des falaises crée aussi l'espace nécessaire au déplacement des plages en direction des terres; un processus essentiel à leur conservation dans un contexte d'élévation du niveau de la mer. En limitant les transferts de sédiments et la création de

nouveaux espaces, l'aménagement de structures de protection côtière le long des falaises représente, dans plusieurs régions, la cause principale de la disparition des plages et de leurs habitats.

- Dans les secteurs caractérisés par des dunes littorales, le processus d'érosion et de recul côtier a parfois comme résultat la destruction complète des dunes, mais mène le plus souvent à leur relocalisation. En fait, au cours des phases d'érosion, une portion des sédiments arrachés aux dunes peut être transférée sur les rivages, contribuant à la formation des plages. En retour, ces plages fournissent les sédiments nécessaires à leur reconstruction. Une autre portion des sédiments arrachés aux dunes peut être transférée vers l'arrière des dunes, contribuant à leur élargissement et à leur migration en direction des terres. Tout comme pour les falaises, les structures fixes aménagées sur les dunes (bâtiments, routes) gênent les transferts de sédiments et représentent, dans plusieurs régions, la cause principale de la disparition de ces formes littorales et de leurs habitats.

Ces deux cas de figure illustrent bien l'ampleur et la complexité des interactions dans la zone littorale, notamment les interactions engendrées par les processus d'érosion et d'accumulation. Alors qu'on pourrait être tenté de qualifier l'érosion et le recul côtier comme étant des «problèmes» à solutionner, dans plusieurs cas, ces processus sont nécessaires au maintien et à l'évolution de nombreux environnements côtiers.

4.5.1.3 Index de sensibilité à l'érosion

La sensibilité des côtes à l'érosion par les vagues de tempêtes varie d'une région à l'autre en raison de facteurs géologiques, géomorphologiques, océanographiques et anthropiques. Dans le but d'évaluer cette sensibilité, la Direction des études géologiques du ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick a conçu en 1996 un index qui pondère l'influence relative de six facteurs en période de tempête : la longueur du fetch et la largeur de la zone de brisants; l'orientation, la composition et la hauteur du relief à la côte; et la distribution des structures de protection. Il y a 273 secteurs côtiers, correspondant aux cartes topographiques numériques à 1 :10000 de Services Nouveau-Brunswick, qui ont été inclus dans l'étude (O'Carroll, 1996; O'Carroll et Bérubé, 1997). La méthodologie et les résultats sont résumés sur une affiche en fin de rapport (Section 5, Annexe C).

Cette étude a montré que la longueur du fetch et la profondeur de l'eau à la côte semblent jouer un rôle déterminant dans le degré de sensibilité du littoral aux vagues de tempête. Ainsi, la côte sud-est de la province (détroit de Northumberland) serait moins sensible à l'érosion par les vagues de tempête que la côte nord-est (golfe du Saint-Laurent), mais plus sensible que la côte nord (baie des Chaleurs); l'effet de protection qu'offre l'Île-du-Prince-Édouard réduit significativement la longueur du fetch et la profondeur de l'eau à la côte est plutôt faible le long du détroit. Dans la région du sud-est, le degré de sensibilité augmente de manière significative au nord de Cocagne, surtout en raison de l'accroissement de la longueur du fetch, mais aussi en raison de la diminution de la largeur de la zone de brisants. Ainsi, 10 des 14 secteurs côtiers de cette région qui sont caractérisés par une sensibilité de forte à très forte se trouvent au nord de Cocagne. Dans le cas des secteurs caractérisés par une faible sensibilité, la majorité (5 secteurs

sur 8) se trouve également au nord de Cocagne et ces secteurs sont associés à de longs estuaires, protégés des vagues énergétiques lors de tempêtes.

En dépit des limites évidentes de l'index, il constitue néanmoins un outil d'aide à la prise de décisions offrant une vue d'ensemble de la sensibilité des côtes aux vagues de tempête.

4.5.1.4 Base de données sur l'érosion

Plusieurs études d'erosion des côtes ont été produites pour le Nouveau-Brunswick au cours des 50 dernières années. Dans le but de rendre cette information accessible aux citoyens, aux gestionnaires et aux autres intervenants dans le domaine côtier, le ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick (Direction des études géologiques) a créé en 1998 la *Base de données sur l'érosion des côtes du Nouveau-Brunswick* (BDEC-NB). Élaborée à l'aide du logiciel *Microsoft-Access*, la BDEC-NB contient des détails sur les sites d'étude (localisation, géomorphologie et sensibilité), les tendances d'évolution (taux, périodes et marges d'erreur) et la source des mesures (année, auteurs et publication). Bien que la BDEC-NB ait été faite principalement pour l'identification et le suivi des sites en érosion, elle présente aussi des informations sur les sites en accumulation ou en apparente stabilité.

Avant l'ajout des résultats obtenus dans le cadre de cette composante, la BDEC-NB comptait pour le sud-est du Nouveau-Brunswick (Pointe-Sapin à Port Elgin) un total de 968 taux du déplacement côtier (exprimés en m/an), dont 716 (74 %) associés à des sites en érosion, 224 (23 %) à des sites en accumulation et 28 (3 %) à des sites apparemment stables. Au terme de la présente étude (Kouchibouguac à Shemogue), 1 654 nouveaux taux seront ajoutés à la BDEC-NB, dont 1 207 (73 %) associés à des sites en érosion, 428 (26 %) à des sites en accumulation et 19 (1 %) à des sites apparemment stables. Cette catégorisation simple, de premier ordre (érosion – accumulation – apparente stabilité), met déjà en évidence le caractère global de l'évolution récente des côtes du Nouveau-Brunswick : les secteurs en érosion sont nettement plus nombreux que les secteurs influencés par les autres types d'évolution.

Consultée de concert avec les cartes numériques multidates produites dans le cadre de ce travail, la *Base de données sur l'érosion des côtes* constitue un outil d'aide à la prise de décisions d'autant plus efficace que ces cartes d'érosion permettent de visualiser et de mettre en contexte les taux de retrait ou d'avancée avec les formes de terrain de la zone littorale.

4.5.2 Travaux antérieurs sur les tendances et les impacts de l'érosion

Les données des taux calculés de recul et d'avancée de la côte présentés dans cette section ont été obtenus à partir de méthodes et techniques fréquemment utilisées dans le passé par les scientifiques et les chercheurs. Les résultats de ces différentes études sont présentés ici afin de dresser le portrait de l'étendue et du cheminement qu'ont empruntés les différentes disciplines œuvrant dans le domaine de la gestion et de la compréhension de la zone littorale au Nouveau-Brunswick. Une attention particulière est portée aux études photogrammétriques, étant donné l'amélioration soutenue qu'a connue cette méthode au fil des années. Certaines mesures et taux obtenus dans le cadre de ces études divergent de nos résultats, et nous semblent parfois erronés. Toutefois, ces

travaux antérieurs ont le mérite d'avoir suscité l'intérêt de plusieurs scientifiques parmi nous et nous offrent un aperçu de l'évolution des connaissances tout en permettant, dans plusieurs cas, d'apporter un complément d'information sur des sites précis où des études fines ont été menées.

Les lecteurs et lectrices sont donc invités à lire cette entrée en matière avec toutes les précautions qui s'imposent. La BDEC-NB (voir section 4.5.1.4) constitue la source d'information la plus actuelle sur les taux de recul et d'avancée de la côte; elle archive aussi les données anciennes qui sont présentées dans la section qui suit.

4.5.2.1 Études régionales

4.5.2.1.1 Construction d'un pont-chaussée

À la fin des années 1950, la Division géographique du ministère des Mines et des Services techniques du Canada a mené un projet de cartographie afin d'évaluer les impacts potentiels d'un changement du niveau des marées hautes prévu par suite de la construction d'un pont-chaussée entre l'Île-du-Prince-Édouard et le Nouveau-Brunswick (Forward *et al.*, 1959; Forward et Raymond, 1960). L'un des objectifs du projet était de mesurer les taux historiques de recul côtier, à partir de travaux d'arpentage et de photogrammétrie, afin de mieux prévoir les éventuels dommages aux propriétés côtières. À la fin du projet, les auteurs ont estimé que la valeur totale des indemnités à verser aux propriétaires des terrains le long du détroit de Northumberland serait de 2 924 000 $. Des sommes supplémentaires devaient aussi être prévues afin de couvrir les coûts reliés à d'éventuels travaux de réparation le long des ponts et quais, ainsi que pour la construction de structures de protection côtière recommandée dans le cas de certaines communautés.

Les travaux d'arpentage et de photogrammétrie réalisés durant le projet ont généré une trentaine de taux de recul côtier pour le sud-est du Nouveau-Brunswick (Pointe-Sapin à Port Elgin). Ces données indiquent que le recul des falaises a été de 1,12 m/an entre le milieu des années 1930 et la fin des années 1950. Parmi les plus forts reculs côtiers mesurés dans la région, la limite d'une propriété située le long de Rayworth Beach dans la baie Verte a reculé de 113 m entre 1935 et 1958. Le recul de la ligne de propriété aurait été particulièrement rapide en 1938, année qui a été marquée par l'une des plus importantes tempêtes côtières (25 novembre) de l'histoire de la province.

4.5.2.1.2 Extraction industrielle de sable

Durant les années 1970, la Division des ressources minérales du ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick a mené, par l'entremise d'un consultant, un projet de cartographie documentant les impacts de l'extraction industrielle de sable des côtes nord et est de la province (Hunter, 1975). Le consultant a déterminé que, bien que l'extraction de sable ne fût pas la seule cause de l'érosion des plages et des dunes, cette pratique menait néanmoins à des dommages très importants à ces milieux. Par exemple, dans le sud-est du Nouveau-Brunswick (Cap-Lumière à Petit-Cap), le consultant a estimé que près de 170 000 m^3 de sable avaient été extraits des côtes sableuses entre 1968 et 1974; ces données ne tenaient pas compte des activités illégales d'extraction (sans permis de la province), une pratique relativement commune à cette époque.

À la suite du dépôt de l'étude, la *Loi sur l'exploitation des carrières* a été modifiée afin de limiter et d'encadrer les activités d'extraction dans l'ensemble de la zone littorale (terres

publiques et privées). L'une des conséquences positives de la nouvelle réglementation a été d'éliminer toutes les carrières et toutes les sablières le long des côtes, et de rendre obligatoire le rejet du sable sur les rivages adjacents aux infrastructures portuaires afin de réduire les problèmes d'érosion. En plus d'avoir généré les données nécessaires au changement de la *Loi*, ce projet a fourni à la province un très grand nombre de données (près de 600 taux) sur les tendances du recul côtier. Ces données ont montré que, entre le milieu des années 1940 et le début des années 1970, les plages, dunes et falaises du sud-est de la province ont migré en direction des terres à un rythme de 0,79, de 1,15 et de 0,78 m/an, respectivement.

4.5.2.1.3 Installation de murs de protection

Au début des années 1990, la Division des ressources minières et de l'énergie du ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick a mené un projet de cartographie de terrain afin de décrire la géomorphologie du littoral entre Cap-Lumière et Port Elgin (Bérubé et Thibault, 1996, 1998). L'un des objectifs du projet était de mettre à jour les cartes géomorphologiques de Hunter (1975), en incluant cette fois le littoral des estuaires. Ce projet a montré que la ligne de rivage de cette région n'était pas uniquement formée de plages (49%) ou de plates-formes (rocheuses) littorales (6%), mais qu'elle était également formée de marais maritimes (45%).

Ce projet a aussi révélé que dans le but de protéger les bâtiments, les routes et les quais contre l'érosion, près de 10 % de la côte de la région avait été fortifiée à l'aide d'enrochement ou de murs de rétention (Bérubé, 1993). En fait, près de 600 structures de protection côtière, de longueur et de type différents, ont été répertoriées dans le cadre de cette campagne de terrain. Les secteurs à plus forte densité (plus de 2,5 km de structures de protection par 10 km de côte) ont été recensés le long du littoral entre Bouctouche et Barachois; à lui seul, le secteur de Shediac s'est avéré le plus fortifié. Les secteurs à plus faible densité (moins de 1 km de structures de protection par 10 km de côte) ont été recensés le long du littoral entre Petit-Cap et Port Elgin, ainsi qu'au nord de Saint-Édouard-de-Kent. L'auteur a cependant conclu que la répartition des structures de protection était surtout indicatrice de la densité du développement côtier, et non pas d'une erosion des côtes plus accentuée.

Un autre objectif de ce projet était de mettre à jour les taux de recul côtier pour la région à l'étude. Ce travail a été effectué à partir d'analyses photogrammétriques, réalisées en collaboration avec des étudiants du Département d'histoire et de géographie de l'Université de Moncton. À partir de 60 mesures d'érosion effectuées entre Cap-Lumière et Port Elgin, l'étude de Tremblay (1993) a montré qu'entre 1945 et 1983, les dunes, les falaises et les marais maritimes de la région reculaient à un taux de 1,21, de 0,43 et de 0,31m/an, respectivement. L'étude de Roberge (1994), basée sur 14 mesures d'érosion effectuées dans la partie est du Cap-Jourimain, a quant à elle montré qu'entre 1933 et 1993, les falaises meubles et rocheuses ainsi que les cordons sableux (dunes et flèches littorales) du secteur reculaient à un taux de 0,60, de 0,28 et de 2,51 m/an, respectivement.

4.5.2.2 Études locales

4.5.2.2.1 Évolution des cordons sableux

Plusieurs études ont été produites sur l'évolution des grands cordons sableux de la côte sud-est du Nouveau-Brunswick que sont le système d'îles-barrières du parc national Kouchibouguac et la flèche littorale de Bouctouche. Dans le cas des cordons sableux dunifiés de Kouchibouguac, les travaux de maîtrise et de doctorat de Dagneau (1996, 2002) indiquent que l'ensemble de ce système d'îles-barrières se déplace en direction des terres, mais que la zone centrale du système montre un certain équilibre entre l'apport de sédiments, la reconstruction des dunes, l'ouverture et le colmatage de goulets de marée et l'effet érosif des tempêtes côtières. Plusieurs sections de dunes littorales de la zone centrale connaîtraient même une tendance contraire à celle normalement observée ailleurs le long des côtes du Nouveau-Brunswick, à savoir une avancée vers la mer. D'autre information concernant l'évolution du système des îles-barrières de Kouchibouguac est présentée à la section 4.5.3.1 de ce rapport.

Trois ouvrages majeurs traitent du mode d'évolution de la flèche de Bouctouche et des côtes adjacentes : la thèse de doctorat de Ollerhead (1993), et les trois articles qui en furent issus (Ollerhead *et al.*, 1994; Ollerhead et Davidson-Arnott, 1995 a et b) ; le mémoire de maîtrise de Chiasson (2000); le mémoire de maîtrise de Giangioppi (2004). Les travaux de Ollerhead, basés sur la datation C^{14} de sédiments de marais maritimes et sur la datation optique de sédiments de dunes, indiquent que ce système côtier serait âgé de 2 200 ans et que la mise en place de la plus ancienne dune daterait d'il y a 800 ans. Le mémoire de Chiasson a pour sa part souligné l'importance de l'élaboration d'un plan de suivi environnemental pour la flèche, afin de mieux comprendre son mode d'évolution actuel et de protéger ses habitats des activités anthropiques qui menaceraient son intégrité. Enfin, les travaux de Giangioppi ont porté sur le budget sédimentaire de la flèche littorale, la description et le suivi des brèches et autres formes de terrain associées aux événements de tempête, ainsi que sur le déplacement récent du trait de côte (1945 à 2001). Les principales cartes générées à partir de ses travaux ont été publiées au ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick (Giangioppi *et al.* 2002 a et b) et sont présentées à l'annexe C du présent rapport (section 5). D'autre information concernant l'évolution du système des îles-barrières de Kouchibouguac est présentée à la section 4.5.3.1 de ce rapport.

Barre de Cocagne

La barre de Cocagne est une ancienne flèche littorale située le long de la côte de Cormierville, à environ 8 km au nord de Cocagne. En raison de son caractère dynamique, ce système sableux est un site idéal pour l'étude des variations à court terme du recul côtier (périodes de 5 à 15 ans). Les informations tirées à partir d'échelles de temps très courtes sont précieuses puisqu'elles aident, entre autres, à cibler les périodes pour lesquelles les impacts des tempêtes côtières ont été les plus sévères, ou pour lesquelles l'apport en sédiments a été insuffisant au maintien de la stabilité ou à la croissance des systèmes sableux. La barre de Cocagne a été étudiée pour la première fois par Hunter (1975) qui a suggéré, à la suite de l'examen détaillé de la plate-forme littorale, que cette flèche était sans aucun doute une relique d'une flèche littorale beaucoup plus longue (anciennement 3 km comparativement à 1 km aujourd'hui). Son étude photogrammétrique a montré que la partie proximale de la flèche se déplaçait rapidement en direction des terres (1945-1971: -2,23 m/an), et que sa partie médiane

avait été à l'occasion utilisée comme site d'extraction de sable (en 1968 et 1969 : 1 280 m^3/an).

Dans le but de comprendre l'évolution historique de la barre de Cocagne, la Direction des études géologiques du ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick et le Département en technologie de l'environnement du Collège communautaire du Nouveau-Brunswick ont réalisé au début des années 2000 des analyses photogrammétriques à partir d'une ancienne carte bathymétrique (1839) et de huit séries de photos aériennes (1945, 1954, 1963, 1973, 1976, 1983, 1995 et 2001) (Bérubé *et al.*, 2002). Cette étude a permis de constater qu'en 1839, la flèche littorale était relativement courte (1,2 km) et que sa partie distale était alors rattachée à un îlot nommé Pointe Dickson. Les vestiges de cette petite île sont encore aujourd'hui visibles à la limite de la plate-forme littorale; ils forment un écueil. Ces observations suggèrent donc que l'ancienne flèche décrite par Hunter (3 km) ne constituait pas un segment unique, mais qu'elle était plutôt formée d'une série de deux ou plusieurs tombolos. Les taux de recul côtier générés par cette étude ont montré que la migration de la flèche en direction des terres a été particulièrement rapide : 4,06 m/an entre 1839 et 1945 et 4,43 m/an entre 1945 et 2001. Cependant, le taux de migration de la flèche a été bien en deçà de la moyenne entre 1954 et 1963; le recul n'a été que de 0,76 m/an. Ce ralentissement dans l'évolution régressive pourrait être indicateur d'une période d'accalmie dans la fréquence des tempêtes côtières ou encore il pourrait indiquer une période d'apport sédimentaire plus important. Les résultats complets de cette étude sont présentés à l'annexe C (section 5). D'autres informations quant à l'évolution récente de la barre de Cocagne sont présentées dans la section 4.5.3.2.3 du rapport.

Pointe de Grande-Digue

La pointe de Grande-Digue est une petite flèche littorale située au sud de Cap-des-Caissie, sur la rive nord-ouest de la baie de Shediac. Cette flèche a été marquée par l'érosion durant la seconde moitié du XX^e siècle et pourrait, au cours des prochaines décennies, se désintégrer complètement. Les aquaculteurs, dont les équipements sont situés dans le plan d'eau derrière la flèche (qui offre une protection contre les vagues de tempête), sont inquiets de sa possible disparition. C'est en réaction à cette inquiétude que la Direction des études géologiques du ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick a entrepris au début des années 2000 une étude visant à mieux connaître les causes et les tendances de l'érosion le long de la flèche (bérubé et Evans, 2003). Ces travaux ont révélé que la flèche a été l'un des sites d'extraction de sable les plus utilisés dans le sud-est du Nouveau-Brunswick. Entre 1968 et 1974, environ 4 880 m^3 de sable ont été extraits annuellement (Hunter, 1975). Les données photogrammétriques générées par ce projet ont montré que le taux de recul, entre 1945 et 2001, a été particulièrement rapide dans la partie médiane de la flèche : 4,39 m/an; il a été relativement rapide dans sa partie proximale (1,74 m/an); il a été beaucoup moins important dans sa partie distale (0,58 m/an). Cependant, une brèche s'est formée au début des années 1990 dans la partie médiane de la flèche et a depuis évolué en goulet de marée, ce qui pourrait priver la partie distale de l'apport en sable nécessaire pour se maintenir en équilibre au cours des prochaines années. Les résultats de ces travaux sont présentés à l'Annexe C4 (Section 5).

Flèche de Dupuis Corner
À la fin des années 1980, un étudiant du Département d'histoire et de géographie de l'Université de Moncton a réalisé un projet de cartographie de l'évolution de la petite flèche littorale de Dupuis Corner, située sur la rive est de l'embouchure de la rivière Kouchibouguac (Robichaud, 1989). Tout comme pour la barre de Cocagne, la flèche de Dupuis Corner est un système sableux très dynamique et forme un site idéal pour étudier les variations à court terme du recul côtier (périodes de 5 à 15 ans). Pour cette étude, une ancienne carte bathymétrique (1806), cinq séries de photos aériennes (1945, 1954, 1963, 1971, 1982) et des observations de terrain (1988) ont servi à décrire les principaux déplacements de la flèche. L'étudiant a d'abord déterminé que la longueur de la flèche avait considérablement diminué au cours des derniers siècles, passant de 2 900 à 1 400 m entre 1806 et 1945, et de 1 400 à 650 m, entre 1945 et 1988. Il a ensuite déterminé que le taux de recul de la flèche, entre 1945 et 1982, avait été en moyenne de 3,07 m/an, et comme dans le cas de la barre de Cocagne, le recul avait été moins important entre 1954 et 1963 (1,97 m/an). Enfin, cette flèche avait elle aussi subi l'effet de l'extraction de sable : environ 1 620 m^3 de sable ont été extraits annuellement entre 1968 et 1972 (Hunter, 1975).

4.5.2.2.2 Evolution des forêts littorales

Tourbières de Pointe-Sapin
Bien que les tourbières ne soient pas des formes littorales, elles peuvent néanmoins se retrouver en position littorale; à ce titre, elles constituent une importante composante du paysage côtier du sud-est du Nouveau-Brunswick. À la fin des années 1980, le Département de géographie ainsi que le Centre d'études nordiques de l'Université Laval ont mené, en collaboration avec le Département d'histoire et de géographie de l'Université de Moncton, une étude de l'évolution des tourbières côtières situées entre Excuminac et Pointe-Sapin (Bégin *et al.*, 1989). Le but de l'étude était de préciser la relation qui existe entre le recul côtier et la dégradation des épinettes vivant en bordure des tourbières. Les auteurs ont d'abord montré, à partir d'analyses photogrammétriques, que les taux de recul de la côte (1954-1983) étaient rapides dans la région : 1,40 m/an dans les falaises de tourbe, 0,84 m/an dans les falaises rocheuses, 1,25 m/an dans les marais maritimes et 0,82 m/an le long des cordons sableux (dunes et flèches littorales). Les auteurs ont aussi déterminé, à partir d'analyses dendrochronologiques, que la migration des cordons sableux en direction des tourbières avait limité le drainage du substrat et freiné la croissance des épinettes. Enfin, ces travaux ont révélé que l'érosion et le recul des falaises de tourbe pouvaient avoir deux conséquences opposées : l'assèchement du substrat et l'amélioration de la croissance des épinettes, ou encore la déstabilisation du substrat et la diminution de la croissance des épinettes.

Falaises de l'île de Cocagne
Au milieu des années 1990, la Direction des études géologiques du ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick et le Département d'histoire et de géographie de l'Université de Moncton ont mené des travaux de dendrochronologie et de photogrammétrie dans le but d'évaluer le rôle de l'erosion des côtes dans la dégradation d'une forêt d'épinettes située dans le nord-est de l'île de Cocagne (Bérubé, *et al.*, 2006). Ces travaux ont montré que l'histoire de cette forêt a été marquée par trois phases : la colonisation du substrat; la consolidation de la population; et la dégradation de la bordure forestière. La phase de colonisation est survenue aux débuts des années 1940 et 1950.

Durant cette période, les familles acadiennes, vivant alors sur l'île, ont abandonné leurs fermes, ce qui a entraîné l'amorce d'un processus de colonisation des champs par des épinettes et autres espèces forestières. Durant la phase de consolidation forestière, entre 1950 et 1970, la forte densité des populations pionnières a réduit l'exposition aux vents de tempêtes, ce qui a contribué à améliorer la croissance des épinettes. De plus, bien que les falaises aient reculé à un taux de 0,43 m/an durant cette période, la majorité des épinettes se situaient alors à plus de 5 m de la côte, donc à l'abri des vagues et des embruns de tempête. Enfin, durant la phase de dégradation forestière, amorcée depuis les années 1970, l'accroissement de l'érosion et du recul des falaises ont mené au basculement des épinettes situées en bordure des falaises; le taux de mortalité a été particulièrement élevé durant les tempêtes de la période1986-1988. Les résultats de cette étude sont résumés à l'Annexe C (section 5).

Marais de Cap-Pelé

Au début des années 1990, un étudiant du Département de géographie, affilié au Centre d'études nordiques de l'Université Laval, a documenté, à partir de la dendrochronologie et de la photogrammétrie, les effets des tempêtes et de l'élévation du niveau de la mer sur les forêts côtières d'un secteur de Cap-Pelé (Robichaud 1993; Robichaud et Bégin, 1997). Cette étude a montré que face à un recul important de la côte (1,10 m/an entre 1945 et 1982), les forts vents accompagnant les événements de tempête ont un impact significatif sur ce type de milieu côtier : la forêt bordant et colonisant le sommet de la falaise est marquée par de nombreux arbres penchés, voire déchaussés. Une concordance a été observée entre les années de tempêtes, en particulier celles survenues entre 1986 et 1989, et une augmentation de la mortalité des arbres ou encore une diminution de leur croissance. Les vents de tempête auraient même causé des bris mécaniques aux arbres (ex: perte de branches) situés à 20 m de la falaise. Dans le cas où la forêt borde un marais maritime, les travaux ont montré que la mortalité des arbres, en plus d'être synchrone avec les grandes tempêtes, est d'abord observée dans les parties basses des terrains côtiers pour se manifester ensuite dans les parties plus hautes. Le taux de progression du front de mortalité à ce site a été évalué à 3 m/an entre 1985 et 1991. La montée à long terme du niveau de la mer semble donc permettre aux inondations de tempête d'atteindre progressivement des parties de la forêt qui se trouvaient autrefois hors de leur portée.

4.5.3 Études réalisées dans le cadre de cette composante

4.5.3.1 Kouchibouguac à Bouctouche

4.5.3.1.1 Introduction

La côte de la baie de Kouchibouguac s'étend sur une quarantaine de kilomètres, de Pointe de Pruche (juste au nord de Pointe-Sapin), au nord, à Pointe des Mares (juste au nord de Cap-Lumière), au sud (figure 1). La largeur à vol d'oiseau de la baie, sur une ligne de référence reliant ces deux caps, est de 32,5 km. La côte présente un retrait de 10,5 km par rapport à la ligne de référence aux environs de la plage Kellys, ce qui indique une forme légèrement spiralée ouvrant au sud, qui concorde avec une dérive littorale nette vers le sud. Comme dans d'autres parties de la zone à l'étude, la plaine côtière basse présente peu de relief et une couverture sédimentaire limitée (Rampton *et al*., 1984). La baie, qui s'ouvre vers l'est-nord-est, est exposée aux vagues arrivant directement du golfe par le nord et le nord-est, directions d'où proviennent les plus fortes

vagues de tempête (Hale et Greenwood, 1980; Forbes *et al*., 2004). Dans le centre de la baie de Kouchibouguac, la côte est formée d'îles-barrières sableuses accompagnées de barres proches du rivage et de dunes côtières (McCann, 1982), qui protègent un certain nombre de lagunes et d'estuaires peu profonds formés par l'ennoiement de plusieurs vallées (en particulier celles des rivières Kouchibouguac, Kouchibouguacis, Saint-Charles et Richibucto) sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer (Johnson, 1925).

Il y a présentement (Atlas du Nouveau-Brunswick, 2002) trois îles-barrières principales : du nord au sud : la plage Kouchibouguac Nord (PKN), la plage Kouchibouguac Sud (PKS), et la dune (ou plage) de Richibucto Nord (PRN), ainsi qu'une grande flèche au sud appelée plage de Richibucto Sud (PRS). Il y a une autre petite île-barrière entre PKS et PRN, derrière l'extrémité sud de PKS. Le nombre d'îles-barrières peut varier avec les années, à mesure que les tempêtes ouvrent ou ferment des passes. À l'heure actuelle, PKN est effectivement ancrée à la côte à Pré à Germain dans le nord. Sur le côté nord de la pointe de Pré à Germain, l'extrémité nord de PKN rejoint une petite flèche s'étendant de la pointe opposée pour former une barrière avec une passe centrale ouvrant sur une petite lagune; il existe une autre étroite barrière en travers de la petite vallée ennoyée au nord de ce point (au sud de Rivière-au-Portage). De Pré à Germain vers le nord en direction de Pointe-Sapin, on trouve des falaises basses (pouvant mesurer jusqu'à 4 m) sur les caps et un peu plus élevées au sud de Pointe-Sapin; ailleurs, la côte est basse. Le volume de sable de plage est très limité au nord, malgré des problèmes de longue date d'ensablement du port à Pointe-Sapin. Le transport littoral de sable vers le sud à partir de la baie d'Excuminac est dévié vers le large à Pointe de Pruche, suit la côte en contournant une plate-forme rocheuse du côté de la mer puis revient près de la côte aux environs du port (Forbes, 1982).

Une grande partie de la plate-forme intérieure peu profonde dans la région de Pointe-Sapin est tapissée de gravier résiduel, à l'exception d'une crête de sable basse, linéaire et parallèle au rivage, d'environ 600 à 900 m de largeur et d'une hauteur pouvant atteindre environ 2,2 m, dans une profondeur d'eau de 9 à 11 m à 2,5 km au large, considérée comme une crête de plage-barrière abandonnée (dépassée) (Forbes, 1987). Kranck (1967, 1971) a décrit les sédiments de fond de la baie Kouchibouguac et montré que les conditions présentes au large de Pointe-Sapin se poursuivent vers le sud jusque dans la baie, où une grande partie du plancher est couvert de gravier résiduel grossier, présumément formé par érosion du till sous-jacent à mesure que le trait de côte a migré sur la plate-forme (Kranck, 1972). Le sable est essentiellement confiné à l'actuelle zone littorale de la baie de Kouchibouguac, formant un système de multiples barres rectilignes et en croissant le long d'une grande partie de la rive de l'île-barrière (Greenwood et Davidson-Arnott, 1975, 1977, 1979; Davidson-Arnott et Greenwood, 1974; Greenwood et Hale, 1980). À distance du système de barrière dans le centre de la lagune, les plages sont étroites, et le volume de sable sur la plage et à proximité du rivage est extrêmement limité (Forbes, 1982, 1987).

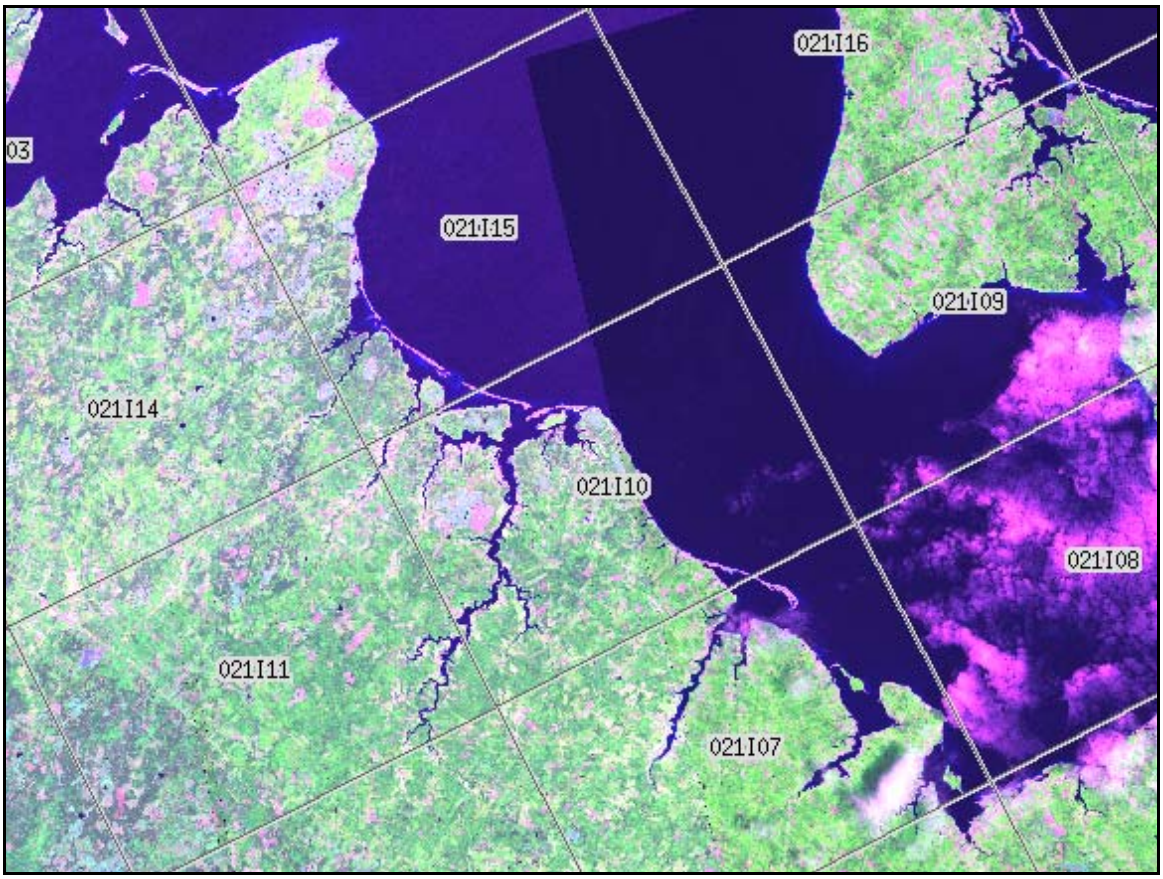


Figure 1. Mosaïque Landsat 7 démontrant le littoral de Kouchibouguac à Bouctouche (aimablement fourni par GeoBase).

Au sud de la pointe des Mares, qui marque la limite sud de la baie de Kouchibouguac, un segment de côte relativement droit s'étend franc sud sur environ 7,5 km, jusqu'à Gros Cap. À l'exception du côté nord du quai de Cap-Lumière, où le transport de sédiments vers le sud est piégé et où la plage et les dunes sont en progradation (avancée), le reste de ce segment est largement marqué par l'érosion, avec des falaises de grès qui peuvent atteindre 6 m de hauteur (figure 2). Du côté sud de Gros Cap, des ouvrages de protection substantiels ont été érigés devant des propriétés aménagées depuis peu. Plus au sud, la côte forme une autre large baie très évasée, d'environ 22 km, jusqu'au quai de Saint-Édouard-de-Kent et au début de la flèche de Bouctouche (la dune de Bouctouche). Sur la plus grande partie de ce segment, le littoral est constitué d'une plage de sable, bordée par une dune bordière ayant une seule crête. Deux petits cordons protégeant des lagunes peu profondes sont présentes entre Gros Cap et Côte-Sainte-Anne. Une plage flanquée d'une crête dunaire s'étend aussi en travers de l'exutoire des cours d'eau longés par des marais, entre Chockpish et Saint-Édouard-de-Kent.

Figure 2. Fondation d'une usine abandonnée de transformation de poisson su sud de Cap-Lumière, partiellement détruite par l'érosion des falaises de grès (Forbes/SGC, mai 2005).

La dune de Bouctouche (figure 3) est une spectaculaire flèche à pointe libre, une des plus belles de l'est du Canada. Elle s'étend sur environ 12 km en travers de la baie de Bouctouche (Ganong, 1908; Johnson, 1925; Ollerhead et Davidson-Arnott, 1995a,b), et se termine par un large complexe de crêtes dunaires incurvées en face de Saint-Thomas-de-Kent. En se basant sur le géocodage numérique de la carte de Bayfield de 1839, Ollerhead et Davidson-Arnott (1995b) a montré que la dernière crête incurvée s'est construite depuis cette date. Ils ont cependant aussi conclu que l'allongement de la flèche est maintenant limité par un apport réduit de sédiments et par le fait que de forts courants à l'embouchure de la baie de Bouctouche emportent les sédiments plus loin. La flèche peut être subdivisée en trois sections (Ollerhead et Davidson-Arnott, 1995b) :

- une section proximale étroite, sujette à l'érosion et à des débordements plus fréquents;
- une zone de transition avec des crêtes dunaires incurvées, préservées derrière la dune bordière, mais où il s'ouvre encore des brèches à l'occasion; et
- une section distale d'accumulation, avec de multiples crêtes dunaires incurvées, se formant sur une plate-forme littorale de faible profondeur.

La figure 3 montre la diversité de morphologie de ces trois sections et la zone de formation des récentes nappes de débordement dans la partie amont de la flèche, près de l'Éco-Centre Irving. C'est ici qu'il y a eu le plus de dommages aux infrastructures pendant les grandes tempêtes d'octobre 2000 et de décembre 2004.

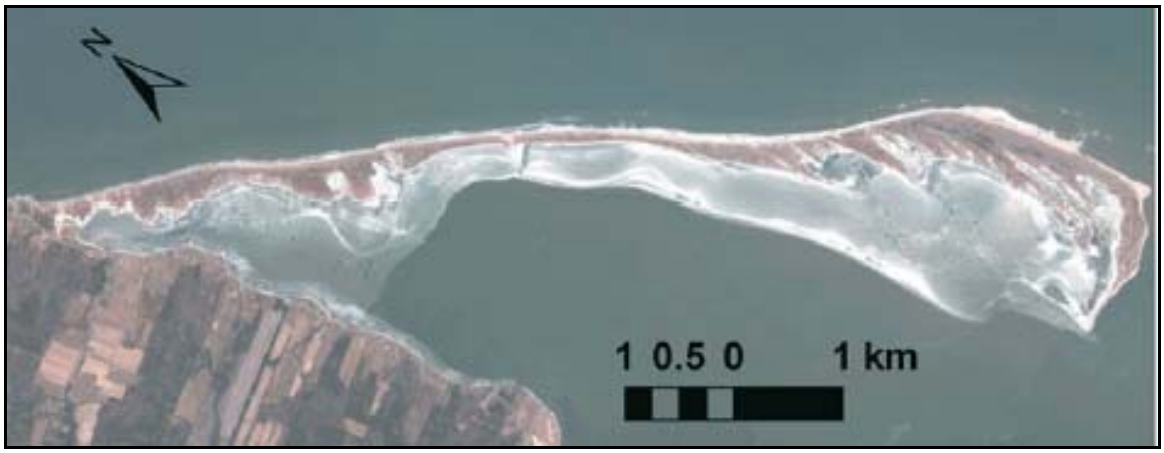


Figure 3. Image QuickBird de la flèche de Bouctouche Spit en 2005 (comprend de l'information tous droits réservés de Digital Globe Inc)

4.5.3.1.2 Méthodologie

Cette section de la côte a été étudiée à l'aide des résultats (publiés ou non) de travaux antérieurs, d'observations directes sur le terrain et de levés, de photographies aériennes et de photogrammétrie aérienne numérique, de levés par LiDAR aéroporté, d'images de radar polarimétrique à synthèse d'ouverture (PSAR) aéroporté (simulation Radarsat-2) et d'images satellitaires haute résolution (QuickBird).

4.5.3.1.3 Résultats

Parc national Kouchibouguac

Les îles-barrières de la baie de Kouchibouguac sont caractérisées par de grandes dunes littorales et renferment le plus important volume de sable de toute la côte sud-est du Nouveau-Brunswick (figure 4). Cette figure montre un profil, disposé parallèlement à la ligne de rivage, qui indique l'élévation des falaises et de la crête dunaire à un intervalle de 50 m à partir d'un point situé au sud de Rivière-au-Portage. Les données ont été dérivées du modèle altimétrique numérique (MAN) LiDAR 2004 (Webster *et al*., dans la section 4.4 du présent rapport). Elle montre aussi l'élévation du pied de dune (haut de la plage) ou de la crête du cordon sableux (lorsqu'il n'y a pas de dune), représentant la limite minimale du jet de rive. À noter que l'effondrement de la face de la dune et la formation d'un talus de reprofilage éolien pendant l'hiver qui a précédé le levé LiDAR d'avril 2004 ont pu masquer le pied de dune à certains endroits, de sorte que l'expression morphologique de la limite du jet de rive peut être moins élevée que dans la réalité.

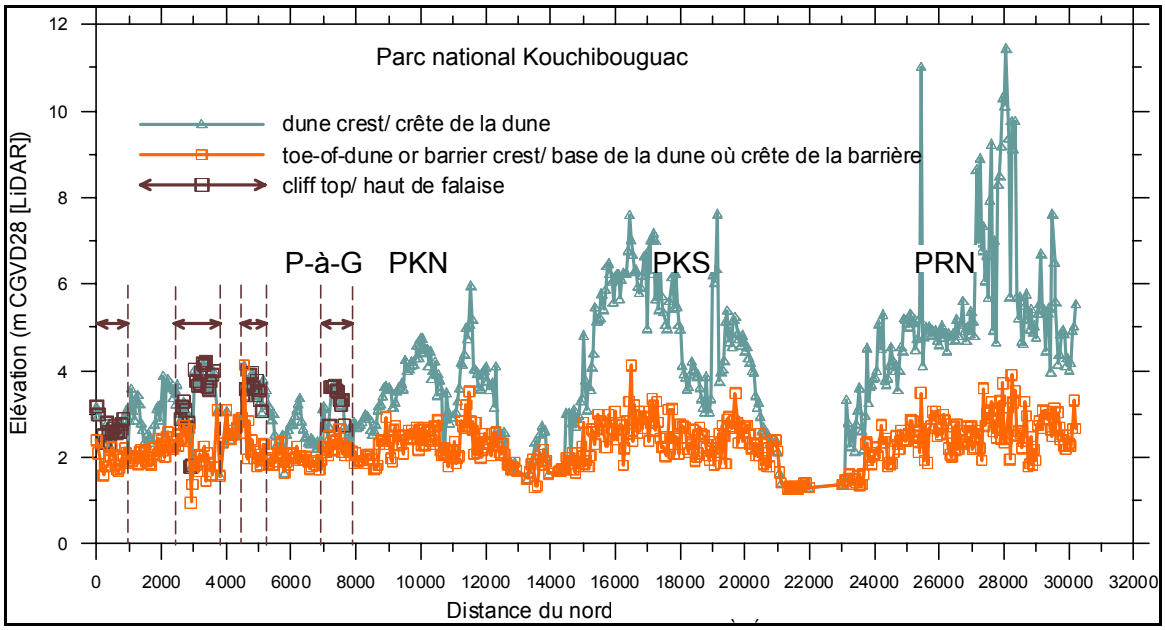


Figure 4. Crête dunaire, pied de dune et crête du cordon sableux (limite du jet de rive), et sommet de falaise au parc national Kouchibouguac, à partir du MAN LiDAR 2004 : plage Kouchibouguac Nord (PKN), plage Kouchibouguac Sud (PKS) et plage Richibucto Nord (PRN). Distance sur le rivage à partir de l'origine situé à proximité de la limite nord du parc, au sud de Rivière-au-Portage. P-à-G = Pré à Germain.

Quatre petits caps séparés par des plages ou de petites îles-barrières avec des dunes basses sont présents dans le segment nord de 8 km (figure 4); le cap situé le plus au sud étant Pré à Germain. Les falaises de cette zone s'élevent jusqu'à 4,2 m (CGVD28) et les crêtes dunaires font de 2,5 m à près de 4 m. À une exception près, la limite du jet de rive se situe entre moins de 2 m et un maximum d'environ 3 m. Plus au sud sur la PKN, les dunes atteignent des hauteurs maximales de presque 5 m près du kilomètre 10 et à 6 m près du kilomètre 11,5. Le pied de dune, qui représente la hauteur minimale du jet de rive dans cette zone, varie entre 1,7 à 2,9 m (3,5 m à un endroit) et il est généralement d'environ 2,5 m (CGVD28). Au-delà du Petit goulet près de la plage Kellys, les dunes de la PKS sont plus hautes, atteignant des maximums de plus de 7,5 m (plus de 6 m sur au moins 2 km le long du rivage). Les pieds de dune sont en moyenne un peu plus élevés que sur la PKN, atteignant 3,0 m en de nombreux endroits (deux valeurs anarchiques, dans un cas jusqu'à 4 m, comme la valeur unique sur la PKN, peuvent être des erreurs de lecture sur les profils LiDAR). De même que sur la PKN, les dunes les plus hautes et les jets de rive les plus élevés sont dans la partie médianne de l'île-barrière, les valeurs diminuant en direction des goulets situés aux extrémités nord et sud. Plus au sud, la couverture LiDAR inclut aussi la PRN, où l'on a noté les crêtes dunaires les plus hautes, jusqu'à 11,5 m à un endroit, et plus de 9 m à de nombreux autres. La hauteur modale de crête sur la PRN est comprise entre 5 et 6 m, soit un peu moins que sur la PKS. Par ailleurs, la hauteur du pied de dune est très semblable à celle de la PKS, quoiqu'un peu plus variable.

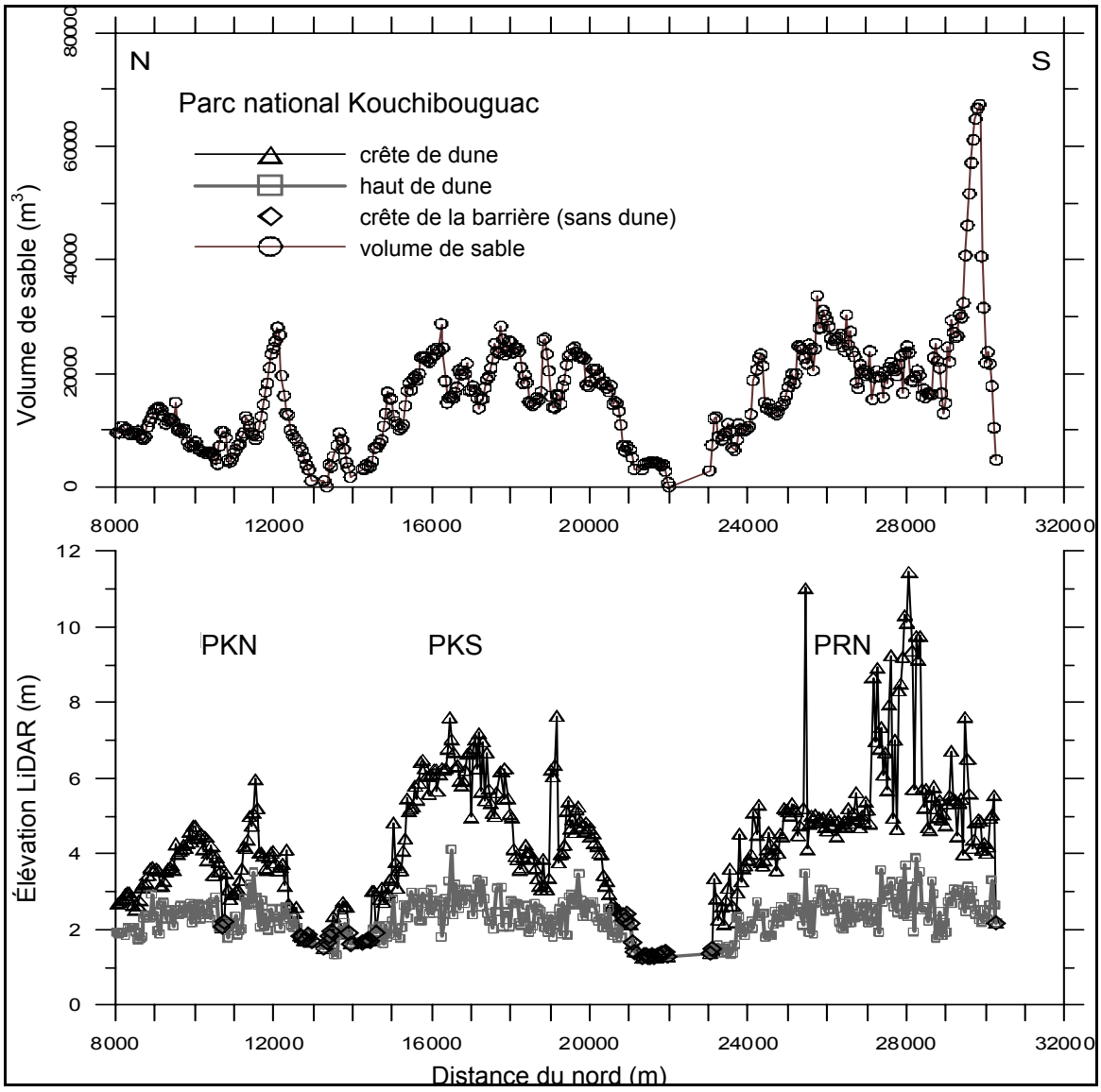


Figure 5. Crête de dune, pied de dune et crête de barrière (limite du jet de rive), comme dans la figure K1, et volume de sable pour les trois îles-barrières du parc national Kouchibouguac, à partir du MAN LiDAR 2004 : plage Kouchibouguac Nord (PKN), plage Kouchibouguac Sud (PKS) et plage Richibucto Nord (PRN).

Les volumes de sable combinés pour la plage et la dune dans les îles-barrières de Kouchibouguac, de Pré à Germain au goulet de Richibucto, ont été calculés à partir du MAN LiDAR, en prenant le volume sous la surface du sol, dans des polygones délimités par des transects à 50 m (figure 5). La surface de base a été présumée être à approximativement 0,9 m CGVD28, de sorte que les totaux des volumes sous-estiment le volume total de sable dans le système. Le volume total de sable estimé pour les trois îles-barrières (Kouchibouguac Nord et Sud, et Richibucto Nord) était de 6,52 x 10^6 m^3.

Les volumes individuels se répartissaient comme suit :

- plage Kouchibouguac Nord (PKN) : 0,991 x 10^6 m^3
- plage Kouchibouguac Sud (PKS) : 2,467 x 10^6 m^3
- plage Richibucto Nord (PRN) : 3,061 x 10^6 m^3

Ces volumes sont *grosso modo* proportionnels à la longueur de l'île-barrière et à la hauteur moyenne de la dune. Cependant, l'absence de corrélation avec la hauteur de la dune à la figure 5 montre bien l'importance de la largeur de l'île-barrière dans la détermination du volume total. C'est en particulier le cas à l'extrémité sud de la plage Richibucto Nord (entre les kilomètres 29 et 31 à la figure 5).

Les îles-barrières comme celles du parc national Kouchibouguac sont des formes de terrain dynamiques modelées par les vagues et le vent (Greenwood et Davidson-Arnott, 1977). Comme on l'a souligné plus haut, le système d'îles-barrières de la baie de Kouchibouguac est très dynamique, et a toujours présenté des ouvertures et des fermetures de goulets de marée (passes). Le jet de rive des vagues de tempête peut former des chenaux de débordement, que l'érosion peut ensuite transformer en goulets de marée. Les passes peuvent rester ouvertes de nombreuses années, mais aussi se refermer ou se rouvrir, selon la fréquence des tempêtes, l'apport de sédiments et leur dynamique propre. À la fin des années 1970, le goulet de Richibucto (entre la PRS et la PRN) et le goulet de Terre-noire (entre la PRN et la PKS) en face de Cap-de-Saint-Louis avaient déjà la même configuration générale que maintenant (Greenwood et Hale, 1980). Le Petit goulet (entre la PKS et la PKN) près de la plage Kellys était lui aussi ouvert, mais s'est refermé par la suite. La passe Nord (à l'extrémité nord de la PKN), qui était ouverte au sud de Pré à Germain, est maintenant fermée. Le Petit goulet s'est élargi plus près de la plage Kellys, pendant la tempête d'octobre 2000, ayant été rouvert lors d'une tempête précédente.

On peut s'attendre à ce que les ajustements futurs au changement climatique, dont la poursuite, voire l'accélération, de l'élévation du niveau de la mer, entraînent des épisodes répétés de débordement et d'ouverture de brèches sous l'effet des vagues de tempête, ce qui ferait ouvrir et fermer des goulets de marée. On voit à la figure 4 que, dans les conditions actuelles, il y a plusieurs zones de la PKN et de la PKS où la dune est plus basse que le jet de rive , comme suit

- juste au sud de Pré à Germain sur PKN (~8 km), aux alentours de l'ancienne passe Nord,
- à mi-chemin sur la plage Kouchibouguac Nord, à un rétrécissement situé entre les kilomètres 10,8 et 11,2,
- des zones basses où les dunes ne se sont pas reconstituées aux alentours du Petit goulet sur la plage Kouchibouguac Sud,
- une grande section basse sur la plage Kouchibouguac Sud, entre les kilomètres 18,0 et 18,9.

L'extrémité nord de la plage Richibucto Nord est elle aussi peu élevée et vulnérable, mais la crête dunaire et la largeur de cette île-barrière la rendent par ailleurs relativement résistante à l'ouverture de brèches.

L'érosion du front dunaire est l'autre phénomène qui peut contribuer à une lente migration des îles-barrières vers les terres sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer. Des informations préliminaires de photogrammétrie numérique de Fréchette (parc national Kouchibouguac, voir annexe C2 à la section 5), confirment cette tendance à quelques endroits, mais montrent que d'autres zones du système d'îles-barrières, surtout sur la PKN, ont connu une certaine progradation (avancée). C'est une situation normale, compte tenu du développement et de la migration d'une cellule littorale dans un régime net de dérive littorale vers le sud (Carter, 1988).

Pointe des Mares (Cap-Lumière) à Saint-Édouard-de-Kent

Giangioppi (2004) a entrepris un géocodage numérique des photographies aériennes et la numérisation des traits de côte de 1944 et de 2000/2001 (voir annexe C3), de Cap-Lumière jusqu'à l'extrémité distale de la flèche de Bouctouche. D'autres vecteurs représentant le trait de côte ont été numérisés pour les années intermédiaires le long de la flèche. Aux fins de la présente étude, ses vecteurs de trait de côte ont été combinés avec des transects perpendiculaires au rivage dans ArcMap et utilisés pour déterminer l'avancée ou le recul du trait de côte à intervalles de 50 m sur la totalité du littoral, du nord de Cap-Lumière jusqu'à Saint-Édouard-de-Kent, et sur toute la longueur de la dune de Bouctouche. La figure 6 montre les résultats pour cette section de la côte, sous la forme de taux moyens positifs (avancée) ou négatifs (recul) sur 56 ans, de 1944 à 2000/2001. On constate une rapide progradation (avancée) au nord de Cap-Lumière, au nord de la structure portuaire à Côte-Sainte-Anne, et à deux endroits situés au nord de Saint-Édouard-de-Kent. On note aussi une lente érosion persistante à des taux généralement inférieurs à 0,2 m/an le long des falaises de grès entre Cap-Lumière et Gros Cap (kilomètres 3,1 à 7,5). Au sud de Gros Cap, la côte recule plus rapidement dans la région des petits cordons sableux s'étendant presque jusqu'à Côte-Sainte-Anne. À deux endroits, les taux de recul sont en moyenne supérieurs à 1 m/an, soit une soixantaine de mètres sur les 57 années considérées. Au sud de Côte-Sainte-Anne, il existe une zone présentant des taux d'érosion équivalents à 0,5 m/an et d'autres « points chauds » d'érosion isolés entre cet endroit et la dune de Bouctouche (au-delà du kilomètre 19).

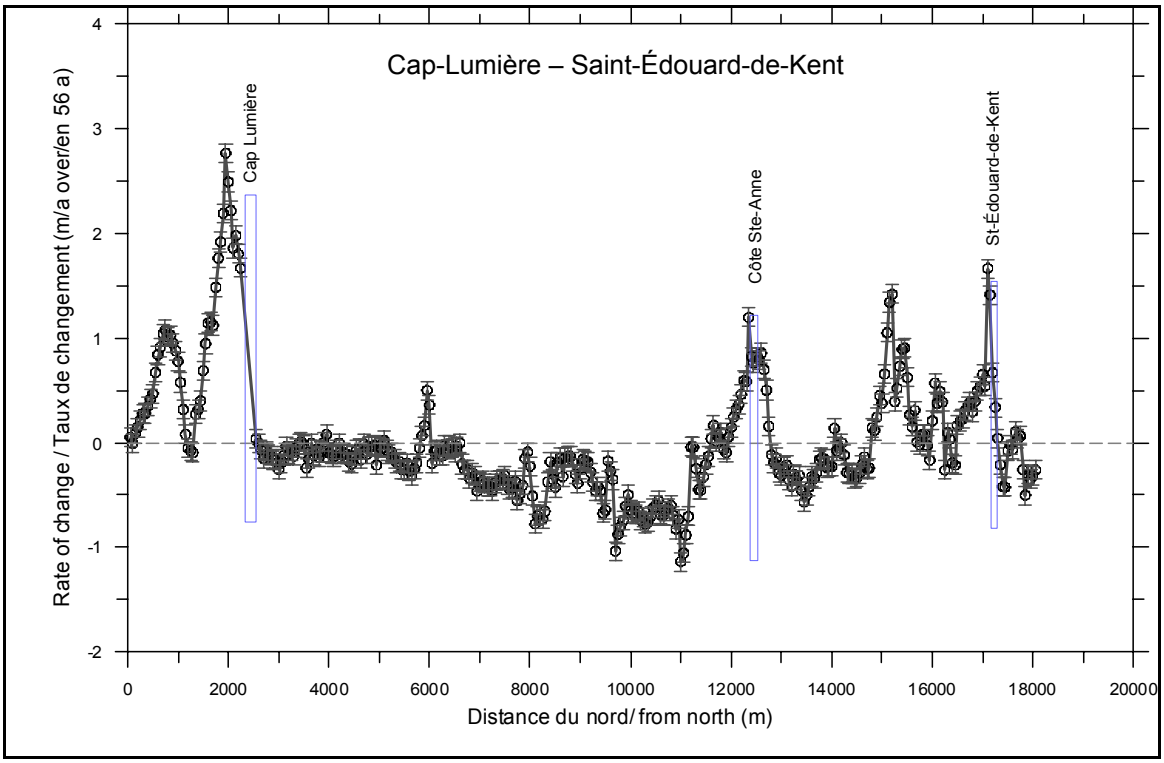


Figure 6. Estimations de l'érosion (négative), de l'accrétion (positive) et des erreurs à intervalles de 50 m le long du rivage, de l'extrémité nord de la dune de Bouctouche, tirées de la différenciation SIG des vecteurs des falaises et de la ligne de dune. Aimablement fourni par Martine Giangioppi. Taux moyens en m/a sur la période de 55 ans allant de 1945 à 2000/2001 indique aussi la hauteur de la crête dunaire, à partir du modèle altimétrique numérique tiré du LiDAR 2004.

La Dune de Bouctouche

La figure 7 montre un graphique similaire du taux moyen d'avancée/recul de la côte sur une période de 55 ans (1945-2000/2001) pour la dune de Bouctouche. La totalité du trait de côte, de la section proximale à l'Éco-Centre Irving jusqu'à environ 8,3 km en aval, recule vers la terre. Au-delà de ce point, on constate une accumulation et une avancée du trait de côte sur les 2 km suivants, puis une autre section d'érosion et enfin la zone d'accumulation de la section distale (au-delà du kilomètre 11). La ligne (sur la même figure) illustrant la hauteur du cordon sableux et de la crête dunaire révèle une intéressante corrélation avec le taux de recul à long terme sur les huit premiers kilomètres de la flèche. Au-delà, dans la zone d'accumulation, il n'y a pas de corrélation; on ne s'attendait d'ailleurs pas à ce qu'il y en ait une. Le taux moyen de recul à long terme est supérieur à 1 m/an dans la section proximale de la flèche, et s'approche de 2 m/an aux alentours du kilomètre 7,5 sur la flèche. Les taux de progradation (avancée) atteignent 2 m/an près du kilomètre 10, et dépassent 3,5 m/an au-delà du kilomètre 11.

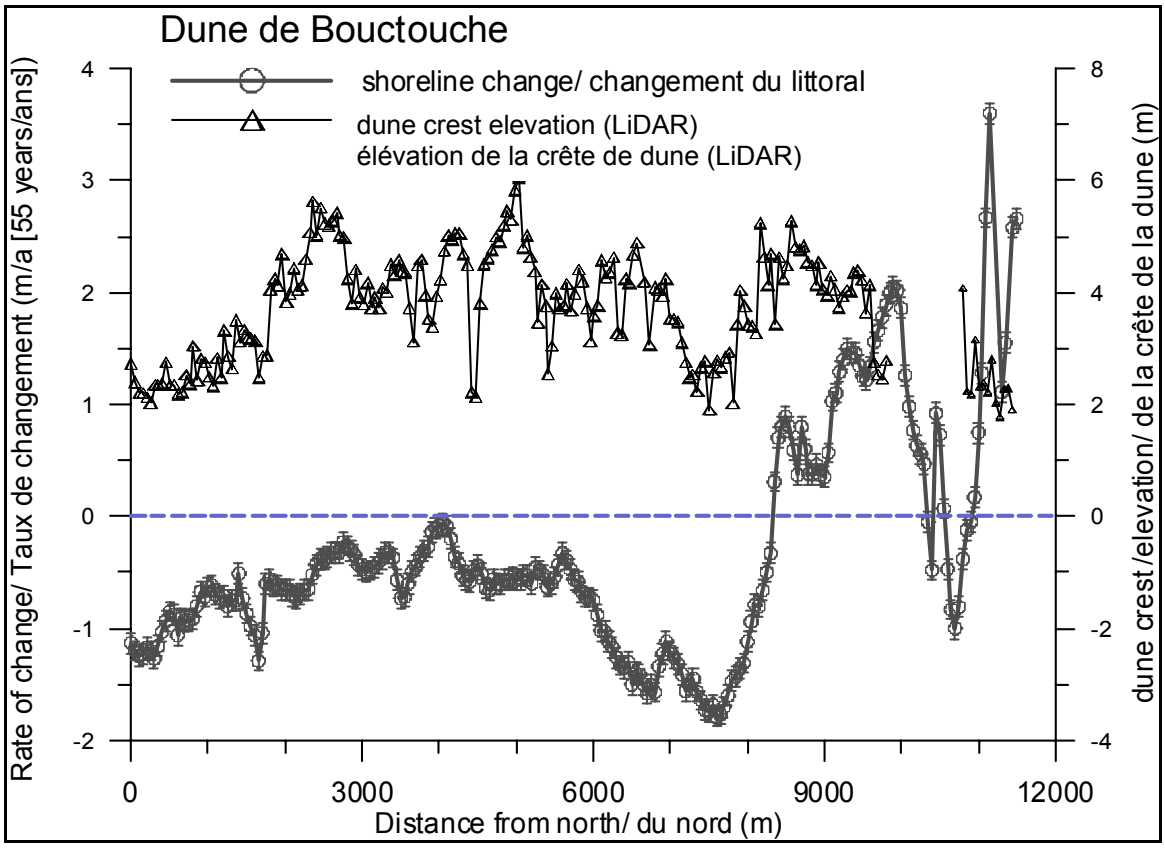


Figure 7. Estimations de l'érosion (négative), de l'accrétion (positive) et des erreurs à intervalles de 50 m le long du rivage, de l'extrémité nord de la Dune de Bouctouche, tirées de la différenciation SIG des vecteurs des falaises et de la ligne de dune. Aimablement fourni par Martine Giangioppi. Taux moyens en m/a sur la période de 55 ans allant de 1945 à 2000/2001. Indique aussi la hauteur de la crête dunaire, à partir du modèle altimétrique numérique tiré du LiDAR 2004.

La figure 8 montre avec plus de détail la crête dunaire, la crête du cordon sableux (là où il n'y a pas de dune) et le pied de dune (limite approximative du jet de rive) pour la dune de Bouctouche, tels que dérivés du MAN LiDAR 2004. L'élévation de la crête est de moins de 3 m CGVD28 dans la section proximale ainsi qu'entre les kilomètres 7 et 8 (zone de l'érosion la plus rapide) et aux alentours du kilomètre 10 de la flèche. L'élévation de crête maximale dépasse 6 m, et on note des élévations de plus de 5 m à plusieurs endroits. Les hauteurs du pied de dune sont très variables, fluctuant entre moins de 1,5 m à plus de 3 m, voire encore plus par endroits. Certaines des plus hautes élévations sont associées à des pointes mineures du taux de recul à long terme.

Comme on l'avait fait pour les îles-barrières de Kouchibouguac, on a calculé les volumes de sable stockés dans la dune de Bouctouche (figure 9). Les volumes par segment, présentés dans la figure, sont généralement moins importants que ceux du système de Kouchibouguac (figure 4). Le faible stockage dans la section proximale, étroite, de la dune et les volumes plus importants dans la section distale, large, correspondent à la même répartition longitudinale que sur la dune de Richibucto Nord (PRN à la figure 4).

Le volume total de sable stocké qui a été calculé pour la dune de Bouctouche était de 1,73 x 10^6 m^3, soit juste un peu plus du quart (27 %) du volume des îles-barrières et des dunes de Kouchibouguac (en excluant la plage Richibucto Sud, qui pourrait en contenir autant que la dune de Bouctouche). Une lacune dans le MAN LiDAR pour une partie de la section distale a été comblée en utilisant la valeur moyenne entre les kilomètres 8,0 et 9,7 vers le bout de la flèche. Une répartition du volume de sable stocké entre les huit premiers kilomètres et la section distale restante donne des valeurs de 0,92 x 10^6 m^3 et de 0,81 x 10^6 m^3, respectivement.

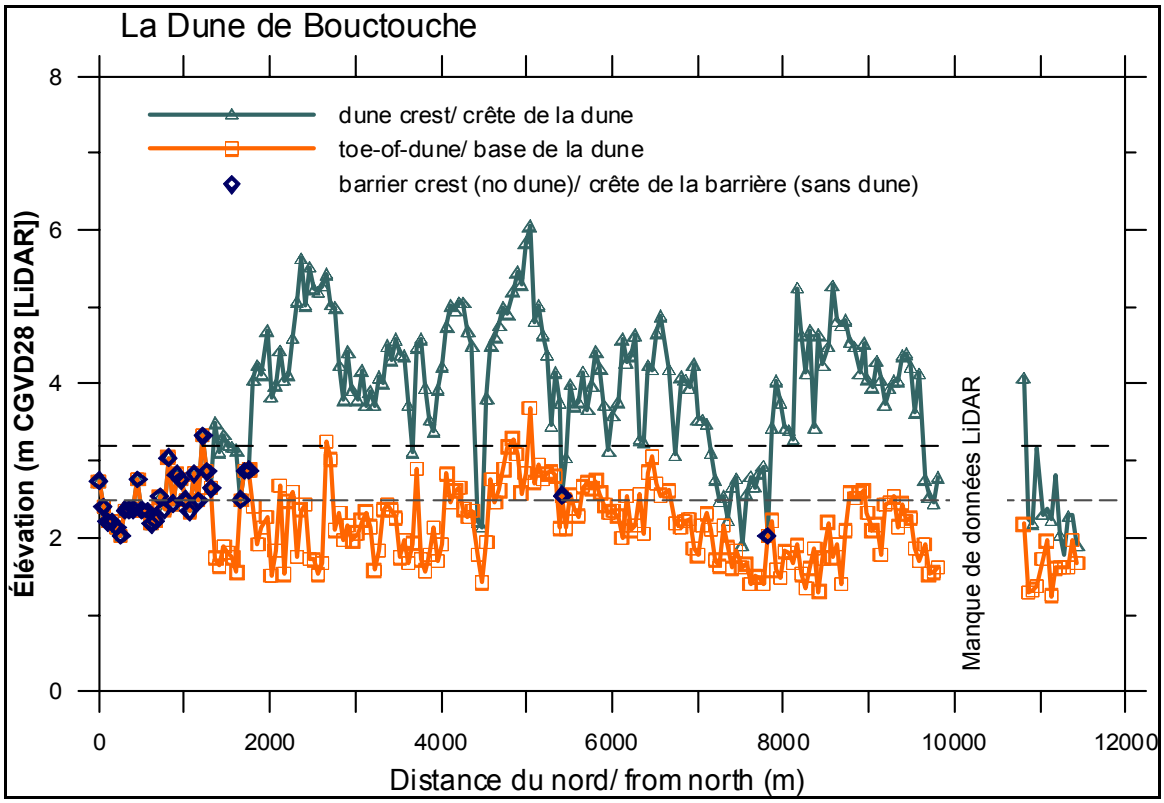


Figure 8. Crête de dune, pied de dune et crête de barrière (pas de dune) pour la Dune de Bouctouche, tirés du MAN LiDAR 2004; distance le long du rivage à partir du nord, commençant à la falaise en face de l'Éco-Centre Irving. La ligne brisée du bas indique le niveau d'eau maximal approximatif de l'onde de tempête du 21 janvier 2000. La ligne brisée du haut est une limite prudente du haut du jet de rive (à noter qu'elle se situe au niveau ou en dessous de la limite supérieure du jet de rive tirée d'indices morphologiques tels que la hauteur du pied de dune et de la crête de barrière).

Des levés dans la partie supérieure de la plate-forme sous-marine le long de la dune de Bouctouche et de Saint-Édouard-de-Kent ont été effectués en mai 2004 à partir du NGCC *Matthew* (Forbes *et al.*, 2006). Comme dans la baie de Kouchibouguac, de grandes parties de l'avant-côte et de la plate-forme sous-marine le long de la dune de Bouctouche sont couvertes d'un dépôt de gravier résiduel. Même si on note des zones de sable sur l'avant-côte, le volume de ce sable ne représente qu'une petite fraction de celui qui est stocké dans le système île-barrière-dune. Une crête de sable un peu semblable à celle documentée en face de Pointe-Sapin a été observée à une profondeur

de 9 m en face de la dune (figure 10); cela peut être un dépôt témoignant de la présence d'un ancien cordon sableux.

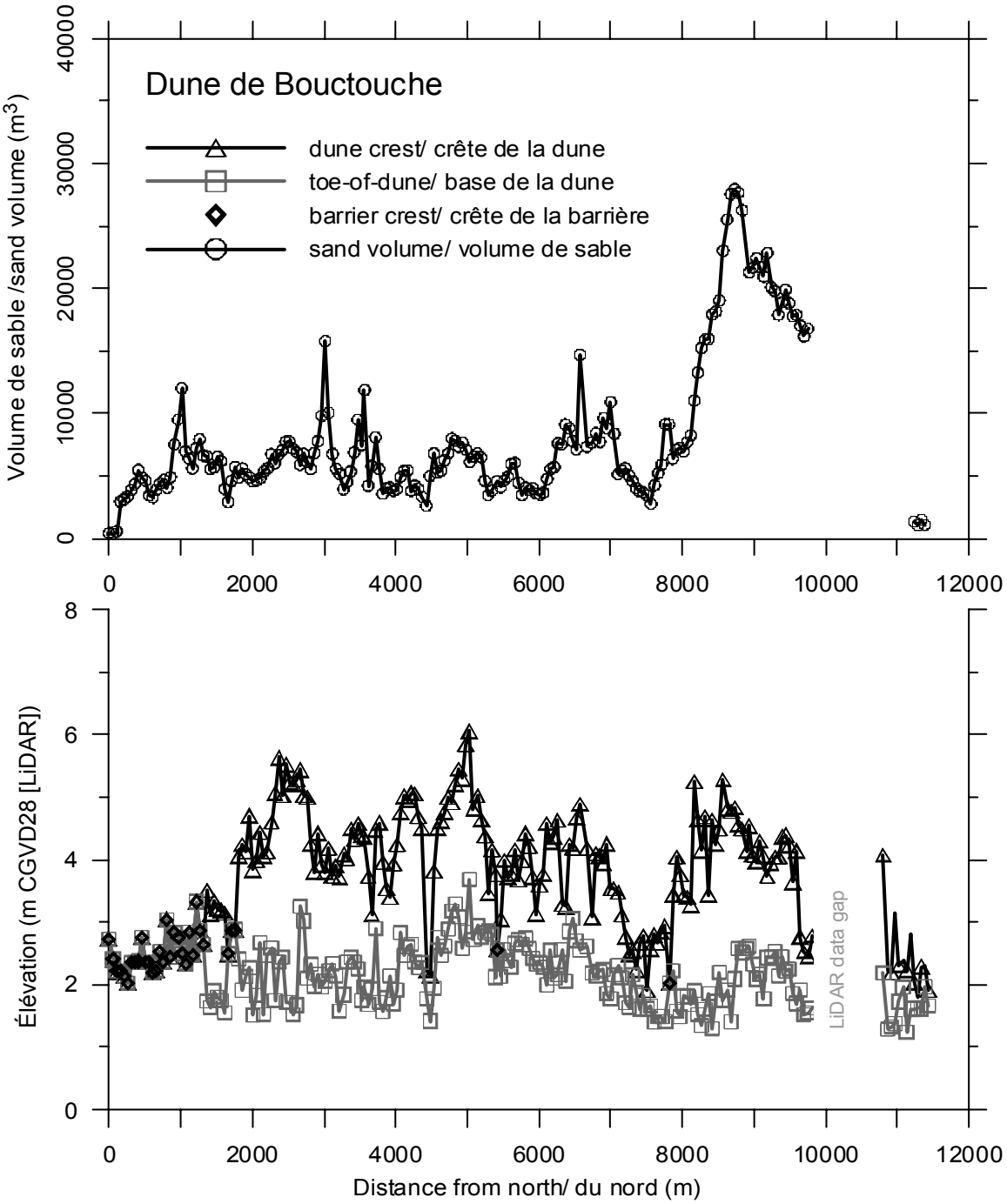


Figure 9. Crête de dune, pied de dune et crête de barrière (limite du jet de rive), et volume de sable pour la Dune de Bouctouche, à partir du MAN LiDAR 2004, avec distance à partir du nord, en commençant à la falaise de l'Éco-Centre Irving. Noter les différences d'échelles verticales avec la figure 5.

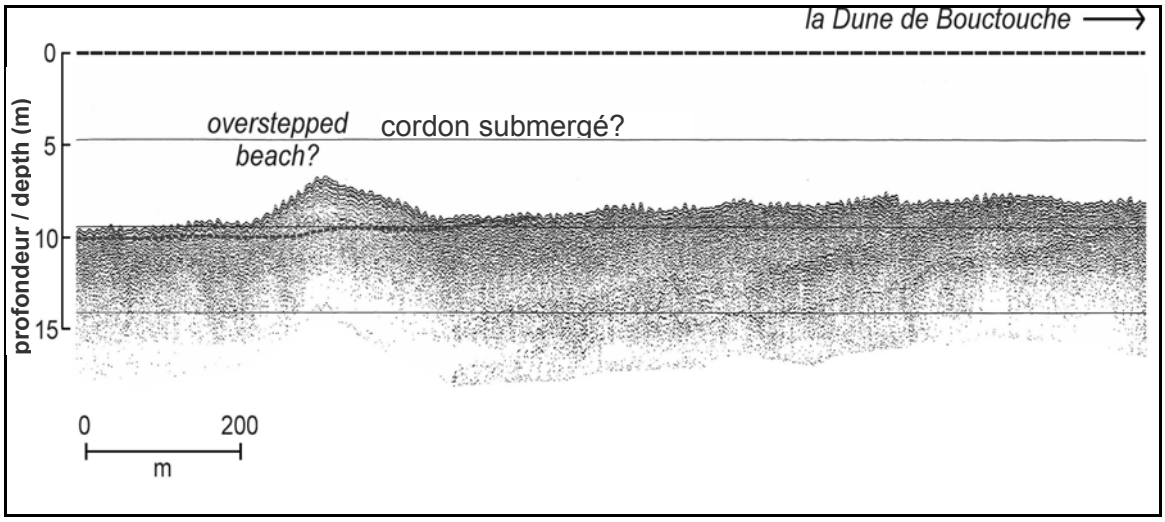


Figure 10. Coupe de terrain montrant une crête de sable observée à une profondeur de 9 m en face de la Dune de Bouctouche (littoral vers la droite). La ligne pointillée indique la base du sable.

4.5.3.1.4 Discussion

Forbes *et al*. (2004) ont présenté des données sur l'érosion des dunes et les épisodes de débordement sur la partie proximale de la dune de Bouctouche, et montré comment une séquence de tempêtes survenues de 2000 à 2003 a entraîné un arrachement de la dune bordière et un important transport de sable à travers la flèche. Comme l'ont indiqué Manson *et al*. (2006, section 4.2 du présent rapport), plusieurs épisodes de fortes vagues ont été observés au cours de la présente étude à des endroits situés au large de Pointe-Sapin (station C44150) et de Gros Cap (C44132). Alors que 2005 a été une année « calme », parmi les importantes tempêtes des deux années précédentes figuraient celles du 7 décembre 2003, des 11 et 12 octobre 2004 (tempête subtropicale *Nicole*) et du 27 décembre 2004. La hauteur significative et maximale des vagues et la période maximale au cours de ces épisodes au large de Pointe-Sapin (et de Gros Cap) étaient comme suit:

- décembre 2003 : 4,7 m, 11,5 m, 9,9 s;
- octobre 2004 : 4,8 m (3,3), 22,8 (6,9 m), 9,9 s (10 s);
- décembre 2004 : 4,7 m (3,6 m), 19,4 m (6,7 m), 7,4 s (9,5 s).

De plus, la grande tempête de la fin d'octobre 2000 avait causé deux niveaux d'eau maximums dépassant 2,4 m ZC à Escouminac et une hauteur de vague significative au nord de l'Î.-P.-É. de plus de 7,5 m (Forbes *et al.*, 2004). Considérant l'influence du fond sur les vagues, leur surélévation et le jet de rive, qui s'ajoutent aux niveaux élevés des ondes de tempête, la mer avait sans aucun doute durant ces épisodes le potentiel de passer par-dessus de grandes sections des îles-barrières de Kouchibouguac et par-dessus la Dune de Bouctouche, comme ce fut d'ailleurs le cas, avec des dommages étendus à la passerelle, survenus en octobre 2000 et de nouveau en décembre 2004 (figure 11). Même si la tempête record du 21 janvier 2000 a causé d'importants dommages liés à l'inondation et à l'impact des glaces, elle n'était pas accompagnée de vagues destructrices. Cependant, le niveau d'environ 2,5 m à l'étale était suffisant pour

que l'eau passe par-dessus les petites îles-barrières au nord de Pré à Germain, au milieu de la PKN, dans la section proximale de la dune de Bouctouche (la dune bordière a depuis été détruite), à la Grande Brèche sur la dune et à un endroit dans la partie médiane. Avec un jet de rive à 3,5 m CGVD28 sur les îles-barrières de Kouchibouguac (donc dans la gamme des élévations du pied de dune observées), l'eau passerait par-dessus les falaises et les îles-barrières de l'extrémité nord du système, comme à l'extrémité nord de la PKN au sud de Pré à Germain, et à une partie du centre de la PKN, aux deux extrémités et au centre de la PKS, et à l'extrémité nord de la PRN. Il existe par conséquent un fort potentiel de réouverture de la passe nord et de brèches dans le centre de la PKN et la PKS. Sur la dune de Bouctouche, avec une limite de jet de rive plus faible, à 3,25 m, située là encore dans la gamme des hauteurs du pied de dune observées sur le MAN LiDAR, le premier segment de 1,2 km de l'île-barrière serait entièrement submergé, ainsi que deux autres endroits situés sur les deux premiers kilomètres; le débordement (possiblement accompagné de l'ouverture de brèches) toucherait la Grande Brèche (kilomètre 4,5), les alentours du kilomètre 5,3, une grande section de près de 700 m entre les kilomètres 7 et 8 et les environs du kilomètre 9,7; il serait possible ou probable à cinq autres endroits entre les kilomètres 3,5 et 11 sur la flèche (figure 7). L'occurrence d'épisodes de fortes vagues en décembre et les projections d'une réduction de la saison de glace, couplées à l'élévation en cours du niveau de la mer, donnent à craindre que les débordements et ouvertures de brèches dans les îles-barrières de Kouchibouguac et de Bouctouche deviennent plus fréquents et plus destructeurs à l'avenir, et qu'il se produise davantage d'érosion et une migration vers les terres de l'extrémité nord (section proximale) de la flèche.

Comme on l'a déjà mentionné, il y a progradation (avancée) du trait de côte à Cap-Lumière, à Côte-Sainte-Anne et à Saint-Édouard-de-Kent en amont des structures portuaires par rapport à la dérive. Sur le reste de la côte entre la pointe des Mares et Bouctouche, on peut s'attendre à une accélération de l'érosion, qui menacera les propriétés, routes et autres infrastructures riveraines. C'est une côte le long de laquelle l'érosion a déjà obligé la relocalisation des routes et l'abandon des bâtiments (figure 2). Cet état de choses se poursuivra, avec un impact économique encore plus grand, en raison de l'accélération des taux d'érosion et de l'augmentation des investissements.

Ollerhead et Davidson-Arnott (1995b) ont élaboré un bilan sédimentaire préliminaire pour la flèche de Bouctouche (la Dune), puis ont conclu que la section proximale devient plus étroite à cause de l'élévation du niveau de la mer et qu'elle migre vers les terres depuis plusieurs siècles. C'est ce qui a entraîné l'érosion des vieilles crêtes incurvées (maintenant complètement tronquées), à l'arrière de la zone de transition et dans la première partie de la section distale (figure 11). Giangioppi (2004) a conçu un bilan sédimentaire révisé et montré que la plus grande partie du transfert de sédiments vers les terres a été associée à l'ouverture de brèches dans les dunes pendant de fortes tempêtes, surtout en 1938, en 1971 et en 2000. Elle a cependant conclu que la bordure de la flèche du côté de la baie n'a pas migré vers les terres pendant cette période, puisque les dépôts reliés au débordement étaient largement confinés à la pente d'arrière de la flèche actuelle. Forbes *et al*. (2004) ont montré que la grande tempête d'octobre 2000 avait déstabilisé les dunes de la section proximale, ce qui a entraîné beaucoup de sédimentation lors du débordement de cette tempête, et pendant d'autres tempêtes plus faibles, en 2001 et après. Cette situation a marqué le début d'une nouvelle phase de migration vers les terres. En même temps, la courte et étroite crête de gravier formée par

la tempête devant l'Éco-Centre, tout au début de la flèche, a migré vers en direction des terres et s'est étendue sous la passerelle, comme le montrent les séries de photos prises de la tour de l'Éco-Centre (figure 13).

Figure 11. Passerelle endommagée et dépôts de bouillies de glace et de sable à la Dune de Bouctouche, à la suite de la tempête du 27 décembre 2004 (Photo : Réal Daigle).

De la tourbe exposée dans la plage sous l'Éco-Centre Irving à l'extrémité proximale de la flèche a été datée au carbone radioactif; son âge étalonné est de 985 ± 70 années calendaires avant 2000, c.-à-d. 1015 AD ± 70 (Ollerhead et Davidson-Arnott, 1995b). Ces auteurs ont raisonnablement conclu que la tourbe s'était formée derrière la flèche et que celle-ci avait probablement une largeur au moins équivalente à sa largeur actuelle (300 m), ce dont ils ont déduit un taux moyen de migration vers les terres supérieur ou égal à 0,3 m/an (30 m/siècle) au cours des 1000 dernières années et une migration proportionnelle du point d'ancrage vers le sud-est. On peut s'attendre à ce que cette situation se poursuive, mais plus rapidement, à cause de l'accélération de l'élévation relative du niveau de la mer due au changement climatique. On peut aussi raisonnablement penser que des brèches s'ouvriront plus souvent en raison de l'allongement de la saison pendant laquelle les tempêtes surviennent sur des eaux libres, de la possibilité que les tempêtes soient plus intenses et de l'élévation du niveau relatif de la mer. Dans ce scénario, les brèches importantes, comme la Grande Brèche, peuvent se maintenir et s'élargir, ce qui conduirait à terme à l'insularisation de la partie distale de la flèche, comme le pense Ollerhead et Davidson-Arnott (1995a), comme on l'a

observé pour un système semblable de grande flèche à pointe libre dans la baie St-Georges, à Terre-Neuve (Shaw et Forbes, 1987, 1992), et comme nous pensons qu'a pu se former l'île de Cocagne (voir la section 4.5.3.2).

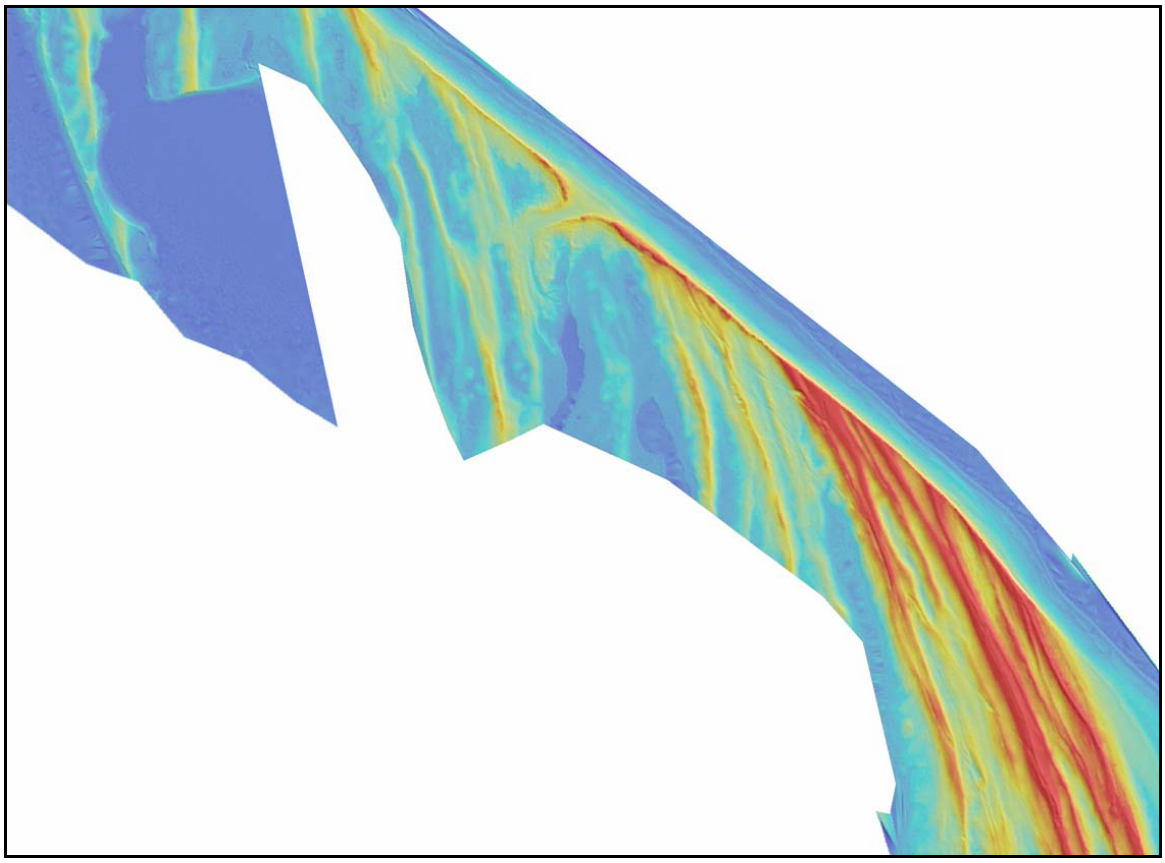


Figure 12. Image LiDAR d'une section de la Dune de Bouctouche. Cartographie par LiDAR valide pour avril 2004, preparée par Applied Geomatics Research Group, Nova Scotia Community College.

Figure 13. Migration de la Dune de Bouctouche vers l'intérieur entre 1999 (photo à gauche, B. Taylor) et 2004 (photo à droite, G. Manson)

4.5.3.2 Cocagne à Shemogue

Dans le but d'obtenir de nouvelles données sur l'évolution des côtes et des habitats côtiers, quatre secteurs du littoral sud-est du Nouveau-Brunswick ont fait l'objet d'une cartographie géomorphologique détaillée. Il s'agit, du nord vers le sud, des secteurs du grand Cocagne, de l'Aboiteau et de Shemogue. Un quatrième secteur, plus petit, a aussi été cartographié, soit celui de la Plage Parlee.

4.5.3.2.1 Description des secteurs étudiés

Grand Cocagne

Le secteur du grand Cocagne est situé à 15 km au nord de Shediac. Les environs du quai de Saint-Thomas-de-Kent constituent sa limite nord, tandis que les environs du quai de Grande-Digue forment sa limite sud (Figure 14). La longueur approximative de la côte de ce secteur est de 66 kilomètres et la superficie de ses terres côtières (plages, dunes, marais) est d'environ 178 hectares.

Du point de vue de l'occupation du territoire, le secteur du grand Cocagne est dominé par le caractère rural de ses communautés. Les villages de Cocagne et de Grande-Digue comptent 2 423 et 2 109 habitants, respectivement (Statistiques Canada, Recensement de 2001). Les principales activités économiques des collectivités du grand Cocagne sont associées à l'agriculture, à l'industrie de la pêche (homard et hareng), et au tourisme. Dans les environs du village de Cocagne, des terres sont affectées à la culture des pommes, des légumes et des petits fruits. En raison de sa proximité à des sites touristiques fortement publicisés, la région du grand Cocagne jouit des retombées économiques liées au tourisme balnéaire et culturel : elle est située à moins de 20 km du parc provincial de la Plage Parlee, du Pays de la Sagouine et de l'Éco-Centre Irving de la Dune de Bouctouche. De nombreux terrains de camping sont présents le long des côtes du secteur.

La zone littorale du grand Cocagne comporte deux environnements côtiers distincts, soit la côte directement exposée au détroit de Northumberland, plus soumise à l'action des vagues, ainsi que la côte du havre de Cocagne et de la rivière Cocagne, moins soumise à l'action des vagues. La zone littorale telle qu'étudiée dans le cadre de ce travail inclut l'ensemble de la côte exposée au détroit ainsi que la côte du havre; seule la côte de la rivière Cocagne n'a pas été incluse dans l'étude.

Du point de vue géomorphologique, le secteur du grand Cocagne est surtout caractérisé par la présence de falaises rocheuses (grès friable), que l'on trouve dans les environs de Saint-Thomas-de-Kent et du cap de Cocagne. Ailleurs, ce sont les falaises meubles (dépôts de till et autres sédiments) qui dominent. Le long de la côte du havre de Cocagne, abritée des vagues du détroit grâce à la présence de l'île de Cocagne et de la péninsule du cap de Cocagne, des marais maritimes se sont développés, particulièrement dans la partie sud-est du havre. Pour leur part, les plages sableuses et les dunes littorales les mieux développées se trouvent autour de l'île de Cocagne, qui constitue un des endroits les moins anthropisés de ce secteur. Ailleurs, les formes de terrain naturelles sont influencées par la forte présence humaine, principalement en raison des aménagements immobiliers (terrains de camping, résidences, chalets d'été) et des structures de protection le long de la côte (enrochements, murs en bois ou en béton).

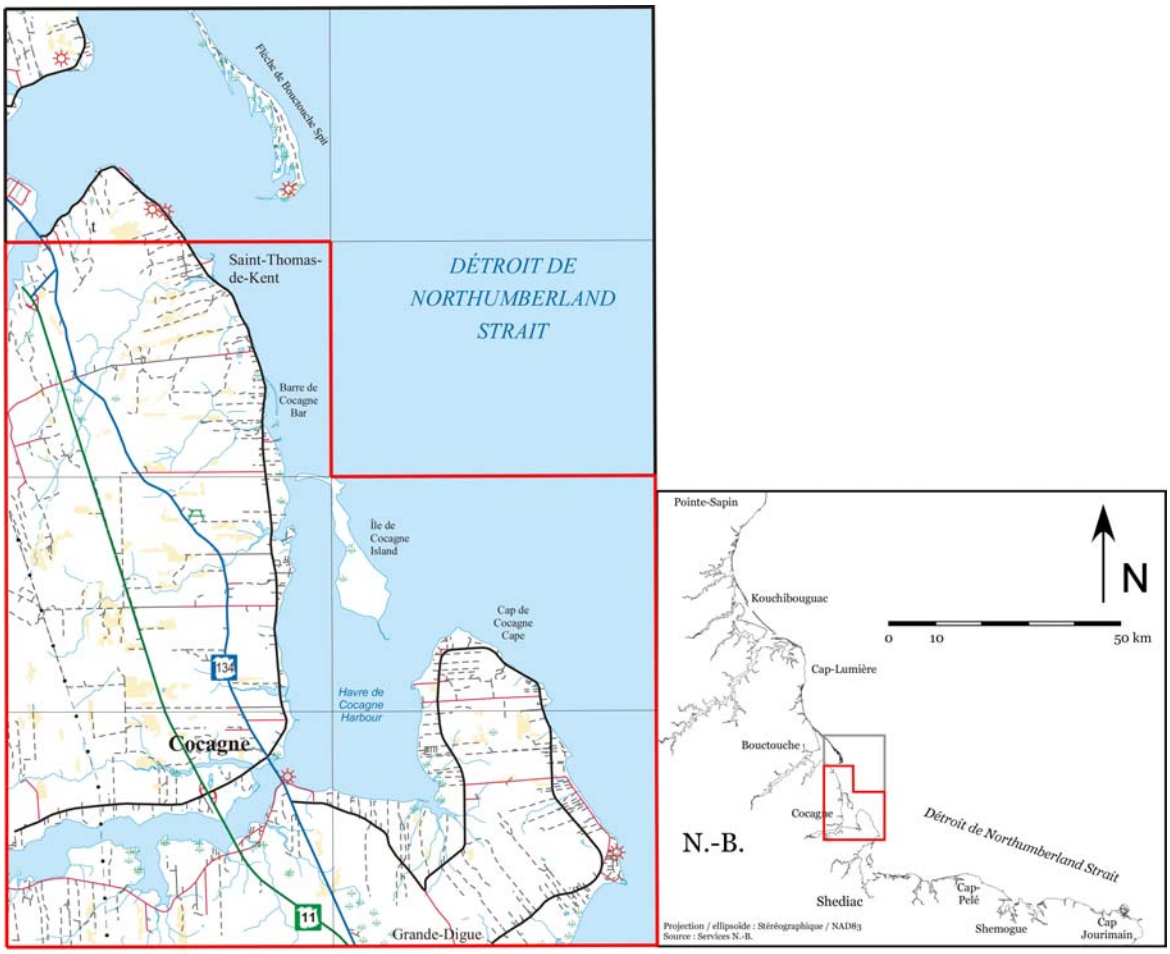


Figure 14. Localisation du secteur à l'étude du grand Cocagne (Nouveau-Brunswick).

Le littoral du grand Cocagne a donc été ciblé comme secteur à l'étude pour les raisons suivantes :

- le caractère «artificiel» ou très anthropogène du paysage en fait un jalon pour l'étude de l'évolution côtière le long du détroit de Northumberland;
- le peu de données disponibles sur l'histoire récente de la migration du trait de côte (taux de recul ou d'avancée).

L'Aboiteau

Le secteur de l'Aboiteau est situé à environ 15 km à l'est de Shediac. La collectivité de Cap-Bimet constitue sa limite ouest, tandis que celle de Trois-Ruisseaux forme sa limite est (Figure 15). La longueur approximative de la côte de ce secteur est de 60 kilomètres et la superficie de ses terres côtières (plages, dunes, marais) est de 363 hectares.

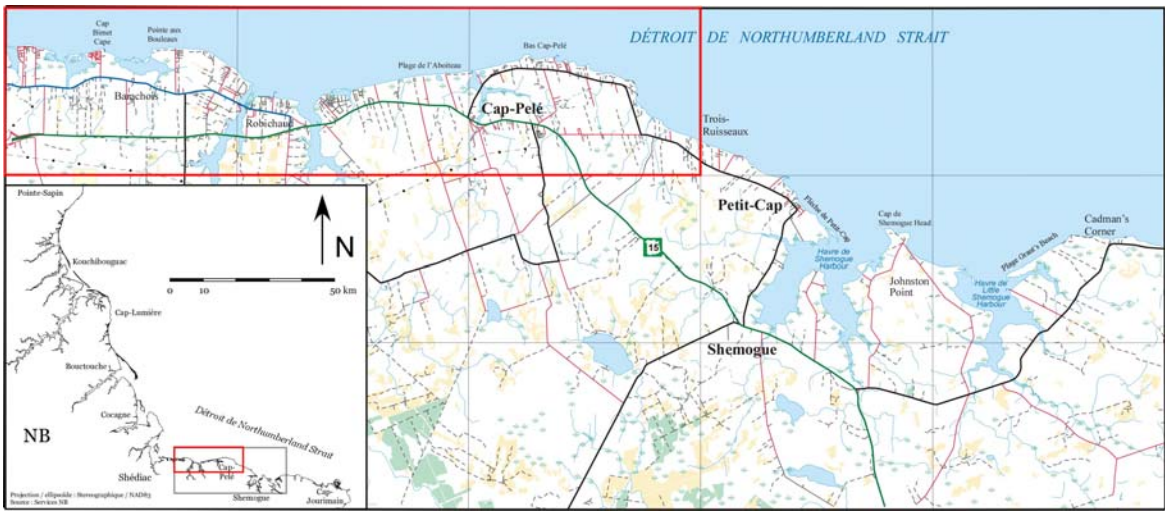


Figure 15. Localisation du secteur à l'étude de l'Aboiteau (Nouveau-Brunswick).

Du point de vue de l'occupation du territoire, le secteur de l'Aboiteau est dominé par le caractère rural de ses communautés. Le village de Cap-Pelé compte 2 266 habitants, tandis que Grand-Barachois, division qui regroupe les autres collectivités du secteur à l'étude, compte 2 521 habitants (Statistique Canada, Recensement de 2001). Les principales activités économiques de ces collectivités sont associées à l'industrie de la pêche (homard et hareng) et au tourisme. Les environs du village de Cap-Pelé possèdent de nombreuses «boucanières» (installations pour le fumage du poisson, notamment le hareng); les terres sont principalement affectées à la culture de la pomme de terre. Le secteur de l'Aboiteau jouit des retombées économiques liées au tourisme balnéaire. Il existe de nombreux terrains de camping et des sites de villégiature, le parc de la Plage de l'Aboiteau étant le plus connu d'entre eux.

La zone littorale de l'Aboiteau comporte deux environnements côtiers distincts, soit la côte directement exposée au détroit de Northumberland, plus soumise à l'action des vagues, et la côte des rivières Aboujagane et Kouchibouguac, moins soumise à l'action des vagues. La zone littorale telle qu'étudiée dans le cadre de ce travail inclut l'ensemble de la côte exposée au détroit et la côte formant l'embouchure des deux rivières, en aval des ponts.

Du point de vue géomorphologique, le secteur de l'Aboiteau est caractérisé par la présence de falaises rocheuses (grès friable) et de flèches sableuses. Les plus grands promontoires rocheux se situent à Cap-Pelé et à Bas-Cap-Pelé, alors que la principale flèche littorale du secteur est la dune de l'Aboiteau, située entre Cap-Pelé et Robichaud. Cette dernière fait environ 5,6 km de longueur et elle est orientée selon un axe est-ouest. Des petites flèches littorales, faisant moins d'un kilomètre de longueur, sont aussi présentes dans le secteur; elles sont localisées à l'embouchure d'estuaires, notamment ceux de Barachois et de la rivière Aboujagane (Figure 15). La zone littorale des estuaires est caractérisée par des falaises meubles (dépôts de till et autres sédiments), mais surtout par des marais maritimes, qui occupent de façon générale leur partie amont. Les marais sont aussi présents, en superficie plus restreinte, en bordure des anses évasées des estuaires (parties concaves de la côte). Le secteur de l'Aboiteau possède en plus un environnement côtier particulier, soit des marais à barachois. Ce sont des milieux humides côtiers qu'on trouve derrière les dunes littorales, coincés entre ces dernières et la terre ferme. En raison de l'ouverture et de la fermeture épisodique de brèches dans le front dunaire, l'eau des marais à barachois est tantôt plus saumâtre, tantôt plus douce.

Le littoral de l'Aboiteau a donc été ciblé comme secteur à l'étude pour les raisons suivantes :

- la présence de marais à barachois, forme de terrain peu fréquente le long de la côte du détroit de Northumberland;
- le peu de données disponibles sur l'histoire récente de la migration du trait de côte (taux de recul ou d'avancée).

Shemogue

Le secteur de Shemogue est situé à environ 25 km à l'est de Shediac. La collectivité de Trois-Ruisseaux constitue sa limite ouest, tandis que le lieu-dit de Cadman's Corner forme sa limite est; ce secteur est contigu à celui de l'Aboiteau (figure 16). La longueur approximative de la côte de ce secteur est de 105 kilomètres et la superficie de ses terres côtières (plages, dunes, marais) de 844 hectares.

Du point de vue de l'occupation du territoire, le secteur de Shemogue est dominé par le caractère rural de ses communautés. On estime que les collectivités de Petit-Cap et de Trois-Ruisseaux comptent approximativement 400 habitants et celle de Shemogue 150 habitants. Les principales activités économiques de ces collectivités sont associées à l'industrie de la pêche (homard et hareng). On y trouve plusieurs «boucanières» (installations pour le fumage du poisson, notamment le hareng). Petit-Cap et Shemogue comptent aussi d'importantes compagnies de construction de bateaux de pêche. Chapman's Corner, Johnson Point Road et Cadman's Corner sont de petites collectivités de moins de 100 habitants dont l'activité économique est d'abord à caractère agricole (pommes de terre, maraîcher, bétail), mais elle est aussi liée, dans une moindre mesure, à la pêche et à l'ostréiculture. En raison des destinations touristiques adjacentes, telles Shediac et le parc provincial de Murray Beach, la région de Shemogue profite aussi des retombées économiques liées au tourisme.

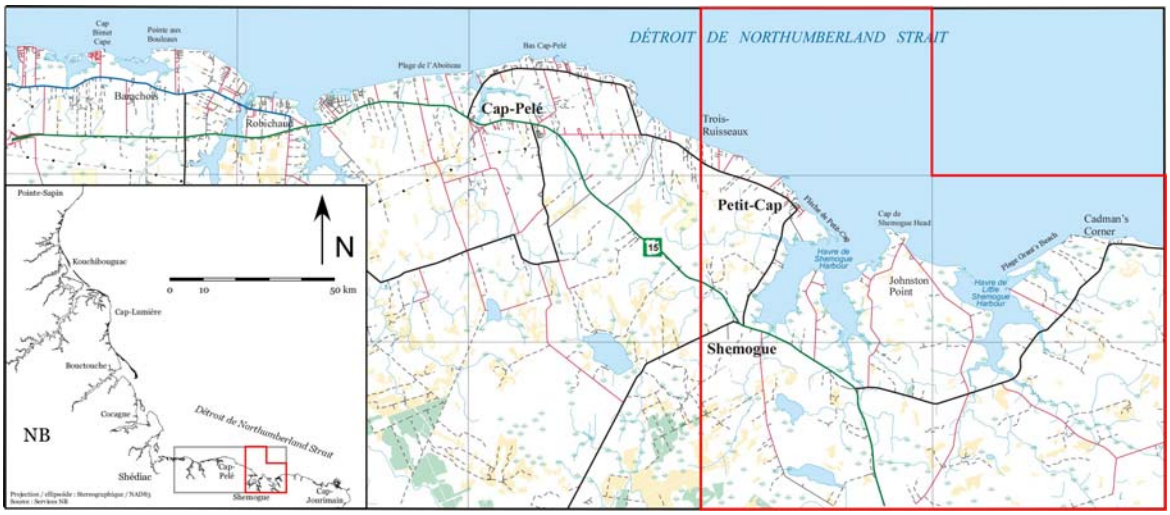


Figure 16. Localisation du secteur à l'étude de Shemogue (Nouveau-Brunswick).

La zone littorale de Shemogue comporte deux environnements côtiers distincts, soit la côte directement exposée au détroit de Northumberland, plus soumise à l'action des vagues, et la côte des estuaires de Shemogue et de Little Shemogue, moins soumise à l'action des vagues. La zone littorale telle qu'étudiée dans le cadre de ce travail inclut l'ensemble de la côte exposée au détroit ainsi que la côte des deux estuaires.

Du point de vue géomorphologique, la côte exposée au détroit est caractérisée par la présence de falaises rocheuses (grès friable) et de falaises meubles (dépôts de till et autres sédiments), ainsi que de flèches littorales (figure 17). Ces flèches sont localisées de chaque côté de l'embouchure des deux estuaires (Shemogue et Little Shemogue). Les plages et les dunes sableuses qui leur sont associées referment donc partiellement les estuaires, et aident ainsi à créer un environnement plus calme, abrité des vagues plus énergétiques du détroit. Pour sa part, la zone littorale des estuaires est caractérisée par des falaises meubles, mais l'environnement dominant est le marais maritime. Les marais maritimes occupent, de façon générale, l'arrière des flèches et la partie amont des estuaires.

Bien que le secteur de Shemogue soit occupé depuis fort longtemps, les principaux environnements côtiers qu'on y trouve montrent peu ou pas de signes de perturbations par l'être humain. Mis à part les quais de Petit-Cap et de la Pointe Amos, et les canaux de drainage creusés dans certains marais maritimes, les interventions humaines dans le milieu naturel sont peu nombreuses.

Figure 17. Certains environnements et caractéristiques côtières de la zone littorale de Shemogue (extrait de la photographie aérienne provinciale de 2001 : DNRE01512-150).

Le littoral de Shemogue a donc été ciblé comme secteur à l'étude pour les raisons suivantes :

- le caractère «naturel» ou peu anthropogène du paysage en fait un jalon pour l'étude de l'évolution côtière le long du détroit de Northumberland;
- le peu de données disponibles sur l'histoire récente de la migration du trait de côte (taux de recul ou d'avancée).

Plage Parlee

Un quatrième secteur a été mis tardivement à l'étude pour le projet, soit celui de la Plage Parlee et de ses plages avoisinantes, situées au nord-est de Shediac (figure 18). Le quai de la Pointe-du-Chêne forme la limite ouest du secteur, tandis que la collectivité de Cap-Brulé forme sa limite est. La longueur approximative de la côte de ce secteur est de 2,8 kilomètres et la superficie ses terres côtières (plages, dunes, marais) est d'environ 50 hectares (figure 18).

La Plage Parlee est au centre du développement touristique balnéaire provincial. Elle jouit d'une renommée internationale depuis près d'un siècle et accueille plus de 500 000 visiteurs chaque année. Les raisons motivant l'ajout de la Plage Parlee comme secteur à l'étude tiennent au fait qu'elle est l'objet d'un important programme d'engraissement de

plage depuis la fin des années 1980, et que la province du Nouveau-Brunswick veut veiller à la pérennité du site face aux impacts potentiels de la hausse accélérée du niveau de la mer et du changement climatique.

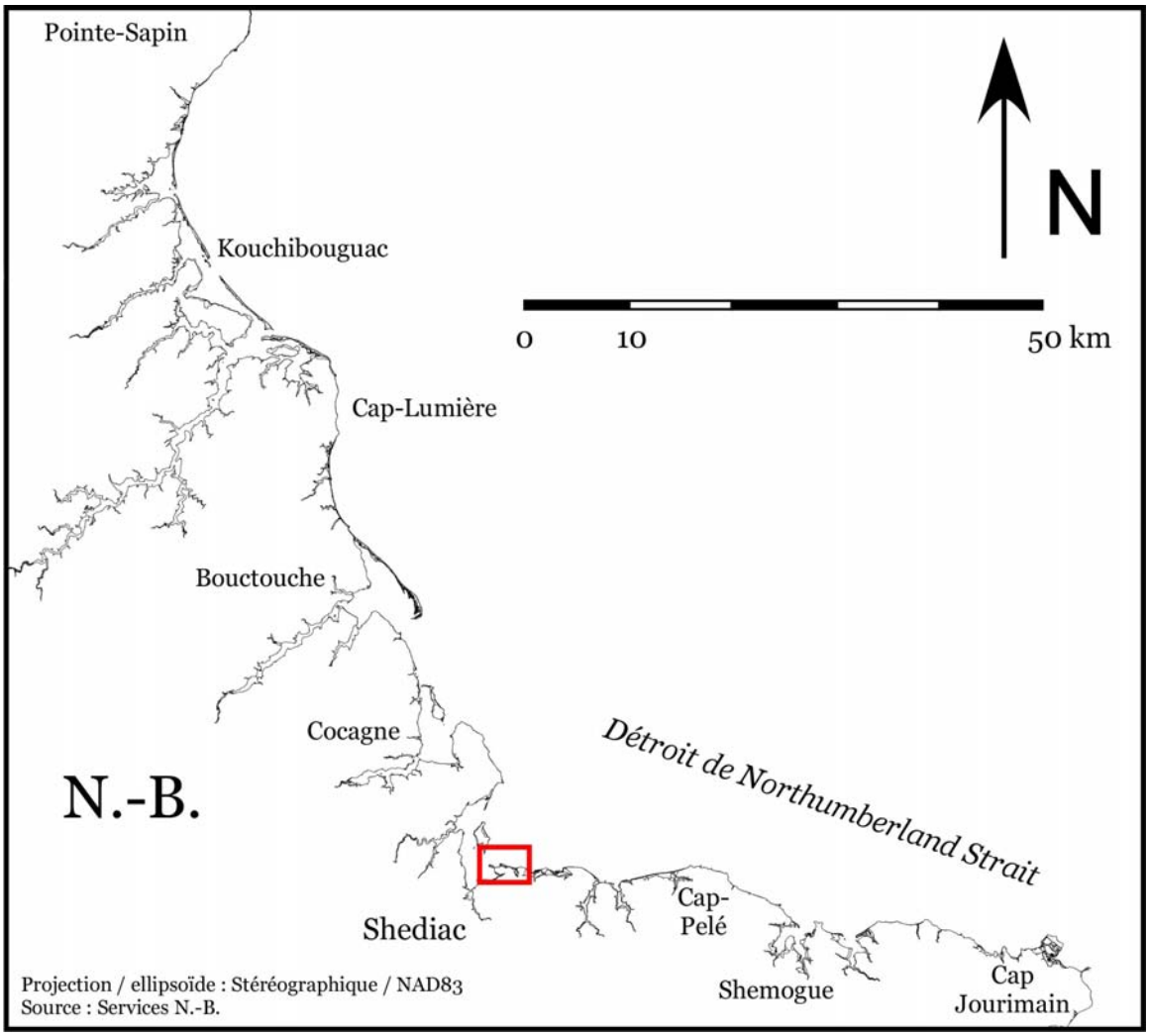


Figure 18. Localisation du secteur à l'étude de la Plage Parlee (Nouveau-Brunswick).

4.5.3.2.2 Production des cartes géocodées multidates

La composante «Érosion des côtes» a comme objectif principal de déterminer les impacts physiques du changement climatique et de la hausse accélérée du niveau de la mer relatif sur le littoral du détroit de Northumberland, et d'obtenir pour les secteurs à l'étude les taux de déplacement du trait de côte dans le passé récent afin de mieux prévoir ses déplacements futurs. Pour ce faire, il est proposé une cartographie géocodée multidates, à partir de trois séries de photographies aériennes, soit celles de 1944, de 1971 et de 2001. D'autres séries ont été utilisées en fonction de besoins précis (1938, 1953, 1963, 1967, 1970, 1973, 1982 et 1995). Ces photographies aériennes ont servi à la numérisation des formes de terrain de la zone littorale et ultimement au calcul du déplacement du trait de côte sur la période étudiée.

Phase préparatoire

Dans le but d'augmenter la précision des cartes multidates produites, les collègues de travail de la composante Érosion des côtes se sont entendus pour procéder selon une méthodologie reconnue, employée au ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick (Direction des études géologiques) et par les chercheurs en géomorphologie (Hughes *et al*., 2006; Pierre, 2006; Ruggiero *et al*., 2003; Zuzek *et al*., 2003). Un des éléments critiques de cette démarche est de s'assurer que la taille des pixels des photographies aériennes numérisées est connue et qu'elle est comparable entre chacune des photographies d'une même série (ou année) et aussi d'une série à l'autre (d'une année à l'autre).

Les photographies aériennes ont été numérisées à l'aide du balayeur optique Microtek 6800 XP à partir du bureau d'Environnement Canada (Sackville, Nouveau-Brunswick). La surface vitrée du balayeur ainsi que chacune des photographies aériennes ont été nettoyées de toute impureté préalablement à la phase de numérisation. Les photographies aériennes ont toutes été numérisées afin qu'un pixel représente au sol une surface d'environ 50 cm sur 50 cm. Au total, 187 photographies aériennes ont été numérisées dans le cadre de ce travail (tableau 1).

Une fois les photographies aériennes numérisées, des points d'ancrage ont été identifiés. Ces points d'ancrage, parfois appelés «points de contrôle» ou «points de repère», représentent des éléments du paysage qui sont reconnaissables d'une année à l'autre, et qui n'ont pas changé d'emplacement. Ceux-ci peuvent correspondre à des coins de maisons, à des intersections de routes, à des canaux de drainage et même à des limites de champs en culture. Dans les secteurs où la présence humaine est limitée, comme par exemple dans le cœur de marais maritimes ou bien au bout d'une flèche littorale, les points d'ancrage sont plus difficilement identifiables. Dans ces cas-là, des éléments naturels ont été utilisés : des bosquets de myrique de Pennsylvanie, des pannes dunaires, des mares ou des étangs dont les limites n'ont visiblement pas changé.

Tableau 1. Année et nombre de photographies aériennes numérisées afin de produire les cartes géocodées multidates des quatre (4) secteurs à l'étude.

Année *Year*	Échelle approx. *Approx. scale*	**Grand Cocagne**	**L'Aboiteau**	**Shemogue**	**Plage Parlee**	
1938	10 000	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	
1944	17 454	13 (34)	11 (21)	17 (41)	n.c.	
1953	16 500	n.c.	n.c.	9 (37)	3	
1963	17 240	n.c.	n.c.	6 (25)	3	
1967	16 500	n.c.	n.c.	n.c.	1	
1970	11 038	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	
1971	11 038	n.c.	15 (29)	25 (62)	n.c.	
1973	10 200	20 (65)	n.c.	n.c.	3	
1982	13 024	n.c.	n.c.	10 (59)	2	
1995	35 000	n.c.	n.c.	n.c.	1	
2001	12 500	18 (48)	13 (26)	18 (48)	2	
	Total	**51** (147)	**39** (76)	**84** (272)	**14**	**187** (509)

n.c. : série non cartographiée
( ) : nombre de photographies utilisées

Les points d'ancrage identifiés sur une série de photographies aériennes en particulier doivent se retrouver sur les orthophotographies numériques (1996) de Services Nouveau-Brunswick. Au moment du géocodage d'une photographie, le logiciel positionne les points d'ancrage de la photographie aérienne non géocodée par rapport aux mêmes points d'ancrage de l'orthophotographie numérique de 1996 et lui attribue les mêmes coordonnées géospatiales de longitude et de latitude (figure 19). La photographie aérienne et les éléments cartographiés sont ainsi positionnés dans l'espace. L'étape du géocodage a été faite à l'aide du système d'information géographique (SIG) CARIS 4.4a , dans les bureaux prêtés par le Département d'histoire et de géographie de l'Université de Moncton (Laboratoire de géographie physique).

L'étape de l'identification des points d'ancrage est cruciale au projet. Non seulement un nombre suffisant de points d'ancrage est recommandé, mais leur localisation doit être sûre; ces points doivent également être bien répartis sur la photographie aérienne, à proximité des éléments cartographiés (Hughes *et al*., 2006). Ainsi, des points d'ancrage situés trop loin de la zone littorale n'ont pas été utilisés, même s'ils pouvaient être très fiables. Au moment du géocodage des photographies, le positionnement d'un point d'ancrage de 1996 et du même point d'ancrage sur la photographie aérienne géocodée devait, idéalement, être inférieur à 5 m pour que le processus de géocodage soit considéré réussi (valable). Dans le cas où la marge d'erreur était trop grande, d'autres points de contrôle ont été identifiés, chaque fois que c'était possible.

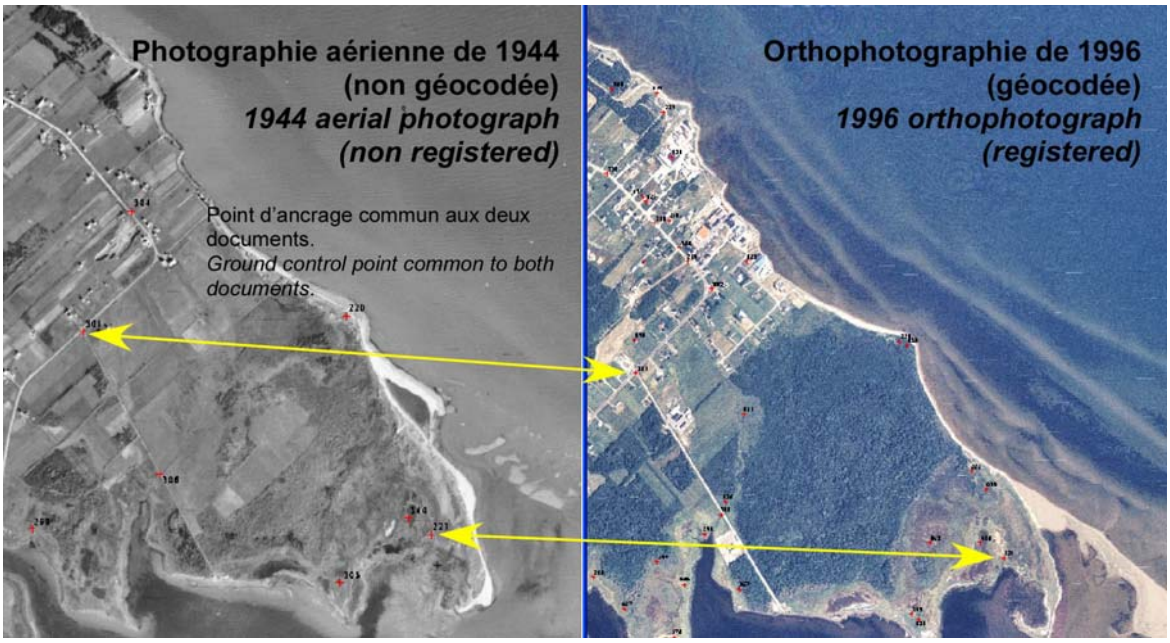


Figure 19. Exemple de géocodage d'une photographie aérienne à l'aide de l'identification de points d'ancrage.

Afin de géocoder les 187 photographies aériennes nécessaires pour couvrir la totalité des secteurs à l'étude, 1 140 points d'ancrage furent utilisés; un même point d'ancrage pouvait servir à géocoder des photographies adjacentes. La marge d'erreur minimale obtenue lors de la superposition des points d'ancrage a été de 0,010 m et la marge d'erreur maximale obtenue a été de 5,899 m. Le tableau 2 donne un ordre de grandeur, par rapport à la superposition des points, permettant d'évaluer la qualité du processus de géocodage des différentes séries de photographies aériennes utilisées.

Tableau 2. Marge d'erreur moyenne (m) des points d'ancrage utilisés pour le géocodage des différentes séries de photographies aériennes (par rapport aux mêmes points d'ancrage présents sur l'orthophotographie de 1996).

Grand Cocagne			L'Aboiteau			Shemogue		
1944	1973	2001	1944	1971	2001	1944	1971	2001
1,678	1,151	1,263	2,212	1,468	1,431	1,730	1,204	1,378

Cartographie numérique de la zone littorale

La cartographie numérique des formes de terrain de la zone littorale des secteurs à l'étude a également été faite à l'aide du système d'information géographique (SIG) CARIS 4.4a dans les bureaux prêtés par le Département d'histoire et de géographie de l'Université de Moncton (Laboratoire de géographie physique). En plus de consulter les ouvrages scientifiques (locaux, régionaux et internationaux) et les collègues de travail du volet Érosion des côtes, quelques sorties de reconnaissance du terrain ont été effectuées en 2003, en 2004 et en 2005, mais l'essentiel du travail cartographique est basé sur l'interprétation des photographies aériennes à l'aide d'un stéréoscope binoculaire Topcon (modèle A700).

Les cartes géocodées multidates ont été conçues dans le but d'identifier deux limites géomorphologiques correspondant à des niveaux atteints par la mer (figure 20), soit :

- le trait de côte, qui est le niveau supérieur des hautes eaux, NSHE, c'est-à-dire le niveau des marées hautes supérieures ou des vagues de tempête;
- la ligne de rivage, qui est le niveau ordinaire des hautes eaux, NOHE, c'est-à-dire le niveau des marées hautes normales.

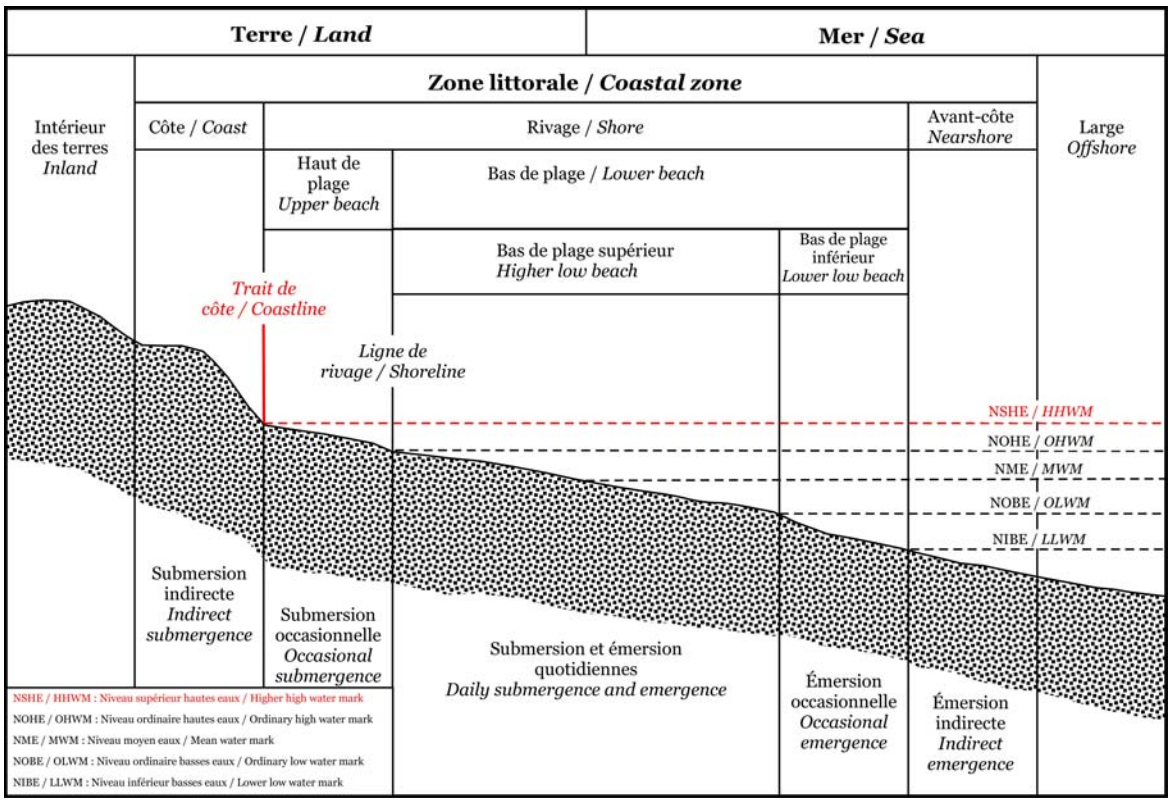


Figure 20. Délimitation de la zone littorale (modifiée de Bérubé et Thibault, 1996).

La forme de terrain atteinte par ces deux niveaux d'eau a aussi été précisée. Par exemple, le trait de côte peut correspondre à la limite d'une dune ou d'une falaise, alors que la ligne de rivage peut correspondre à la limite d'une dune-plage ou d'un marais. En

plus de ces limites, la cartographie de la zone littorale a aussi été conçue pour permettre l'identification de surfaces correspondant à des habitats spécifiques, entre autres les plages sableuses ou de galets, le milieu dunaire, les marais maritimes, les marais saumâtres de transition, les plans d'eau, etc., ainsi que des zones marquées par les aménagements humains. Le tableau 3 présente les différents habitats et aménagements cartographiés.

Tableau 3. Habitats et aménagements cartographiés, et leur couleur respective (telle qu'elle apparaît sur les cartes géocodées, à l'Annexe D).

Description de l'habitat Habitat description	Couleur Color
Océan / Ocean Canal de drainage / Drainage ditch Mare semi-ouverte / Semi-opened salt panne Étier / Tidal creek	
Plage sableuse / Sandy beach Caoudeyre / Blowout Brèche / Breach Nappe de débordement / Washover deposit Surface sableuse / Sandy surface	
Plage de galets / Boulder beach	
Dune active et fixée / Active and fixed dune Dune perchée / Cliff-top dune Dune élémentaire / Incipient dune	
Marais maritime / Salt marsh	
Mare / Salt panne	
Marais saumâtre de transition / Brackish transition marsh	

Description de l'habitat Habitat description	Couleur Color
Marais à barachois / Barachois marsh	
Mare d'eau douce / Fresh water pond Cours d'eau douce / Fresh water creek Drain, marais à barachois / Ditch, barachois marsh	
Terre ferme / Upland	
Structure de protection / Protection structure	
Chaussée routière / Causeway for road Quai / Wharf Carrière / Quarry	
Passerelle en bois / Wooden beach access	
Habitation, bâtiment / Residence, building	
Remplissage de marais / Marsh infilling	

Le trait de côte

Dans le cas d'une flèche ou d'une dune littorale, le trait de côte cartographié correspond soit à la limite de la végétation pérenne, c'est-à-dire au front de l'ammophile (*Ammophila breviligulata*) sur le haut de plage, ou en l'absence de végétation, à la falaise dunaire (figure 21).

Dans le cas des falaises, le trait de côte correspond normalement à la base de la falaise. Par contre, étant donné que plusieurs séries de photographies aériennes ne permettent pas de bien identifier la base de la falaise (ex : zones ombragées en raison de la présence d'arbres ou d'un important relief), le sommet de la falaise a donc été utilisé pour la cartographie du trait de côte (figures 21 et 22).

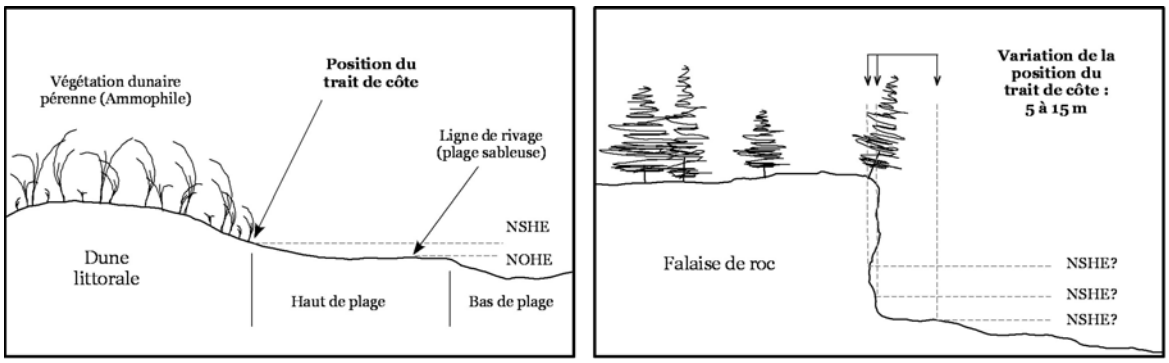


Figure 21. Exemples de positionnement du trait de côte et de problèmes rencontrés dans l'interprétation du trait de côte avec l'usage de photographies aériennes.

Le trait de côte associé au marais maritime (marais salé) correspond à la limite entre deux associations végétales, l'une dominée par la combinaison Spartine alterniflore, Salicorne d'Europe et Spartine étalée (*Spartina alterniflora*, *Salicornia europea* et *Spartina patens*) et l'autre par la combinaison Spartine pectinée, Jonc de Gérard et Jonc de la Baltique (*Spartina pectinata*, *Juncus gerardii* et *Juncus balticus*). Sur les photographies aériennes, la zone dominée par la première combinaison est de teinte plutôt claire, comparativement à la deuxième combinaison de plantes qui apparaît en teinte plus foncée. Le domaine occupé par *S.alterniflora*, *S.europea* et *S.patens* est le marais maritime proprement dit (ou bas marais), et il est ponctué de mares individuelles ou semi-ouvertes, à forte salinité. Pour sa part, le domaine occupé par *S.pectinata*, *J.gerardii* et *J.balticus* est légèrement surélevé et il est en contact avec la terre ferme; il forme donc la partie haute du marais (nommée «marais saumâtre de transition» dans la présente étude). À l'intérieur du marais saumâtre de transition peuvent subsister des plans d'eau douce à saumâtre. Le marais maritime est submergé par la marée haute de façon mensuelle, tandis que le marais saumâtre de transition n'est qu'occasionnellement submergé par l'eau de mer.

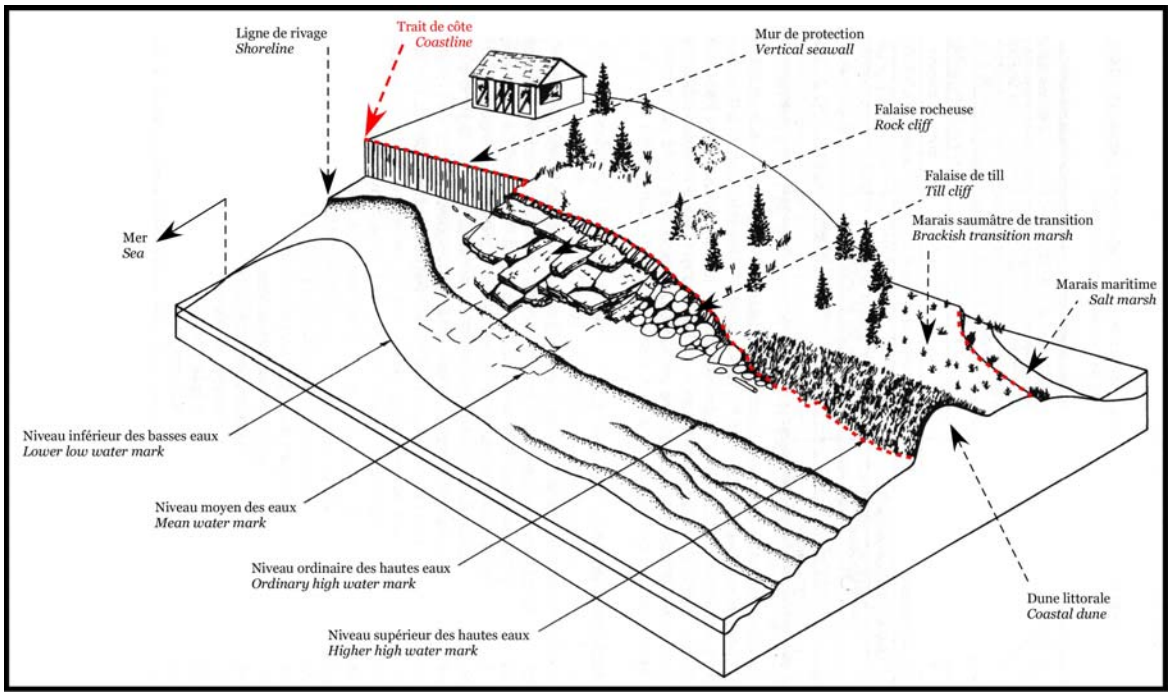


Figure 22. Exemple du positionnement du trait de côte le long de certaines formes de terrain de la zone littorale (modifiée de Bérubé et Thibault, 1996).

La ligne de rivage

Dans le cas d'une plage sableuse, la ligne de rivage cartographiée correspond au contact du sable sec avec le sable humide (figure 22). De façon générale, le sable humide est de couleur plus foncée, tandis que le sable sec est de couleur plus claire. Sur les plages sableuses, la ligne de rivage fait donc la démarcation entre le haut de plage (sable sec) et le bas de plage (sable humide). Toutefois, il est reconnu que la position de la ligne de rivage (contact sable sec/sable humide) peut varier en raison de phénomènes récents survenus juste avant la prise de la photographie aérienne, par exemple de fortes précipitations, ou une marée haute mensuelle. Plusieurs géomorphologues du littoral utilisent néanmoins ces limites éphémères pour représenter la ligne de rivage (Boak et Turner, 2005).

La ligne de rivage associée aux marais maritimes correspond le plus souvent à la limite de la végétation. En présence d'une microfalaise taillée dans le marais, le sommet de celle-ci correspond à la ligne de rivage.

Aucune ligne de rivage n'a été cartographiée devant les falaises meubles ou rocheuses. En effet, la résolution ou clarté des photographies aériennes ne permettait pas toujours de confirmer la présence d'une plage à la base de la falaise. Il faut dire que les plages qui bordent ces falaises sont souvent très étroites (moins de 5 m) ou peu épaisses (moins de 50 cm), et qu'il devient difficile par photo-interprétation de distinguer la limite entre le sable sec et le sable humide. Ainsi, dans plusieurs cas, la position de la ligne de rivage correspond ni plus ni moins qu'à la base de la falaise (figure 22); c'est pourquoi celle-ci n'a pas été cartographiée.

Qualité des cartes et précision des données

Les cartes numériques multidates conçues à partir de séries de photographies aériennes comportent une erreur de positionnement inhérente à la méthode utilisée, et ce, en dépit du fait que de nombreuses mesures de contrôle de la qualité et d'augmentation de la précision ont été prises. La marge d'erreur exprime l'incertitude associée à la position des éléments cartographiés par rapport à leur position réelle sur le terrain.

Toutes les sources d'incertitude ont été prises en compte et intégrées au calcul de la marge d'erreur. Ainsi, une mesure de distance (i.e. la largeur d'une plage) effectuée à partir des cartes sera accompagnée d'une marge d'erreur, exprimée en mètres. Par exemple, le calcul de la marge d'erreur associée à une mesure du déplacement du trait de côte entre 1944 et 1971 correspond à la somme des éléments suivants :

$$\text{Marge d'erreur} = G1 + G2 + P1 + P2 + R$$

où,

- G1 : marge d'erreur moyenne des points d'ancrage suivant le géocodage de la photographie aérienne de 1944;
- G2 : marge d'erreur moyenne des points d'ancrage suivant le géocodage de la photographie aérienne de 1971;
- P1 : marge d'erreur associée à la justesse du positionnement lors de la cartographie, relativement à la qualité de la photographie de 1944 (résolution et clarté du tirage) et l'habileté du cartographe;
- P2 : marge d'erreur associée à la justesse du positionnement lors de la cartographie, relativement à la qualité de la photographie de 1971 (résolution et clarté du tirage) et l'habileté du cartographe;
- R : marge d'erreur inhérente à la résolution de l'orthophotographie de 1996 (document utilisé pour réaliser le géocodage des photographies de 1944 et de 1971 à partir de points d'ancrage).

Pour obtenir la marge d'erreur moyenne annuelle, il suffit de diviser la marge d'erreur par le nombre d'années formant la période étudiée. Dans l'exemple ci-dessus, la marge d'erreur moyenne annuelle (exprimée en m/an) correspondrait à cette valeur divisée par 27 (années) :

$$\text{Marge d'erreur annuelle} = \frac{G1 + G2 + P1 + P2 + R}{27}$$

Sur les cartes géocodées multidates, 1 595 transects ont été dressés à des intervalles de 50 m et de façon perpendiculaire au trait de côte de l'année la plus récente, soit 2001. Les mesures du déplacement ont été prises à l'intersection formée par les positions du trait de côte de 1944, de 1971 et de 2001 avec un même transect.

Dans le cadre de ce travail, un taux de déplacement du trait de côte supérieur à la marge d'erreur est considéré comme significatif, c'est-à-dire un recul dans le cas d'une valeur négative et une avancée dans le cas d'une valeur positive. Un taux de déplacement du trait de côte égal ou inférieur à la marge d'erreur est considéré comme représentant une «stabilité relative».

Phase d'analyse
L'évolution récente de la zone littorale des secteurs a été étudiée à l'aide d'une analyse qualitative et d'une analyse quantitative des cartes géocodées multidates. L'analyse qualitative porte en grande partie sur l'observation visuelle des changements survenus dans la zone littorale, en comparant les trois principales cartes d'un même secteur (1944, 1971 et 2001). L'analyse quantitative fait appel à des mesures de déplacement du trait de côte effectuées à partir des cartes multidates sur lesquelles figurent les traits de côte des trois principales années cartographiées (1944, 1971 et 2001). L'analyse quantitative fait aussi appel à l'extraction de données de superficies montrant la variation temporelle de l'espace couvert par certains habitats côtiers. Les données relatives à la superficie des habitats côtiers sont présentées dans le chapitre traitant de l'impact de la hausse du niveau de la mer et du changement climatique sur les écosystèmes (section 4.6).

Les différentes figures présentées ici illustrent des évolutions spécifiques et correspondent à des extraits des cartes géocodées multidates. **Les lecteurs et lectrices sont invités à consulter ces cartes ainsi que le tableau présentant l'ensemble des taux d'érosion. (Section 5, Annexes C4-C6, Taux de retrait des dunes et des falaises; Section 5, Annexe D, Distribution des habitats côtiers).**

4.5.3.2.3 Évolution récente des flèches littorales

L'analyse de l'évolution des côtes sableuses s'inspire des types d'évolution reconnus par McBride *et al*. (1995) le long des îles-barrières de la Louisiane, de la Géorgie et de la Floride. Le modèle proposé par ces auteurs a été adapté au contexte de la zone littorale du sud-est du Nouveau-Brunswick.

Sur la période 1944-2001, les dunes et les flèches littorales des trois secteurs à l'étude (grand Cocagne, l'Aboiteau et Shemogue) montrent cinq évolutions distinctes : A) le maintien d'une position relativement stable des sections proximales et médianes de la flèche; B) l'avancée latérale de la section distale de la flèche vers le large; C) le retrait vers l'intérieur des terres de l'ensemble de la flèche; D) le sectionnement et la régression de la flèche; et E) le retrait et la destruction de l'ensemble de la flèche.

A- : Cas du maintien d'une position relativement stable des sections proximale et médiane de la flèche[4]

[4] Type «3» (*Dynamic equilibrium*) de MCBRIDE *et al.* (1995).

La flèche littorale de Grants Beach (secteur de Shemogue) est représentative du premier type d'évolution observé, à savoir le maintien d'une position relativement stable durant les 60 dernières années. Cette évolution est considérée comme représentant un équilibre dynamique, c'est-à-dire que le déplacement à long terme du trait de côte fluctue autour de zéro (le total des avancées et des reculs s'annule sur une longue période).

La flèche de Grants Beach est située sur la rive est de l'embouchure de l'estuaire de Little Shemogue (figure 16). Elle est longue d'approximativement 1,7 km, large d'environ 230 m et elle est orientée selon un axe sud-ouest / nord-est. Une plage sableuse, large de 10 à 30 m, borde la flèche de Grants Beach du côté du détroit de Northumberland, alors qu'un important marais maritime est localisé à l'arrière. Des sorties sur le terrain ont permis d'obtenir des renseignements complémentaires : la hauteur maximale du front de la dune est d'approximativement 5,5 m et sa hauteur minimale est de 1 m, par rapport à la plage sableuse adjacente. Le front dunaire est taillé en falaise sur l'ensemble des sections proximale et médiane (figure 23-A), tandis que le contact entre la plage et la dune de la section distale de la flèche se fait en pente douce et régulière.

En tenant compte des taux de recul et d'avancée sur la période 1944-2001, l'ensemble du rivage de la flèche de Grants Beach exposé au détroit a été stable[5] si l'on en juge par la variation de la position du trait de côte, qui est de -5,07 ±7,27 m (ce qui correspond à un taux de -0,09 ±0,13 m/an).

Dans la section proximale (figure 23-A), les valeurs pour les périodes 1944-1971 et 1971-2001 sont aussi comprises à l'intérieur de la marge d'erreur, respectivement de -6,32 ±7,68 m (-0,23 ±0,28 m/an) et de 4,87 ±6,88 m (0,16 ±0,23 m/an). Ces chiffres cachent toutefois que pendant ces périodes des secteurs de la section proximale de Grants Beach ont pu connaître des avancées et d'autres des reculs : entre 1971 et 2001, on peut ainsi observer des variations extrêmes de la position du trait de côte de -15,85 ±6,88 m et de 19,5 m ±6,88 m (tableau 4).

La section médiane de la flèche de Grants Beach a été marquée par un recul entre 1944 et 2001. La période 1944-1971 est en grande partie responsable de cette tendance à l'érosion, alors que le recul moyen était de 9,58 ±7,68 m (0,36 ±0,28 m/an) (figure 23-B). Le recul le plus important a été de 17,27 ±7,68 m. La période 1971-2001 est quant à elle marquée par une stabilité relative (variation moyenne de 6,67 ±6,88 m; taux de 0,22 ±0,28 m/an). Pendant cette deuxième période, les valeurs extrêmes ont été de 15,69 ±6,88 m et de -0,81 ±6,88 m, respectivement.

[5] Rappel : un taux de déplacement du trait de côte supérieur à la marge d'erreur est considéré comme significatif, c'est-à-dire un recul dans le cas d'une valeur négative et une avancée dans le cas d'une valeur positive. Un taux de déplacement du trait de côte égal ou inférieur à la marge d'erreur est considéré comme représentant une «stabilité relative» de la position du trait de côte.

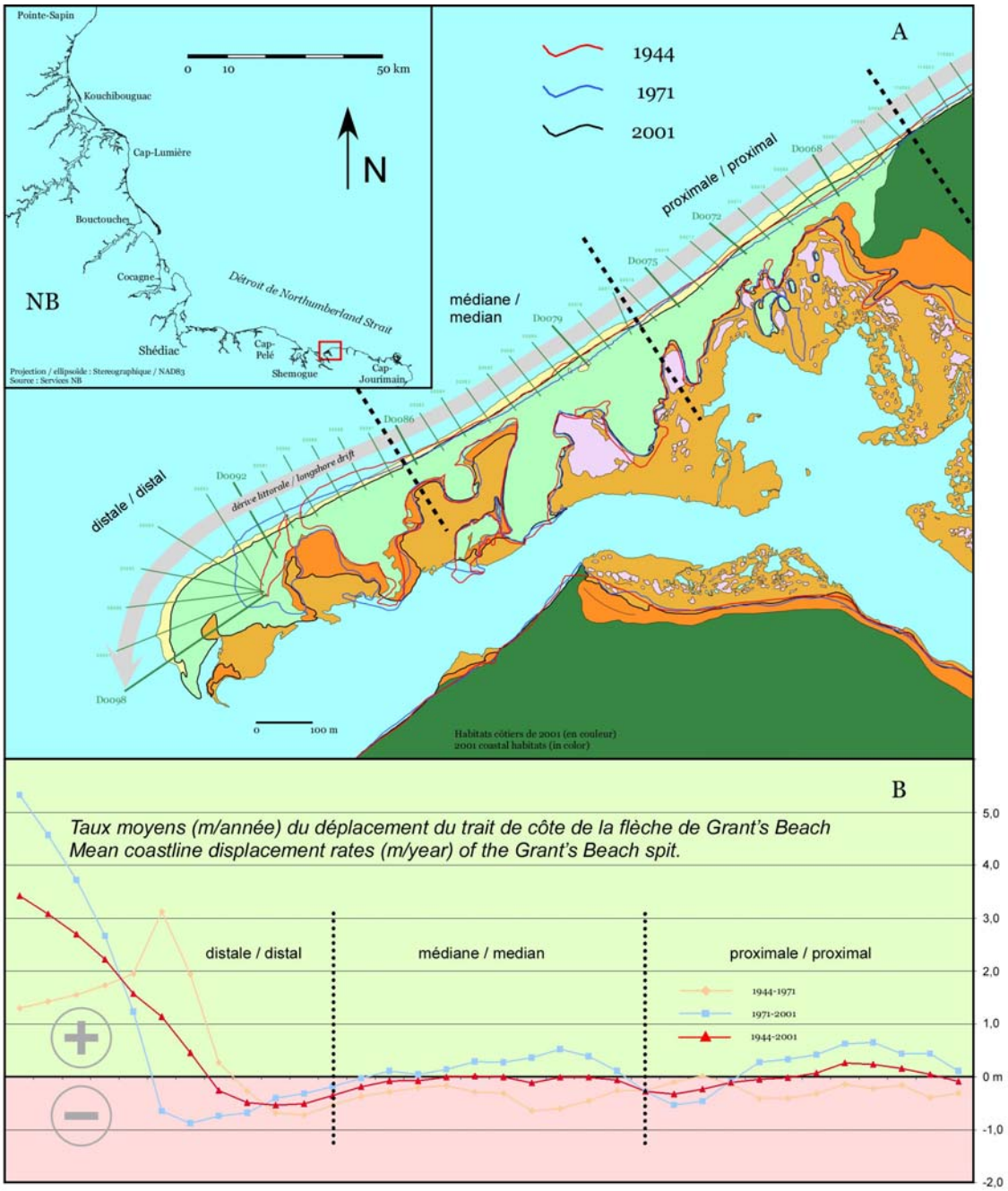


Figure 23. Position du trait de côte de la flèche littorale de Grants Beach en 1944, 1971 et 2001 (A) et déplacements moyens annuels (m/an) du trait de côte par section (B).

Tableau 4. Déplacement (m) et déplacement moyen annuel (m/an) du trait de côte de la flèche littorale de Grants Beach de 1944 à 2001.

Section	Transect	Déplacement (m) *Displacement (m)*			Déplacement moyen annuel (m) *Mean annual displacement (m)*		
		1944-1971	1971-2001	1944-2001	1944-1971	1971-2001	1944-2001
proximale	D0065	-8,24	3,36	-4,88	-0,31	0,11	-0,09
	D0066	-10,54	13,16	2,62	-0,39	0,44	0,05
	D0067	-4,12	13,10	8,98	-0,15	0,44	0,16
	D0068	-5,96	19,50	13,54	-0,22	0,65	0,24
	D0069	-3,71	18,71	14,99	-0,14	0,62	0,26
	D0070	-8,49	12,59	4,10	-0,31	0,42	0,07
	D0071	-10,86	10,04	-0,82	-0,40	0,33	-0,01
	D0072	-11,00	8,39	-2,62	-0,41	0,28	-0,05
	D0073	-3,65	-2,37	-6,02	-0,14	-0,08	-0,11
	D0074	0,47	-13,78	-13,31	0,02	-0,46	-0,23
	D0075	-2,59	-15,85	-18,45	-0,10	-0,53	-0,32
	D0076	-7,11	-8,42	-15,53	-0,26	-0,28	-0,27
médiane	D0077	-6,88	3,34	-3,54	-0,25	0,11	-0,06
	D0078	-12,17	11,75	-0,42	-0,45	0,39	-0,01
	D0079	-16,16	15,69	-0,47	-0,60	0,52	-0,01
	D0080	-17,27	10,87	-6,40	-0,64	0,36	-0,11
	D0081	-8,32	8,21	-0,11	-0,31	0,27	0,00
	D0082	-7,63	8,70	1,07	-0,28	0,29	0,02
	D0083	-4,41	4,23	-0,18	-0,16	0,14	0,00
	D0084	-5,45	1,37	-4,08	-0,20	0,05	-0,07
	D0085	-7,67	3,33	-4,34	-0,28	0,11	-0,08
	D0086	-9,85	-0,81	-10,66	-0,36	-0,03	-0,19
distale (Détroit)	D0087	-14,47	-5,50	-19,98	-0,54	-0,18	-0,35
	D0088	-19,44	-9,46	-28,90	-0,72	-0,32	-0,51
	D0089	-18,43	-11,92	-30,36	-0,68	-0,40	-0,53
	D0090	-7,19	-20,37	-27,56	-0,27	-0,68	-0,48
	D0091	7,43	-22,16	-14,73	0,28	-0,74	-0,26
	D0092	52,33	-26,28	26,05	1,94	-0,88	0,46
distale (pointe)	D0093	84,28	-19,39	64,89	3,12	-0,65	1,14
	D0094	52,69	36,90	89,59	1,95	1,23	1,57
	D0095	46,75	79,92	126,66	1,73	2,66	2,22
	D0096	41,88	111,70	153,59	1,55	3,72	2,69
	D0097	38,45	136,99	175,44	1,42	4,57	3,08
	D0098	35,09	159,79	194,88	1,30	5,33	3,42

La section distale de la flèche de Grants Beach peut être divisée en deux sous-sections : le côté exposé au détroit de Northumberland et la pointe de la flèche donnant sur l'estuaire. Sur la période 1944-2001, le côté du détroit a connu un recul moyen de 15,91 ±8,07 m (0,28 ±0,14 m/an), tandis que la pointe de la flèche s'est avancée de 134,17 ±8,07 m, un taux moyen de 2,35 ±0,14 m/an. Durant les périodes 1944-1971 et 1971-2001, l'érosion la plus forte le long de la côte exposée au détroit a été de 19,44 ±7,68 m et de 26,28 ±7,68 m, respectivement. Durant ces mêmes deux périodes, la pointe de la flèche s'est prolongée vers le large; les taux d'avancée les plus forts ont été de 84,28 ±7,68 m et de 159,79 ±7,68 m, respectivement.

À partir des informations tirées de la cartographie géocodée multidate, on peut conclure que la dérive littorale dominante le long de Grants Beach se fait du nord-est vers le sud-

ouest et que le volume de sédiments qu'elle transporte semble suffisamment important pour maintenir la plage et la dune dans une position relativement stable, tout en contribuant à une certaine avancée latérale de la section distale de la flèche.

Un autre exemple d'évolution montrant une flèche littorale dont la position est demeurée relativement stable durant les 60 dernières années est la flèche située dans la partie nord-ouest de l'île de Cocagne (figure 14). Les lecteurs et lectrices sont invités à consulter les cartes des taux d'érosion en annexe, pour plus de détails à ce sujet.

B- : Cas de l'avancée latérale de la section distale de la flèche vers le large[6]

Un deuxième type d'évolution observé durant la période à l'étude est l'avancée latérale de la section distale de la flèche vers la mer. La flèche littorale de Petit-Cap, située sur la rive ouest de l'embouchure de l'estuaire de Shemogue, en est l'exemple type (figure 16). Dans ce type d'évolution, la caractéristique principale ou dominante est l'avancée de la côte, de façon parallèle au rivage. Cette évolution implique un apport en sable par la dérive littorale, vers la partie distale (pointe) de la flèche.

Le côté de la flèche littorale de Petit-Cap exposé au détroit de Northumberland a été cartographié pour toutes les années de couverture de photographies aériennes disponibles, soit 1944, 1953, 1963, 1971, 1982, 1996 et 2001. La figure 24 présente les positions du trait de côte de cette flèche sur la période 1944-2001. En 1944, la flèche de Petit-Cap n'avait qu'une seule crête de dune (figure 24-A). Depuis 1953, une deuxième crête s'est développée du côté du détroit. Cette nouvelle dune s'est prolongée vers le sud-est au fil des années (figure 24-B, C, D, E) et son avancée totale, de 1953 à 2001, a été de 869,40 ±7,18 m, représentant un taux de prolongement de 18,10 ±0,13 m/an. Tout en s'allongeant vers le sud-est, le trait de côte de ce nouveau front dunaire a reculé vers l'intérieur des terres, en moyenne de 26,37 ±7,18 m de 1944 à 2001 (taux de recul de 0,46 ±0,13 m/an). À cause de ce recul, le point d'attache de la flèche de Petit-Cap, qui se situait dans la section proximale en 1953, est maintenant localisé dans la section médiane de la flèche (figure 24-E). En 2001, la flèche littorale de Petit-Cap faisait approximativement 1,3 km de longueur, un maximum de 130 m de largeur, et son orientation suivait un axe nord-ouest / sud-est.

Un autre exemple d'évolution montrant une avancée de la côte vers la mer durant les 60 dernières années est le cas de la flèche littorale de la partie sud de l'île de Cocagne (figure 28-B). **Les lecteurs et lectrices sont invités à consulter les cartes des taux d'érosion, en annexe, pour plus de détails à ce sujet (Section 5, Annexes C4-C6, Taux de retrait des dunes et des falaises; Section 5, Annexe D, Distribution des habitats côtiers).**

[6] Avancée (type « 2 ») de McBRIDE *et al.* (1995).

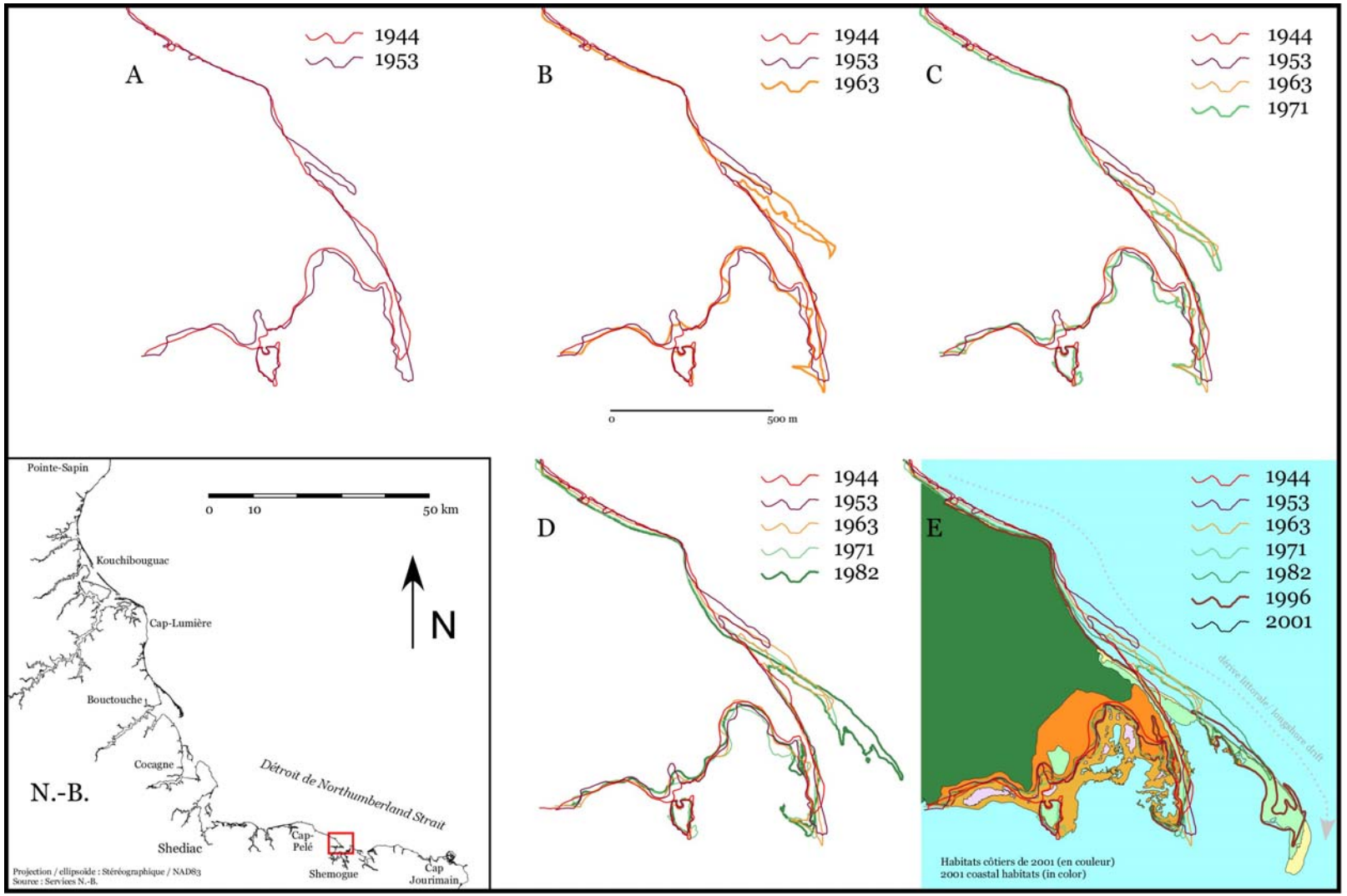


Figure 24. Évolution du trait de côte de la flèche littorale de Petit-Cap de 1944 à 2001.

C- : Cas du retrait vers l'intérieur des terres de l'ensemble de la flèche[7]

La dune de l'Aboiteau est représentative d'une évolution transgressive (figure 25). Cette évolution est caractérisée par un recul de la côte et un déplacement vers l'intérieur des terres de l'ensemble du système, face à l'avancée de la mer. Le développement de brèches dans le front dunaire et la mise en place subséquente de dépôts sableux à l'arrière (nappes de débordement) durant les tempêtes contribuent à faire reculer et migrer l'ensemble des formes littorales vers l'intérieur des terres.

Depuis 1944, la plage et la dune de l'Aboiteau se sont déplacées vers l'intérieur des terres (figure 25-A), mais l'ampleur mesurée n'est pas la même tout le long de la dune. Dans la période 1944-1971, la partie ouest a reculé en moyenne de 35,72 ±8,04 m (taux de 1,32 ±0,30 m/an), tandis que la partie est, qui correspond au site de la plage de l'Aboiteau, a été stable, le recul y étant de 3,14 ±6,91 m (0,12 ±0,26 m) (figure 25-B et tableau 5). Entre 1971 et 2001, ces tendances se sont maintenues : recul moyen de la partie ouest de 29,81 ±6,02 m (0,99 ±0,20 m/an) et variation non significative du trait de côte à l'est (2,08 ±6,69 m; 0,07 ±0,22 m/an).

Tableau 5. Déplacement moyen (m) et déplacement moyen annuel (m/an) des parties est et ouest de la dune de l'Aboiteau de 1944 à 2001.

	Transect	Déplacement moyen (m) *Average displacement (m)*			Déplacement moyen annuel (m/an) *Mean annual displacement (m/yr)*		
		1944-1971	1971-2001	1944-2001	1944-1971	1971-2001	1944-2001
est *east*	D0498 à / *to* D0522	-3,14 ±6,91	2,08 ±6,69	-1,07 ±7,77	-0,12 ±0,26	0,07 ±0,22	-0,02 ±0,14
ouest *west*	D0523 à / *to* D0566	-35,72 ±8,04	-29,81 ±6,02	-65,54 ±7,36	-1,32 ±0,30	-0,99 ±0,20	-1,15 ±0,13

Le fort recul de la côte dans la partie ouest est en partie dû au développement de brèches dans le front dunaire. La figure 25-A montre bien la configuration de la côte : des rentrants en demi-cercle, dans les environs du chemin Emery et de la plage Gagnon, sont présents en 1944, en 1971 et en 2001; ils témoignent de brèches dans le front dunaire. À certains endroits, l'arrière de la dune repose directement sur le marais à barachois, ailleurs elle est enfouie sous des mares et sous les plans d'eau du marais (figure 25-A). Ces transferts de sable, sous forme de nappes de débordement, participent à la migration de la dune littorale vers l'intérieur des terres. **Les lecteurs et lectrices sont invités à consulter les cartes des taux d'érosion, en annexe, pour plus de détails à ce sujet (Section 5, Annexes C4-C6, Taux de retrait des dunes et des falaises; Section 5, Annexe D, Distribution des habitats côtiers).**

[7] Migration vers l'intérieur des terres (type «6») de McBRIDE *et al.* (1995).

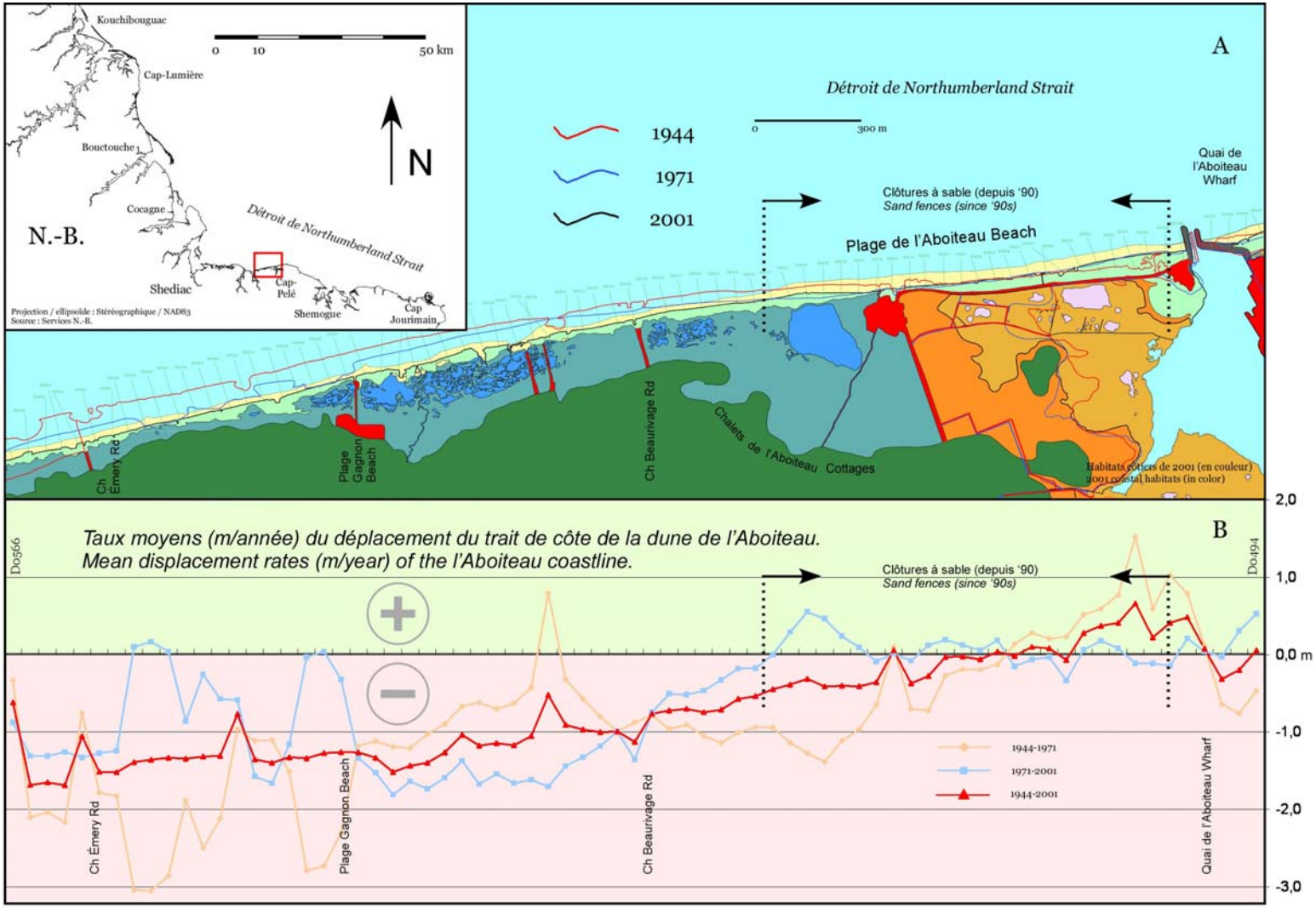


Figure 25. Position du trait de côte de la dune de l'Aboiteau en 1944, 1971 et 2001 (A) et déplacements moyens annuels (m/an) du trait de côte (B).

D- : Cas du sectionnement et de la régression de la flèche[8]

Un autre type d'évolution observé durant la période à l'étude est le sectionnement d'une flèche littorale par suite du développement d'une brèche et de la formation d'un goulet de marée; c'est le cas de la flèche du cap de Shemogue, située sur la rive est de l'embouchure de l'estuaire de Shemogue (figure 16). Ce type d'évolution se produit principalement le long de dunes et de flèches littorales étroites et peu élevées, susceptibles de débordement par les vagues lors de tempêtes. S'ils ne sont pas comblés plus ou moins rapidement par les apports sableux de la dérive littorale, les goulets de marée qui s'y développent peuvent s'élargir et devenir plus profonds, provoquant ainsi la formation d'une série d'îlots sableux.

La figure 26 montre les habitats côtiers de la flèche du cap de Shemogue pour les trois années principales, 1944, 1971 et 2001. En 1944, on observe la présence d'une flèche littorale typique de la côte du détroit de Northumberland, à savoir une plage sableuse sur laquelle un milieu dunaire s'est développé, derrière lequel on note la présence d'un marais maritime et des habitats qui y sont associés. La flèche du cap de Shemogue n'est ni longue ni large (approximativement 1,2 km de longueur et 240 m de largeur) et le front dunaire est en général bas (moins d'un mètre de hauteur); cette flèche est orientée selon un axe sud-ouest / nord-est.

En 1971, la section proximale de la flèche est coupée par le développement d'une brèche. Le front dunaire est absent sur une longueur de 562,59 m, et seule la plage sableuse subsiste à cet endroit. Un goulet de marée de faibles dimensions (34,25 m de largeur) est présent et permet un échange d'eau entre le détroit et l'estuaire, de part et d'autre de la flèche. La formation de la brèche et l'ouverture du goulet de marée ont participé à l'érosion de sections du marais maritime situé derrière la dune. Des transferts sableux de la plage vers l'arrière contribuent aussi à l'ensablement du marais (représenté par la lettre «a» sur la figure 26).

En 2001, le goulet de marée s'est agrandi et s'est déplacé légèrement vers le sud-ouest par rapport à sa position de 1971; sa largeur totale est de 95,61 m. La section distale de la flèche est désormais isolée et forme un îlot sableux. En raison de nouvelles conditions hydrodynamiques associées à la formation et à la migration du goulet de marée, la configuration de la côte de la section distale a changé. Le fait le plus marquant de l'évolution de cette section de la flèche entre 1971 et 2001 est la réduction spectaculaire de la largeur de la plage sableuse. En 1971, au transect D0197 (représenté par la lettre «b» sur la figure 26), la plage faisait 23,03 m de largeur, tandis qu'en 2001, elle ne faisait plus que 8,75 m. La mise en place du goulet de marée semble avoir freiné l'approvisionnement en sable par la dérive littorale en provenance du nord-est.

[8] Ce type d'évolution ne fait pas partie des types proposés par MCBRIDE *et al*. (1995).

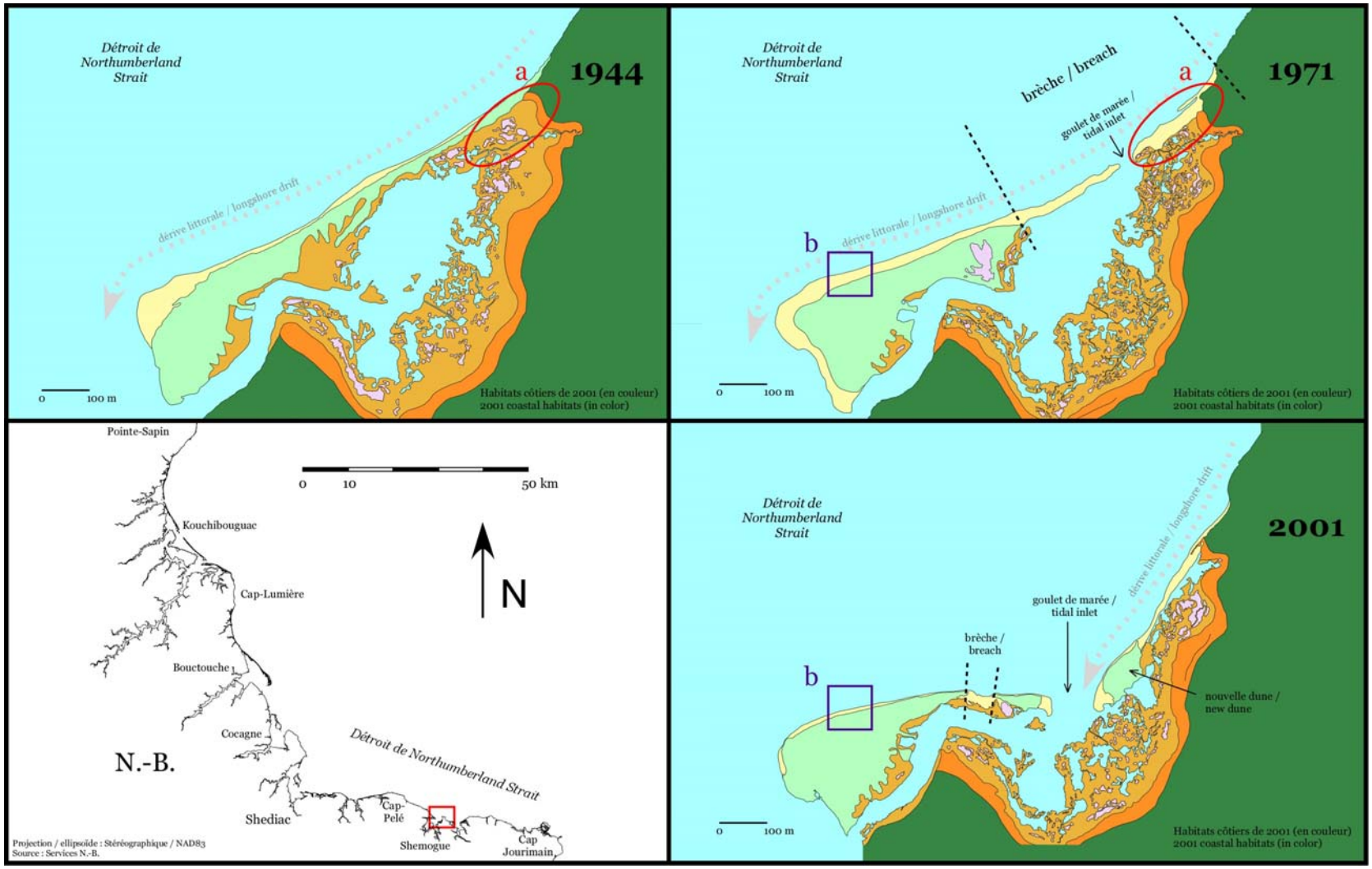


Figure 26. Habitats côtiers et évolution de la flèche littorale du cap de Shemogue en 1944, 1971 et 2001 (a : érosion et ensablement du marais maritime; b : rétrécissement de la plage).

Un autre exemple d'évolution montrant le sectionnement d'une flèche littorale suite au développement d'une brèche au cours des 60 dernières années est celui des flèches de Cap-Bimet et de Pointe-aux-Bouleaux (figure 15). Cette portion du littoral comprend deux flèches sableuses ancrées aux caps rocheux que sont Cap-Bimet et Pointe-aux-Bouleaux. Ces flèches referment l'estuaire du Petit-Barachois et abritent d'importantes superficies de marais maritime (figure 27).

En 1944, les deux flèches littorales, qui font approximativement 500 m de longueur, étaient séparées par un goulet de marée large d'une dizaine de mètres (figure 27c). En 1971, le front dunaire des deux flèches est érodé par la formation de brèches qui mènent à la mise en place de goulets de marée. L'ancien goulet est comblé par l'apport de sable et une dune littorale s'est développée au-dessus, légèrement en retrait de l'ancienne position du front dunaire, formant un îlot sableux. On remarque aussi le développement, dans cette même période, d'un marais maritime à l'arrière de l'îlot sableux (figure 27c). De 1944 à 1971, le point d'attache de la flèche de Pointe-aux-Bouleaux a reculé en moyenne de 63,95 ±7,06 m (2,37 ±0,26 m/an). Ce recul important a mené à l'ensablement et à l'érosion du marais maritime se situant derrière la flèche (figure 27a). En 2001, dans les environs de l'îlot sableux, on note la présence de nombreux bancs de sable à une centaine de mètres au large (du côté du détroit de Northumberland). Ces bancs sableux doivent contribuer à l'apport sédimentaire de l'îlot car, au cours de la période 1971-2001, le trait de côte s'est avancé vers le large en moyenne de 23,46 ±6,66 m (taux d'avancée de 0,78 ±0,12 m/an). Dans la période 1944-2001, la partie distale de la flèche de Cap-Bimet a été complètement érodée. **Les lecteurs et lectrices sont invités à consulter les cartes des taux d'érosion, en annexe, pour plus de détails à ce sujet (Section 5, Annexes C4-C6, Taux de retrait des dunes et des falaises; Section 5, Annexe D, Distribution des habitats côtiers).**

E- : Cas du retrait et de la destruction de l'ensemble de la flèche[9]

Ce type d'évolution des côtes sableuses est transgressif et mène ultimement à la destruction des formes originales et à une nouvelle configuration de la côte. Les conditions ayant mené à la mise en place des formes littorales sont changeantes et différentes au point où ces dernières ne sont plus en équilibre avec le milieu, mais plutôt en déséquilibre. De façon générale, la côte recule vers l'intérieur des terres tout en perdant ses principales composantes (plages moins larges, milieux dunaires moins importants) : c'est l'érosion et la destruction subséquente des formes littorales sous les aspects qu'elles avaient jusqu'alors.

Bérubé *et al*. (2002) ont étudié l'évolution historique de la barre (flèche littorale) de Cocagne à partir de documents anciens, notamment d'une carte bathymétrique datant de 1839. À cette époque (167 ans passés), la barre de Cocagne formait un tombolo, c'est-à-dire qu'elle reliait le haut-fond nommé Pointe Dickson à la terre ferme (figure 28-A). Les auteurs de l'étude y parlent de l'érosion rapide du système et y présentent des taux de déplacement du trait de côte depuis 1839. La présente analyse consistera donc en une description qualitative de l'évolution récente de la barre de Cocagne.

[9] Destruction (type « 7 » de McBRIDE *et al.* (1995).

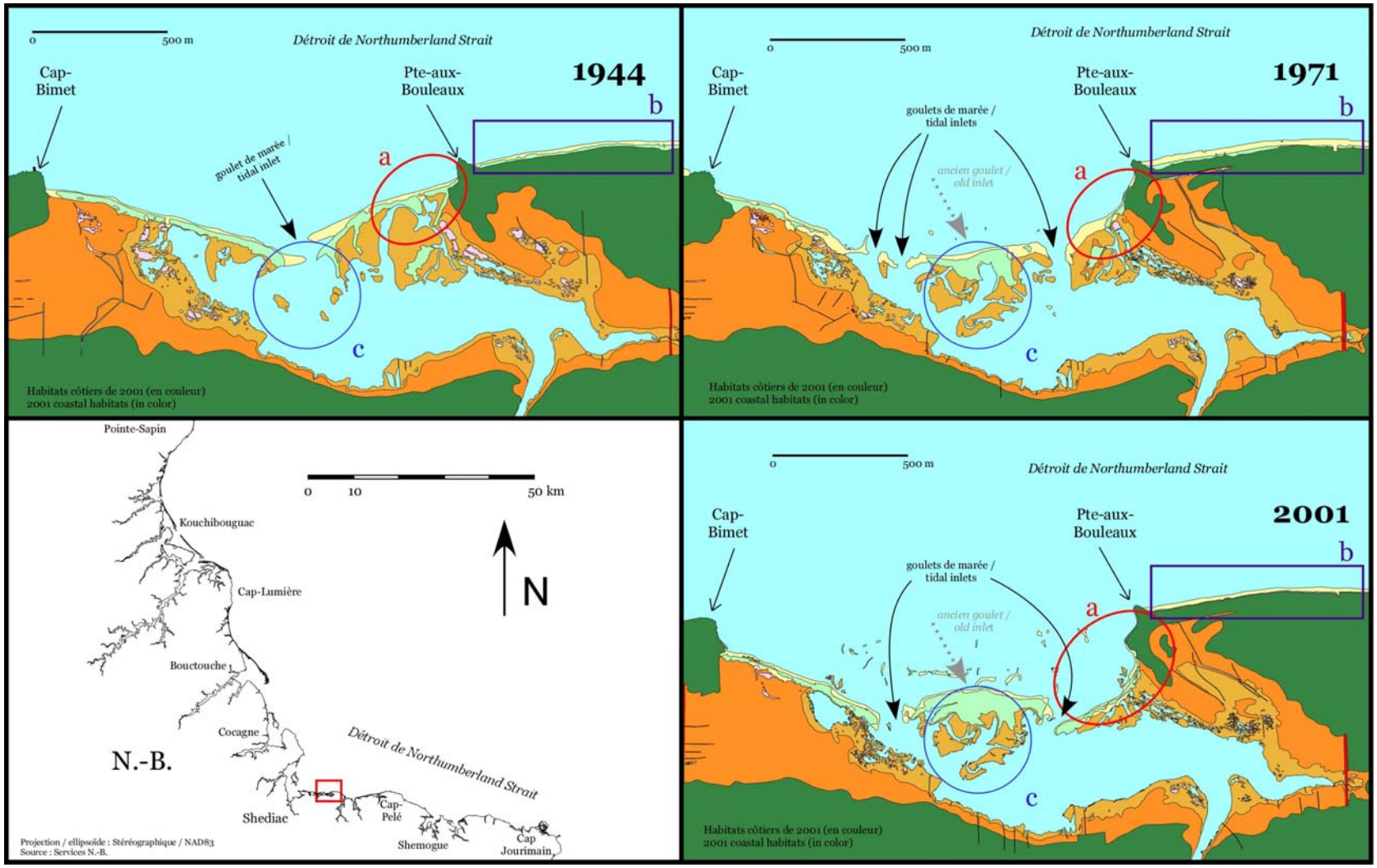


Figure 27. Évolution de la côte et des habitats entre deux promontoires, Cap-Bimet et Pointe-aux-Bouleaux (a : recul d'une flèche, ensablement et érosion d'un marais maritime; b : destruction d'une dune littorale par suite du développement immobilier et de l'enrochement; c : colmatage d'un goulet de marée, formation d'une dune et d'un marais maritime)

En 1944, nos données montrent que la barre de Cocagne était longue de 1,4 km, large de 90 m, et qu'elle était localisée à environ 650 m de Pointe Dickson (figure 28-A). En 1973, elle faisait 1,3 km de longueur et sa partie la plus large faisait 75 m. L'ensemble de la barre se situait à 144 m de plus vers l'intérieur des terres qu'en 1944, et son point d'attache avec la terre ferme s'était déplacé à 186 m de plus vers le sud. La dune qui recouvrait une bonne partie de la barre de Cocagne en 1944 est pratiquement disparue en 1973; seule une plage sableuse de forme allongée et légèrement arquée vers la terre ferme constituait alors la barre. En 2001, la barre de Cocagne, qui prenait la forme d'une flèche littorale typique depuis 1944 (une plage et une dune littorale ancrées à la terre ferme et se prolongeant librement vers le large), ne constitue désormais qu'un petit système sableux, situé devant un marais maritime et adossé à la terre ferme. La «barre» de Cocagne est disparue; le système sableux qui subsiste ne fait plus que 629 m de longueur et 60 m de largeur.

La flèche littorale de Robichaud et la dune sud-est de l'île de Cocagne sont deux autres exemples de ce même type d'évolution (figure 28-B et C). À noter que le recul et la destruction de la dune sud-est de l'île de Cocagne ont aussi entraîné l'érosion complète du marais maritime qui se situait à l'arrière (figure 28-B).

Les lecteurs et lectrices sont invités à consulter les cartes des taux d'érosion, en annexe, pour plus de détails à ce sujet (Section 5, Annexe C, Taux de changement du trait de côte; Section 5, Annexe D, Distribution des habitats côtiers).

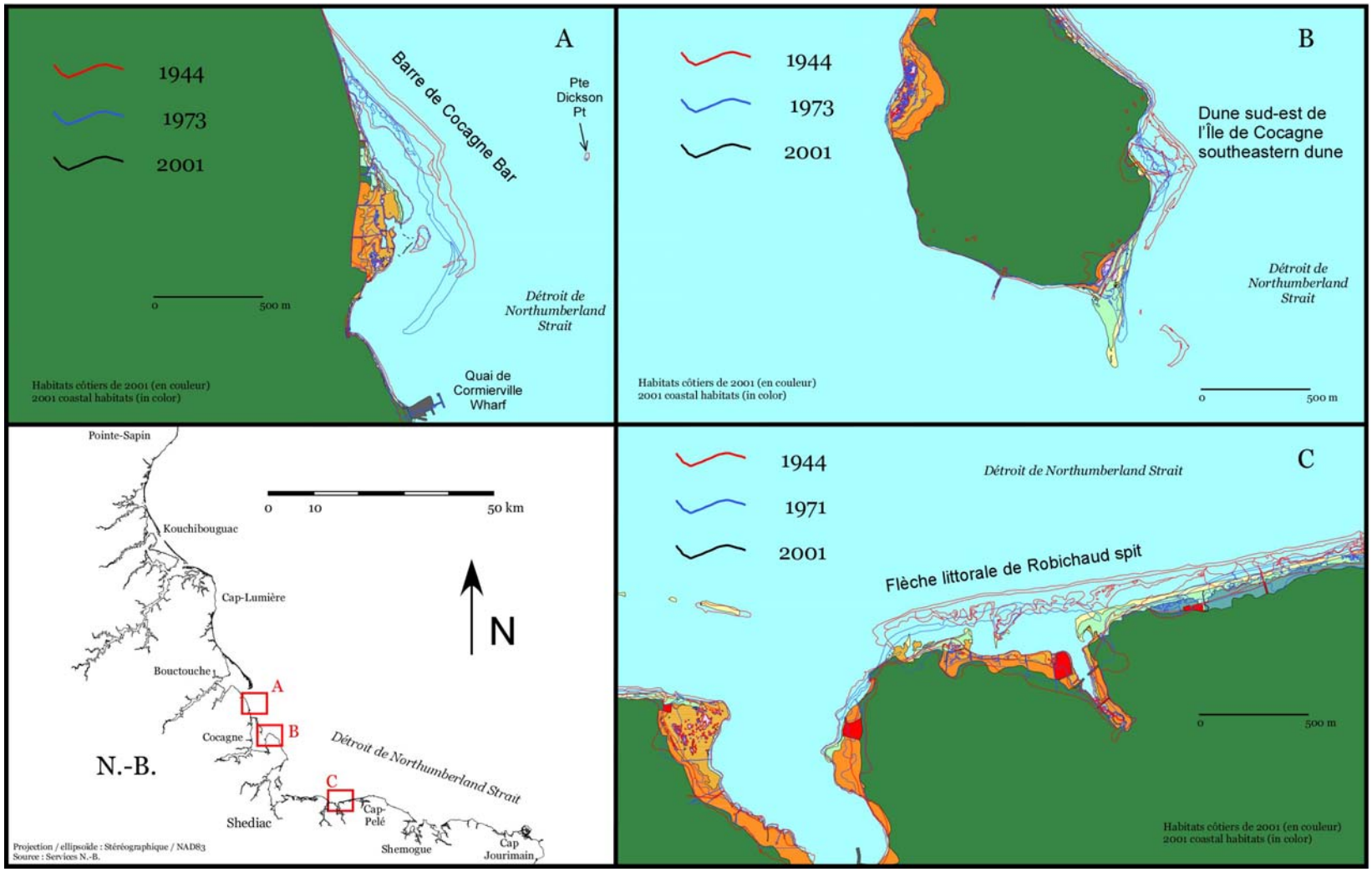


Figure 28. Destruction, sur la période 1944 à 2001, de la barre de Cocagne (A), de la dune sud-est de l'île de Cocagne (B) et de la flèche littorale de Robichaud (C).

4.5.3.2.4 Évolution récente des falaises[10]

De façon générale, le recul du trait de côte le long des falaises meubles, et surtout des falaises rocheuses, est moins important que celui le long des dunes et des flèches littorales. En fait, l'érosion des falaises est si lente que les données recueillies à partir des cartes multidates ne nous permettent pas de confirmer ce recul pour toutes les falaises des secteurs. Plusieurs taux mesurés sont inférieurs à la marge d'erreur des cartes géocodées multidates. Une telle évolution du trait de côte est interprétée comme représentant une «stabilité relative» ou peu significative. Cette stabilité relative des falaises rocheuses et meubles s'applique principalement sur les plus courtes périodes étudiées, soit 27 années (1944-1971) et 30 années (1971-2001). Par contre, rapportés sur la période d'étude la plus longue (57 années : 1944-2001), les déplacements du trait de côte sont souvent plus grands que la marge d'erreur, traduisant un recul significatif («réel») des falaises. Nous allons illustrer cette situation en prenant les falaises rocheuses de Trois-Ruisseaux et les falaises meubles du cap de Shemogue comme cas d'espèce. L'étude des falaises a mis en évidence les limites de la méthode utilisée; les valeurs obtenues sur de courtes périodes peuvent alors être moins fiables que celles qui couvrent de longues périodes.

Les falaises rocheuses

La côte de Trois-Ruisseaux fait face au détroit de Northumberland et elle est dominée par de basses falaises meubles (moins de 4 mètres de hauteur, en général) en alternance avec de basses falaises rocheuses (principalement formées de grès). Deux affleurements rocheux, situés à 250 mètres l'un de l'autre, montrent les difficultés d'interprétation des données relatives aux évolutions lentes (figure 29-A). Le premier affleurement rocheux (affleurement 1, figure 29-A) fait 200 mètres de longueur. Entre 1944 et 1971, ainsi qu'entre 1971 et 2001, la variation du trait de côte semble y avoir été stable; les valeurs du recul étant de 6,67 ±7,40 m/an et 5,99 ±5,96 m/an, respectivement (tableau 6). Cependant, deux sections de ce même affleurement ont enregistré un recul d'approximativement 10 mètres au cours de la période 1944-1971 (aux transects TF0272 et TF0274). Plus encore, les valeurs du recul de l'ensemble de l'affleurement dans la période 1944-2001, montrent un réel recul et non une stabilité relative : dans cette plus longue période, le recul moyen, de 12,66 mètres, est suffisant pour qu'on le distingue de la marge d'erreur, ±7,47 m (0,22 ±0,13 m/an).

[10] Le terme falaise «meuble» désigne ici les falaises taillées dans une variété de dépôts hétérogènes et d'âges différents, qui affleurent à la côte. De façon générale, les falaises meubles du sud-est du Nouveau-Brunswick présentent, de la base jusqu'au sommet : une couche argilo-limoneuse, appelée «mudstones», de couleur ocre à rouge, d'âge carbonifère; des dépôts glaciaires (aussi nommés «till»), contenant des blocs, des galets, des cailloux, le tout dans une matrice sableuse et argileuse; et vers le sommet des falaises, une couche de dépôts marins postglaciaires, dominée par des sédiments fins (sables, limons, argiles). Le cas des falaises dunaires, aussi des falaises «meubles», a été traité dans la section de l'Évolution récente des dunes et flèches littorales. Les falaises qui se développent dans les marais maritimes sont aussi des falaises «meubles», mais elles ne sont pas incluses dans la présente catégorie.

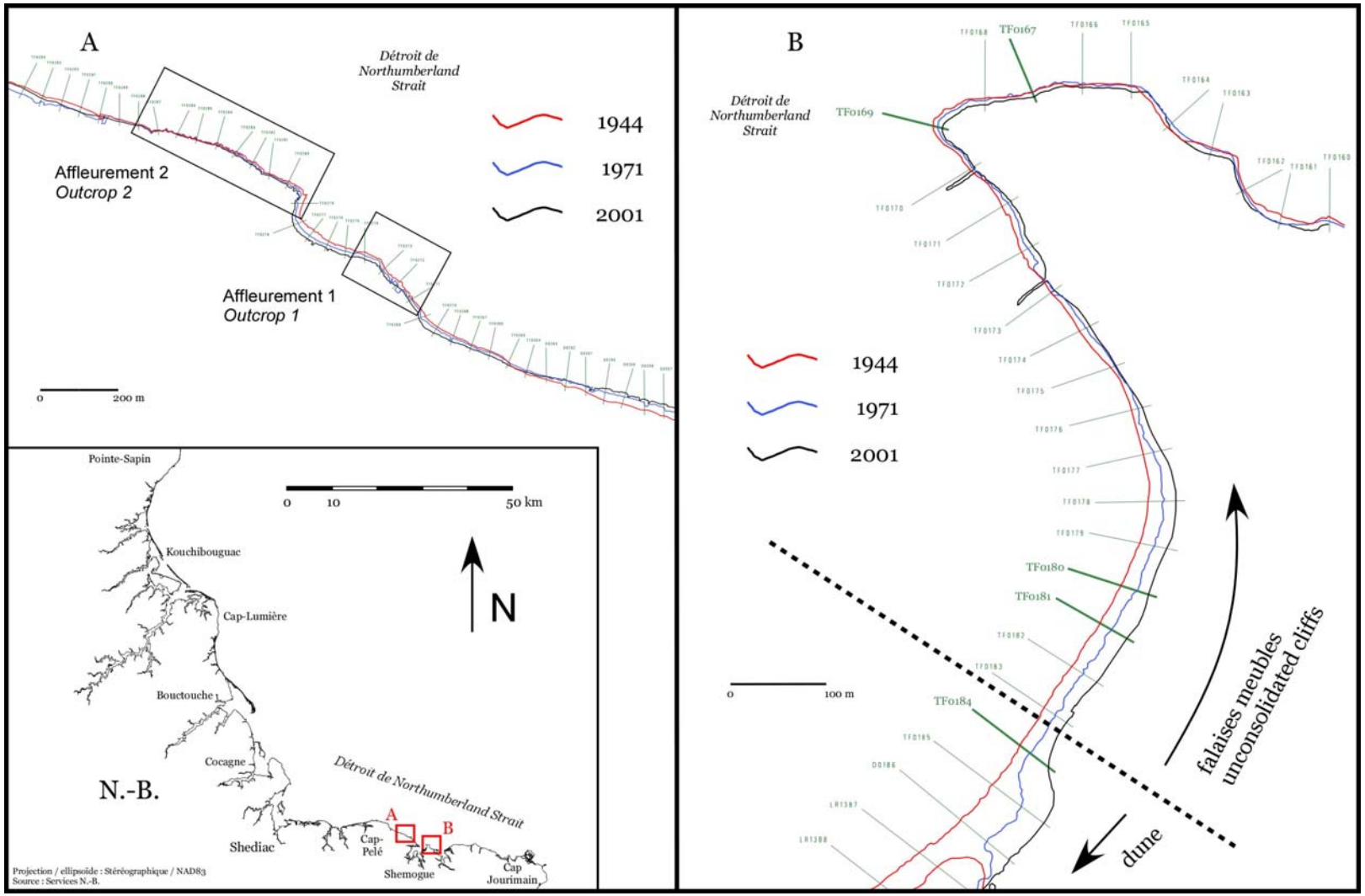


Figure 29. Position du trait de côte en 1944, 1971 et 2001 des falaises rocheuses de Trois-Ruisseaux (A) et des falaises meubles du cap de Shemogue (B).

Tableau 6. Déplacement moyen (m) et déplacement moyen annuel (m/an) du trait de côte de deux affleurements rocheux près de Trois-Ruisseaux de 1944 à 2001.

Affleurement 1 *Outcrop 1*

Transect	Déplacement (m) *Displacement (m)*			Déplacement moyen annuel (m/an) *Mean annual displacement (m/yr)*		
	1944-1971	1971-2001	1944-2001	1944-1971	1971-2001	1944-2001
TF0271	-0,76	-7,07	-7,83	-0,03	-0,24	-0,14
TF0272	-10,18	-3,36	-13,54	-0,38	-0,11	-0,24
TF0273	-6,15	-4,07	-10,22	-0,23	-0,14	-0,18
TF0274	-9,60	-9,45	-19,05	-0,36	-0,32	-0,33
Moyenne / *Average*	-6,67 ±7,40	-5,99 ±5,96	-12,66 ±7,47	-0,25 ±0,27	-0,20 ±0,20	-0,22 ±0,13

Affleurement 2 *Outcrop 2*

Transect	Déplacement (m) *Displacement (m)*			Déplacement moyen annuel (m/an) *Mean annual displacement (m/yr)*		
	1944-1971	1971-2001	1944-2001	1944-1971	1971-2001	1944-2001
TF0280	-4,79	-3,91	-8,70	-0,18	-0,13	-0,15
TF0281	-1,31	-3,27	-4,58	-0,05	-0,11	-0,08
TF0282	0,78	-7,58	-6,80	0,03	-0,25	-0,12
TF0283	0,32	-8,07	-7,75	0,01	-0,27	-0,14
TF0284	-2,75	-3,43	-6,19	-0,10	-0,11	-0,11
TF0285	1,60	-3,25	-1,65	0,06	-0,11	-0,03
TF0286	-1,57	-1,16	-2,73	-0,06	-0,04	-0,05
TF2087	0,26	-1,42	-1,17	0,01	-0,05	-0,02
TF0288	-0,15	-3,05	-3,20	-0,01	-0,10	-0,06
Moyenne / *Average*	-0,84 ±7,40	-3,91 ±5,96	-4,75 ±7,47	-0,03 ±0,27	-0,13 ±0,20	-0,08 ±0,13

Le deuxième affleurement rocheux fait 400 mètres de longueur (affleurement 2, figure 29-A). Dans les trois périodes étudiées (1944-1971; 1971-2001 et 1944-2001), la variation du trait de côte est restée stable (tableau 6). Seuls trois endroits le long de cet affleurement ont enregistré une érosion significative au cours de la période étudiée, soit aux transects TF0282 et TF0283, où entre 1971 et 2001, le recul a été de 7,58 ±5,96 et de 8,07 ±5,96 m, respectivement, et au transect TF0280, où entre 1944 et 2001, le recul a été de 8,70 ±7,47 m.

Les taux moyens annuels de l'affleurement 2 se rapprochent des taux moyens annuels calculés pour l'ensemble des falaises rocheuses exposées aux vagues du détroit, tandis que ceux de l'affleurement 1 sont plus élevés. En fait, ces derniers se rapprochent plutôt des taux moyens annuels de recul des falaises meubles exposées au détroit (tableau 7). Cette différence notable du rythme du recul de deux affleurements rocheux ayant la même exposition et étant localisés à proximité l'un de l'autre pourrait s'expliquer par différents facteurs, telle la hauteur de la falaise, la nature des affleurements (composition et structure du grès) ou la présence d'une plate-forme (rocheuse) littorale à l'avant des falaises, qui dissiperait l'énergie des vagues arrivant à la côte. Ces exemples montrent bien la complexité de la réponse des falaises rocheuses aux actions marines et le besoin d'études de terrain pour mieux expliquer les évolutions observées par nos travaux de photo-interprétation et d'analyse photogrammétrique.

Tableau 7. Déplacement moyen (m) et déplacement moyen annuel (m/an) du trait de côte des falaises meubles et rocheuses des secteurs du grand Cocagne, de l'Aboiteau et de Shemogue pour trois périodes, et selon deux types de localisation : les côtes exposées aux vagues du détroit de Northumberland et les côtes abritées.

	Déplacement du trait de côte *Coastline displacement*	Exposées / *Exposed*			Abritées / *Sheltered*		
		1944-1971	1971-2001	1944-2001	1944-1971	1971-2001	1944-2001
Falaises meubles *Unconsolidated cliffs*	Moyen (m) / *Average (m)*	-7,94 ±7,30	-6,92 ±6,73	-14,85 ±7,42	-6,91 ±7,87	-2,19 ±6,74	-9,10 ±7,72
	Annuel (m/an) / *Annual (m/yr)*	-0,29 ±0,27	-0,24 ±0,23	-0,26 ±0,13	-0,24 ±0,27	-0,08 ±0,24	-0,16 ±0,14
Falaises rocheuses *Rock cliffs*	Moyen (m) / *Average (m)*	-1,66 ±7,48	-3,45 ±6,72	-5,10 ±7,98	-1,77 ±6,45	-0,99 ±6,08	-2,77 6,76
	Annuel (m/an) / *Annual (m/yr)*	-0,06 ±0,27	-0,12 ±0,23	-0,09 ±0,13	-0,06 ±0,22	-0,04 ±0,22	-0,05 ±0,12
Enrochement *Breakwater*	Moyen (m) / *Average (m)*		1,83 ±6,56			3,73 ±6,34	

Les falaises meubles

Le cap de Shemogue fait face au détroit de Northumberland et forme la rive est du havre de Shemogue (figure 16). Tout autour du cap, les falaises ont environ 4 mètres de hauteur; le relief s'estompe graduellement vers le sud jusqu'au point d'ancrage de la flèche du cap de Shemogue (figures 26 et 29-B), où les falaises ne dépassent pas 1,5 mètre de hauteur.

Au cours de la période 1944-2001, les falaises du cap (transects TF0160 à TF0170, tableau 8) ont connu une légère érosion; le recul moyen étant de 6,71 ±6,56 m (un recul annuel de 0,12 ±0,12 m/an). Ce taux du déplacement du trait de côte ne représente que la moitié du recul moyen calculé pour l'ensemble des falaises meubles exposées au détroit des trois secteurs à l'étude (tableau 7). En fait, l'ampleur du recul des falaises du cap de Shemogue se rapproche plutôt des valeurs calculées pour les falaises rocheuses exposées au détroit. Cette situation est à première vue surprenante, puisque les matériaux non consolidés, formant ces falaises meubles, sont bien moins résistants. Elle s'explique toutefois par le fait qu'à la base des falaises meubles du cap de Shemogue, la roche en place affleure (grès fracturé) et prend la forme d'une plate-forme (rocheuse) littorale. Les travaux de terrain ayant mené à la cartographie géomorphologique des côtes du sud-est du Nouveau-Brunswick, réalisés au début des années 1990 par Bérubé et Thibault (1996), confirment la présence d'une plate-forme littorale au pied et devant les falaises du cap de Shemogue. Les dépôts meubles dans lesquels les falaises reculent reposent donc sur une structure plus résistante, qui atténue l'énergie des vagues et donc leur potentiel d'érosion.

Tableau 8. Déplacement moyen (m) et déplacement moyen annuel (m/an) du trait de côte des falaises meubles près du cap de Shemogue de 1944 à 2001.

Transect	Déplacement (m) *Displacement (m)*			Déplacement moyen annuel (m/an) *Mean annual displacement (m/yr)*		
	1944-1971	1971-2001	1944-2001	1944-1971	1971-2001	1944-2001
TF0160	-4,75	-3,10	-7,85	-0,18	-0,10	-0,14
TF0161	-8,09	0,30	-7,79	-0,30	0,01	-0,14
TF0162	-1,66	-1,72	-3,38	-0,06	-0,06	-0,06
TF0163	-1,90	-5,11	-7,01	-0,07	-0,17	-0,12
*TF0164**	*6,09*	*-3,47*	*2,62*	*0,23*	*-0,12*	*0,05*
*TF0165**	*0,90*	*-6,10*	*-5,20*	*0,03*	*-0,20*	*-0,09*
*TF0166**	*1,95*	*-4,35*	*-2,40*	*0,07*	*-0,15*	*-0,04*
TF0167	-0,22	-5,15	-5,38	-0,01	-0,17	-0,09
TF0168	-2,40	-4,80	-7,20	-0,09	-0,16	-0,13
TF0169	-4,97	-4,54	-9,51	-0,18	-0,15	-0,17
TF0170	-4,22	-1,39	-5,61	-0,16	-0,05	-0,10
Moyenne / *Average*	-3,53 ±6,76	-3,19 ±5,84	-6,71 ±6,56	-0,13 ±0,25	-0,11 ±0,20	-0,12 ±0,12
TF0171	-6,80	-3,68	-10,48	-0,25	-0,12	-0,18
TF0172	-7,30	-5,30	-12,60	-0,27	-0,18	-0,22
TF0173	0,39	-4,28	-3,89	0,01	-0,14	-0,07
TF0174	-7,60	-4,23	-11,83	-0,28	-0,14	-0,21
TF0175	-4,37	-1,27	-5,63	-0,16	-0,04	-0,10
TF0176	-6,71	-4,71	-11,41	-0,25	-0,16	-0,20
TF0177	-11,14	-9,03	-20,16	-0,41	-0,30	-0,35
TF0178	-16,15	-12,66	-28,81	-0,60	-0,42	-0,51
TF0179	-15,41	-12,69	-28,09	-0,57	-0,42	-0,49
TF0180	-17,22	-12,48	-29,70	-0,64	-0,42	-0,52
TF0181	-13,39	-18,16	-31,55	-0,50	-0,61	-0,55
TF0182	-14,33	-16,01	-30,34	-0,53	-0,53	-0,53
TF0183	-13,65	-13,80	-27,44	-0,51	-0,46	-0,48
TF0184	-13,11	-23,56	-36,67	-0,49	-0,79	-0,64
Moyenne / *Average*	-10,48 ±6,76	-10,13 ±5,84	-20,62 ±6,56	-0,39 ±0,25	-0,34 ±0,20	-0,36 ±0,12

* Une carrière a été exploitée le long des falaises et de la région immédiate quelque part entre 1945 et 1971. Les valeurs positives du déplacement du trait de côte aux transects TF0164 à TF0166 n'ont pas été comptabilisées dans la moyenne (même si elles étaient inférieures à la marge d'erreur).

À 200 mètres plus au sud du cap de Shemogue, le rythme de l'évolution des falaises meubles est beaucoup plus rapide (figure 29-B). De 1944 à 2001, le trait de côte y a reculé en moyenne de 20,62 ±6,56 m, soit un taux de 0,36 ±0,12 m/an (transects TF0171 à TF0184, tableau 8). Certaines parties du littoral ont connu un recul plus important, et c'est notamment le cas aux transects TF0181 et TF0184, où sur une période de 30 ans (1971-2001), le trait de côte a reculé de 18,16 ±5,84 m et de 23,56 ±5,84 m, respectivement. Le taux de recul de ces falaises s'apparente à celui observé ailleurs le long des côtes exposées au détroit de Northumberland.

L'étude de l'évolution récente des falaises rocheuses et meubles montre que la seule classification des falaises en fonction de leur composition ne permet pas d'expliquer des taux de déplacement parfois très différents; d'autres facteurs entrent en jeu. **Les lecteurs**

et lectrices sont invités à consulter les cartes des taux d'érosion, en annexe, pour plus de détails à ce sujet (Section 5, Annexes C4-C6, Taux de retrait des dunes et des falaises; Section 5, Annexe D, Distribution des habitats côtiers).

4.5.3.2.5 Évolution récente de la Plage Parlee

Onze séries de photographies aériennes ont été utilisées afin de déterminer l'évolution récente du secteur à l'étude, soit celles de 1938, 1944, 1953, 1963, 1967, 1971, 1973, 1982, 1995, 1996 et 2001.

Une description de la Plage Parlee et de ses environs est présentée plus bas. Elle porte principalement sur le recensement d'aménagements et d'interventions humaines ainsi que sur une appréciation générale de l'allure que prend la flèche, tel qu'observé sur les différentes séries de photographies aériennes (1938 jusqu'à 2001). Cet exercice a pour but de constater l'évolution du paysage de la zone littorale du secteur à des moments précis dans le temps. Nous espérons que cet historique du site de la Plage Parlee mettra en contexte les résultats et l'exposé qui suivront. La consultation de la figure 30 est suggérée afin de situer certaines des informations décrites.

Photographies de 1938, 1944 et de 1953

- présence, sur les trois séries de photos, de deux chemins d'accès (en gravier?) aménagés sur le marais côtier, menant aux sections 3 et 5 de la flèche; de traces de circulation de véhicules sur le marais côtier de la section 5, ainsi que sur la dune (1944 et 1953) des sections 4 et 5; et d'embranchements (sentiers additionnels) au chemin d'accès menant à la section 5, localisés sur le marais côtier (1944 et 1953);
- présence, sur les trois séries de photos, d'un grand bâtiment sur le haut de plage de la section 5; de deux grands bâtiments sur le haut de plage de la section 3; de deux petits bâtiments sur le marais côtier derrière la dune dans la section 4 (1938 et 1944); et d'un phare sur la dune à la limite des sections 4 et 5 (1953);
- présence d'un mur de protection le long de la dune de la section 3 (1938);
- interruption du front dunaire par deux brèches, sur les trois séries de photos, dans les sections 3 et 5; et morcellement du front dunaire en plusieurs petits îlots de dune, en chapelet, dans la section 5 (1953).

Photographies de 1963 et de 1967

- présence, sur les deux séries de photos, des deux mêmes chemins d'accès observés sur les trois séries précédentes, aménagés sur le marais côtier menant aux sections 3 et 5 de la flèche, et présence d'un troisième chemin d'accès (en gravier?) aménagé sur le marais côtier, menant à la section 3 (1967); les mêmes embranchements au chemin d'accès menant à la section 5, localisés sur le marais côtier, sont aussi observés (1963 et 1967); et les mêmes traces de circulation de véhicules observées sur les trois séries précédentes, sur la dune et le marais côtier des sections 4 et 5, sont aussi présentes ainsi que d'autres traces dans la section 3 (1967);
- présence, sur les deux séries de photos, des deux mêmes grands bâtiments observés sur les trois séries précédentes, à la limite du haut de plage et de la dune dans la section 3; du même phare à la limite des sections 4 et 5; d'un grand bâtiment

sur le haut de plage dans la section 5; et, en 1963 et en 1967, deux petits bâtiments secondaires sur le haut de plage, à la limite des sections 4 et 5;
- présence, sur les deux séries de photos, d'un mur de protection devant la dune dans la section 5, et d'un autre mur de protection devant la dune de la section 4 (1967);
- sur les deux séries de photos, front dunaire fortement échancré par des sentiers d'accès à la plage dans la section 3; discontinuité et morcellement du front dunaire, interrompu par de nombreuses brèches le long des sections 4 et 5; et ensablement partiel et localisé du marais côtier derrière les petites brèches des sections 4 et 5.

Photographies de 1971 et de 1973

- présence, sur les deux séries de photos, des trois mêmes chemins d'accès observés sur les deux séries précédentes, aménagés sur le marais côtier menant aux sections 3 et 5 de la flèche; des mêmes embranchements au chemin d'accès menant à la section 5, observés sur les deux séries précédentes, localisés sur le marais côtier; présence d'une aire de stationnement aménagée sur le marais côtier derrière la dune dans la section 3 (1973);

- présence, sur les deux séries de photos, d'un grand bâtiment sur la plage dans la section 5; de deux grands bâtiments sur la plage dans la section 3; d'un phare et de deux petits bâtiments secondaires sur la plage, à la limite des sections 4 et 5;

- présence, sur les deux séries de photos, d'un mur de protection sur le haut de plage dans les sections 4 et 5, déjà observé sur la photo de 1967;

- sur les deux séries de photos, front dunaire fortement échancré par des sentiers d'accès à la plage dans la partie est de la section 3; discontinuité et morcellement du front dunaire le long de la section 4, aussi interrompu par de nombreuses brèches; absence du front dunaire dans la section 5; et ensablement quasi total du marais côtier.

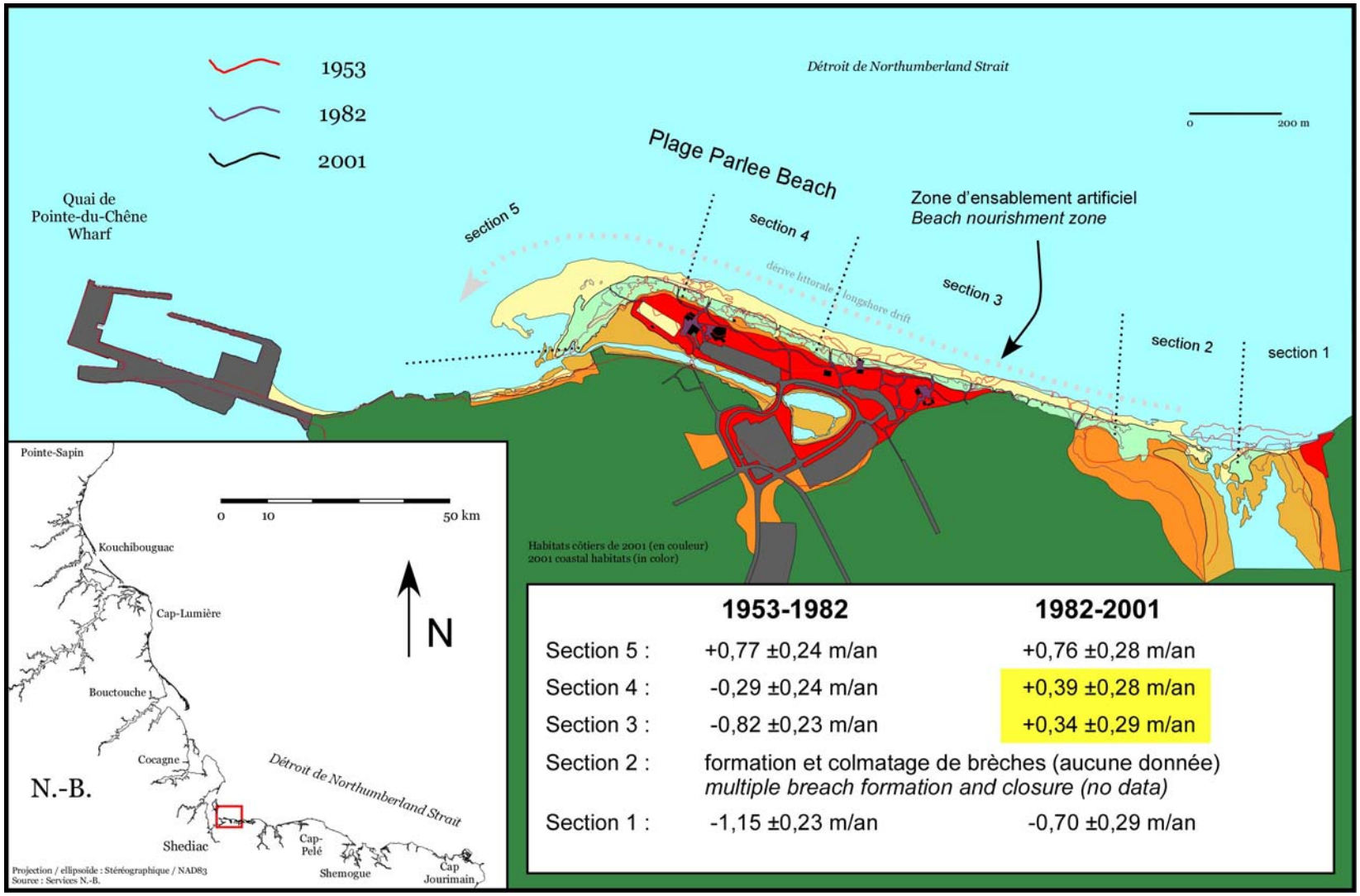


Figure 30. Position du trait de côte de la Plage Parlee en 1953, 1982 et 2001, et taux de déplacement du trait de côte (m/an) pendant deux périodes : 1953-1982 et 1982-2001.

Photographies de 1982, 1995, 1996 et de 2001

- présence, en 1982, d'un grand bâtiment sur la plage dans la section 3; d'un grand bâtiment sur la plage dans la section 5; et d'un phare sur le bas de plage, à la limite des sections 3 et 4, tous déjà observés sur les deux séries de photos précédentes;
- présence, sur les quatre séries de photos, d'aires de stationnement asphaltées, de sentiers pédestres en béton, et de divers types d'installations pour le service au public, aménagés sur le remblai du marais côtier dans les sections 3, 4 et 5;
- présence, en 1982, d'un mur de protection sur le haut de plage dans la section 5, déjà observé sur les deux séries de photos précédentes;
- absence du front dunaire le long de la partie est de la section 3 (1982); front dunaire échancré par des sentiers d'accès à la plage dans les sections 3 et 4 (1995, 1996 et 2001); sur les quatre séries de photos, continuité du front dunaire le long de la section 5; et remblaiement de la surface occupée par le marais côtier derrière la dune des sections 3, 4 et 5;

Bien qu'elle n'ait pu être confirmée lors de notre analyse des photographies aériennes, la pratique d'extraction de sable a sans doute eu lieu dans le secteur de la plage Parlee. Les travaux de Hunter (1975), réalisés au début des années 1970, ont montré l'étendue et l'importance de l'exploitation de sablières le long des côtes sableuses du Nouveau-Brunswick. De nombreuses plages et dunes ont fait l'objet d'extraction de sable jusqu'en 1974, notamment la flèche littorale de la plage Parlee. D'après Hunter (1975), aucun permis d'extraction de sable n'a été émis par la province pour le secteur de la plage Parlee; aucune donnée (en volume de sable extrait annuellement) n'est donc présentée dans son rapport. Ses cartes indiquent néanmoins la présence de sites d'extraction dans ce secteur, notamment au point d'ancrage de la flèche et sur les barres prélittorales vis-à-vis de la pointe de la flèche. Ces sites d'extraction auraient été répertoriés à partir de photographies aériennes ou encore par l'entremise d'entrevues réalisées avec les gens du coin.

Des onze séries de photographies aériennes, sept ont été géocodées afin de produire les cartes de l'évolution du secteur de la plage Parlee (1953, 1963, 1967, 1973, 1982, 1996 et 2001). De 1953 à 1982, ces cartes montrent que le trait de côte exposé au détroit de Northumberland recule, tandis que la section distale de la flèche (section 5, figure 30) migre légèrement vers l'ouest. Toutefois, de 1982 à 2001 le trait de côte exposé au détroit s'avance vers la mer; sa partie distale migre toujours vers l'ouest. Ce changement d'évolution est le résultat des volumes de sable ajoutés au système littoral dans le cadre du programme d'ensablement artificiel de la plage, débuté en 1988 (tableau 9). La mise en œuvre de ce programme avait pour but de colmater les brèches formées dans le front dunaire, de stabiliser le trait de côte et d'élever la crête des dunes du site. En raison de cette intervention dans la dynamique du système, l'étude du déplacement du trait de côte du secteur de la plage Parlee doit distinguer deux périodes, soit celle ayant précédé le début des travaux (1953 à 1982) et celle qui a été marquée par l'ensablement artificiel (1982 à 2001).

Tableau 9. Statistiques sur les travaux d'ensablement artificiel au parc provincial de la plage Parlee depuis 1988.

Année *Year*	Camion *Truck*	Verge cube *Cubic yard*	Mètre cube *Cubic metre*	Tonne métrique *Metric ton*
1988	1264	18960	14496	26093
1989	1134	17010	13005	23409
1990	368	5520	4220	7597
1991	959	14385	10998	19797
1992	1308	19620	15001	27001
1993	1371	20565	15723	28302
1994	669	10035	7672	13810
1995	538	8070	6170	11106
1996	983	14745	11273	20292
1997	0	0	0	0
1998	1240	18600	14221	25597
1999	0	0	0	0
2000	1755	26325	20127	36229
2001	1395	20925	15998	28797
2002	1200	18000	13762	24772
2003	927	13905	10631	19136
2004	3500	52500	40139	72251
2005	812	12180	9312	16762
Total	19423	291345	222751	400951
Moy. / *Ave.*	1079	16186	12375	22275

Guide de conversion :
1 charge de camion = 15 verges cubes
1 verge cube = 0,76456 mètre cube
1 mètre cube = 1,8 tonne métrique

Les mesures du déplacement du trait de côte montrent que, de 1953 à 1982, la partie de la flèche exposée au détroit de Northumberland (les sections 1 à 4, figure 30) recule à un rythme de 0,75 ±0,23 m/an. Ce recul est légèrement plus élevé que celui qui est observé le long des autres flèches littorales des secteurs du grand Cocagne, de l'Aboiteau et de Shemogue (0,60 ±0,27 m/an en moyenne entre 1944 et 1971, tableau 10). Pendant ce recul, la superficie des trois principaux habitats de la zone littorale n'a pas diminué (tableau 11). La superficie de la plage sableuse a fluctué autour de 3,9 hectares (3,34 hectares en 1967 et 4,19 hectares en 1963); celle de la dune a fluctué autour de 3,1 hectares (2,97 hectares en 1953 et 3,22 en 1967); celle du marais côtier est aussi restée stable jusqu'à la fin des années 1970 (28,6 hectares). Ces données de superficie montrent clairement que, entre 1953 et 1982, l'ensemble de la flèche s'est déplacé vers l'intérieur des terres, et que cette évolution correspond bien à une migration des formes littorales plus qu'à leur stricte érosion. Dans ces conditions et durant cette période (1953-1982), la flèche de la plage Parlee correspondait au cas «C» mentionné dans la section sur l'Évolution récente des dunes et flèches littorales (retrait vers l'intérieur des terres de l'ensemble de la flèche).

Tableau 10. Taux de recul moyens annuels (m/an) des dunes et flèches littorales, exposées au détroit, des secteurs du grand Cocagne, de l'Aboiteau et de Shemogue pour trois périodes.

Grand Cocagne, l'Aboiteau, Shemogue	1944-1971	1971-2001	1944-2001
Déplacement global / *Global displacement*	-0,60 ±0,27	-0,32 ±0,23	-0,59 ±0,13
Retrait total / *Total retreat*	-0,99 ±0,27	-0,83 ±0,23	-0,78 ±0,13
Avancée totale / *Total advance*	0,47 ±0,27	0,59 ±0,23	0,39 ±0,13

Tableau 11. Variation de la superficie (hectares) de certains habitats de la zone littorale du secteur à l'étude de la plage Parlee entre 1953 et 2001.

Tempête début 1970 *Storm early 1970s*

Ensablement artificiel 1988 *Beach nourishment 1988*

Habitat	1953	1963	1967	1973	1982	1996	2001	1953-2001	1953-1982
Plage sableuse / *Sand beach*	*3,83*	*4,19*	*3,34*	*5,85*	*4,04*	*6,72*	*6,74*	76% ↑	stable
Dune / *Dune*	*2,97*	*3,13*	*3,22*	*0,69*	*3,07*	*4,54*	*4,42*	48% ↑	stable
Marais côtier / *Coastal marsh*	*29,65*	*28,08*	*28,13*	*28,37*	*13,83*	*14,28*	*13,96*	53% ↓	

Remblaiement de marais fin 1970 *Wetland infilling late 1970s*

À noter que les superficies occupées par la plage et la dune en 1973 n'ont pas été prises en compte dans le calcul de la valeur moyenne présentée plus haut. Deux tempêtes majeures se sont en effet abattues sur les côtes juste avant la prise des photographies de cette série, soit l'ouragan Beth (août 1971) et la tempête extratropicale Carrie (septembre 1972). La faible superficie occupée par la dune (0,69 hectare) et la forte superficie occupée par la plage (5,85 hectares) par suite de ces événements sont des cas extrêmes et ne sont pas représentatives de la tendance générale, quoiqu'elles demeurent valables et intéressantes en soi. Elles montrent l'impact que peut avoir une succession de tempêtes trop rapprochées sur la côte, et ne laissant pas au système littoral le temps de se rétablir. Par contre, dix ans après ces événements météorologiques majeurs, la plage et la dune s'étaient rétablies et couvraient des superficies proches des moyennes historiques, c'est-à-dire approximativement 4 et 3 hectares, respectivement.

Notre cartographie multidate a également montré que de 1982 à 2001, les sections 3 et 4 de la flèche ont connu une avancée du trait de côte (0,34 ±0,29 m/an et 0,39 ±0,28 m/an, respectivement – figure 30). Cette migration vers le large est le résultat de la mise en œuvre du programme d'ensablement artificiel. Dans ces conditions, ce type d'évolution correspondrait au type «2» (avancée) de McBride *et al*. (1995), traduisant une avancée du trait de côte vers le large par suite d'un surplus de sédiments dans le système littoral.

Depuis 1982, la superficie occupée par la plage ainsi que celle de la dune augmentent de façon importante, alors qu'elles étaient restées plutôt stables depuis 1953 (tableau 11).

La contribution que représente l'engraissement de plage pour le système sédimentaire littoral est énorme. Son évolution et sa largeur sont maintenues artificiellement grâce à l'ajout d'importants volumes de sable au système littoral. Cet apport externe semble fondamental afin de préserver l'évolution artificielle précaire qui soutient la capacité d'accueil actuel de la plage. En l'absence de cet ensablement de la plage Parlee, il y aurait vraisemblablement réajustement et tendance au retour à la position «naturelle» du trait de côte, c'est-à-dire sa position si aucune perturbation extérieure et anthropique n'était venue modifier les conditions d'origine. Cela correspondrait à terme en un recul d'approximativement 20 m par rapport à la position du trait de côte en 2001, soit environ 11,6 mètres derrière le trait de côte de 1982. Aujourd'hui, la Plage Parlee n'est plus en harmonie avec les conditions «naturelles» du milieu.

4.5.3.2.6 Interventions humaines à la côte

Les quatre secteurs étudiés font tous l'objet d'une pression exercée par l'occupation humaine de la zone littorale. La nature des interventions est diverse et l'ampleur de cette pression est variable d'un secteur à l'autre. Dans tous les secteurs étudiés, des aménagements à la côte ont été recensés depuis les plus anciennes séries de photographies aériennes (1938 et 1944) jusqu'aux plus récentes (1996 et 2001). La liste des interventions humaines répertoriées, ainsi qu'une estimation de leur abondance relative, est présentée au tableau 12. La section qui suit portera exclusivement sur un type d'aménagement, observé dans tous les secteurs étudiés, soit les structures de protection.

Les structures de protection (enrochements, murs en béton, en acier ou encore en bois) recensées sont majoritairement installées devant les falaises meubles, qui reculent à un rythme plus rapide que les falaises rocheuses (tableau 7). Bien que des structures de protection aient été identifiées sur toutes les années de couverture aérienne, seule la zone littorale du secteur de Shemogue n'avait pas ce type d'aménagement en 1944. Depuis, les séries de 1971, 1973 et 2001 montrent toutes la présence de murs ou autre type de protection à la côte. Ce sont les secteurs du grand Cocagne et de l'Aboiteau qui connaissent l'augmentation la plus spectaculaire de cet aménagement (tableau 13). La figure 31 montre l'extension et l'ampleur qu'a prises l'aménagement de murs de protection dans le secteur du grand Cocagne de 1944 à 2001. Dans ce secteur, à l'exception des côtes de l'île de Cocagne, très peu de falaises meubles sont aujourd'hui «naturelles». À certains endroits, comme dans les environs de l'anse de Cocagne (rive est du havre de Cocagne) et du quai de Grande-Digue, la densité est telle que les murs de protection représentent 75 % et 83 % de la côte, respectivement (figure 32-A et B). Cette situation d'enrochement et de protection de la côte, face à l'érosion et au recul, est aussi observée dans le secteur de l'Aboiteau.

Tableau 12. Interventions humaines répertoriées dans la zone littorale des quatre secteurs à l'étude à partir de l'examen de toutes les séries de photographies aériennes disponibles.

Interventions humaines dans la zone littorale *Human interventions in the coastal zone*	Grand Cocagne	l'Aboiteau	Plage Parlee	Shemogue
quais et infrastructures portuaires / *wharves and port infrastructures*	X	X	X	X
structures de protection / *protection structures*	**XX**	**XX**	X	X
épis sur bas de plage / *groins on lower beach*	**XX**			X
estacades / *stockades*	X			
bâtiments (maisons, hangars, phares, chalets, camping) / *buildings (houses, warehoues, lighthouses, cottages, camping)*	**XX**	**XX**	**XX**	X
ponts sur les estuaires et étangs / *bridges over estuaries and ponds*	X	X	X	X
routes, chemins, sentiers / *roads, tracks, trails*	**XX**	**XX**	**XX**	X
aires de stationnement (asphaltées ou non) / *parking lots (asphalted or not)*		X	X	
écluses / *dams*				X
passerelles sur dunes et marais / *boardwalks over dunes and marshes*	X	**XX**	**XX**	
clôtures à sable / *sand fences*		X	X	
ensablement artificiel de plage / *beach nourishment*			X	
canaux de drainage dans marais / *drainage ditches in marshes*	**XX**	**XX**	X	**XX**
chaussées pour routes dans marais / *causeways for roads in marshes*	**XX**	**XX**	X	X
aire de pâturage pour le bétail dans marais / *pasture lands in marshes*				X
remblais de marais / *infilling of marshes*	**XX**	**XX**	**XX**	
carrières de grès / *sandstone quarries*	X	X		X

X : présence de l'intervention / *occurrence of the intervention*
XX : présence significative de l'intervention / *significant occurrence of the intervention*

Le frein ou l'empêchement au recul de la zone littorale vers l'intérieur des terres est connu sous le vocable anglais de «coastal squeeze» et il peut être naturel ou anthropique. Une situation d'obstacle naturel à la migration des formes littorales est rencontrée lorsque le relief formant le contact de la terre ferme avec les terres côtières est trop élevé. À titre d'exemple, dans un tel contexte, la migration d'un marais maritime vers l'intérieur des terres est freinée; la surface occupée par le marais diminue progressivement : le marais peut être submergé et éventuellement voué à la disparition. Mais, une situation de «coastal squeeze» peut aussi être provoquée par un aménagement mal planifié de la zone littorale, ne laissant aucune possibilité de déplacement aux formes littorales. L'installation de murs de protection fait partie de ces types d'aménagement, souvent responsables d'un «coastal squeeze». Par exemple, dans les environs de Pointe-aux-Bouleaux entre 1971 et 2001, une dune littorale a complètement disparu par suite de l'installation d'une série de murs de protection devant un lotissement domiciliaire le long de la côte (figure 27b).

Tableau 13. Longueur (m) des murs de protection le long des côtes des secteurs du grand Cocagne, de l'Aboiteau et de Shemogue pour les trois principales années cartographiées.

Secteur / *Site*	1944		1971 / 1973			2001			
	Longueur (m) *Length (m)*	%[1]	Longueur (m) *Length (m)*	%	Augmentation[2] *Increase*	Longueur (m) *Length (m)*	%	Augmentation *Increase*	Longueur secteur* *Study site length**
Grand Cocagne	100,3	0,2	592,7	1,1	5,9 X	13 286,5	23,7	22,4 X	56 km**
L'Aboiteau	454,5	0,8	867,6	1,4	1,9 X	8 323,9	13,9	9,6 X	60 km
Shemogue	0,0	0,0	32,0	0,0	319,6 X	1 084,1	1,0	33,9 X	105 km

[1] Pourcentage sur la longueur totale du secteur / *Percentage on total lenght of study site*.
[2] Linéaire de côte artificialisé par rapport à l'année précédente / *Armoured coast compared to year previous*.
* Longueur estimée à partir des cartes géocodées 2001 / *Estimated lenght based on 2001 numerical maps*.
** Le périmètre de l'île de Cocagne (approx. 10 km) n'est pas pris en compte / *Cocagne island perimetre (approx. 10 km) not included*.

Un autre effet des structures de protection est l'érosion de la plage située devant l'installation (Cormier, 2006; French, 2001; Paskoff, 1998). Bien que les structures de protection encaissent la majeure partie de l'énergie des vagues de tempête qui s'abattent sur l'enrochement ou sur le mur de protection, une autre partie de l'énergie est réfléchie vers le large et elle génère une vague de retour, qui accélère l'érosion du bas de plage devant la structure. Au fil des tempêtes successives, des blocs de roche, voire des murs entiers, peuvent basculer et s'effondrer. De façon générale, plus la profondeur de l'eau devant la structure de protection est grande, plus l'énergie des vagues qui atteignent la structure est importante, et plus le potentiel d'érosion est élevé (voir tableau 14).

Tableau 14. Relation entre la profondeur d'eau, l'énergie des vagues et les impacts côtiers.

↑	profondeur de l'eau à la côte *water depth at the coast*	=	↑	énergie des vagues *wave energy*	↑	potentiel d'érosion *erosion potential*	↑	réparations aux structures de protection *maintenance and repairs to protection structures*

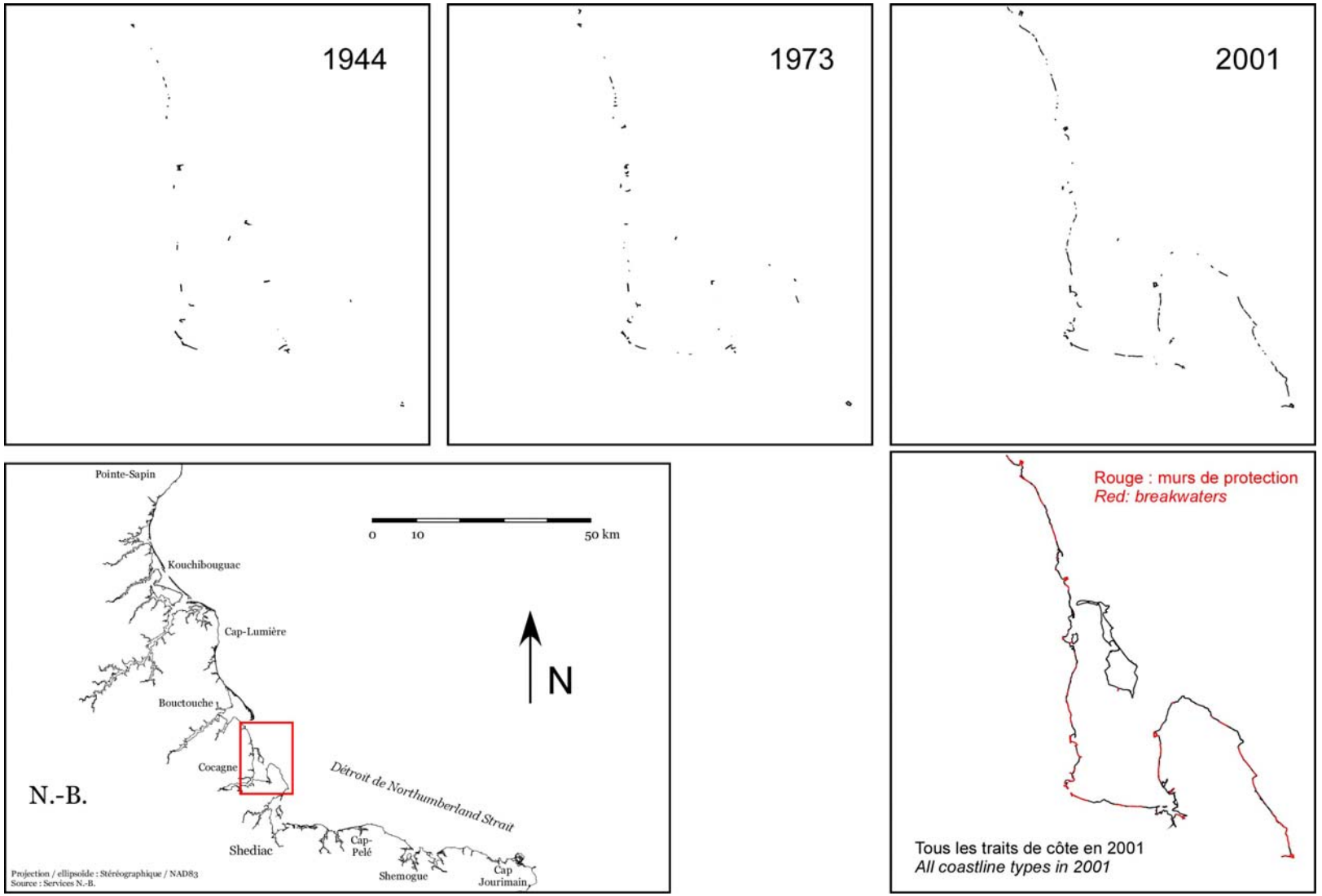


Figure 31. Abondance des structures de protection le long des côtes du secteur du grand Cocagne en 1944, 1973 et 2001.

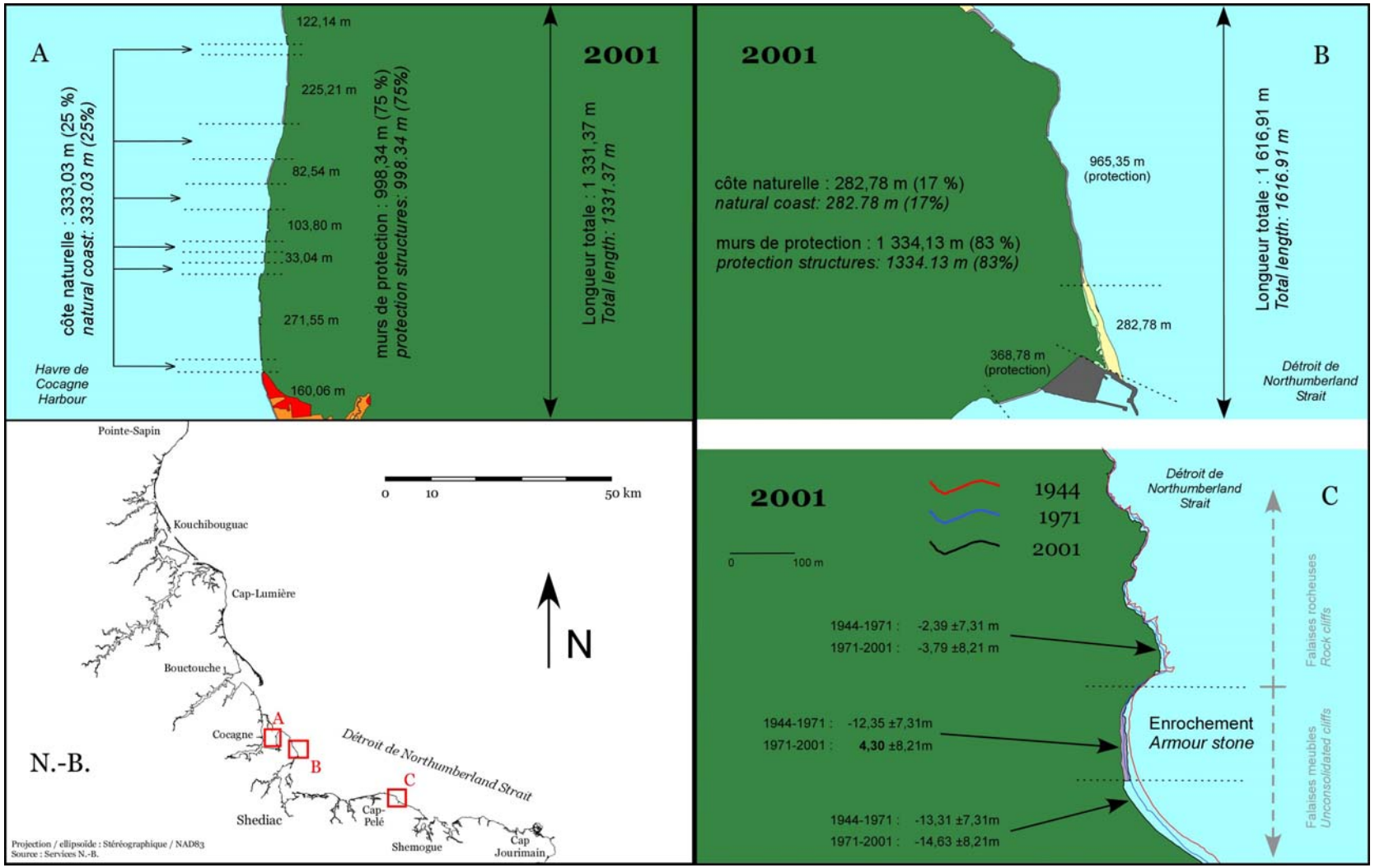


Figure 32. Densité des structures de protection le long de la côte de l'anse de Cocagne (A), de Cap-des-Caissie (B) et de la pointe Fagan (C).

En plus de stabiliser la position de la côte, l'extension des murs de protection se fait souvent au-delà de la position antérieure du trait de côte. Le tableau 7 montre que le long des côtes exposées au détroit de Northumberland, l'aménagement des murs de protection a été réalisé de sorte que la position du trait de côte de 2001 est en moyenne de 1,83 ±6,78 m de plus vers la mer que sa position en 1971, tandis que le long des côtes abritées des vagues du détroit, le trait de côte associé aux murs de protection est de 3,70 ±6,78 m de plus vers le large. Un exemple de cette «avancée» du trait de côte est présenté à la figure 32-C.

Dans un contexte de hausse accélérée du niveau de la mer relatif au cours du prochain siècle, il est donc à prévoir que la profondeur de l'eau à la côte et devant les structures de protection va augmenter, ce qui pourrait éventuellement se traduire par une accélération de l'érosion à proximité des structures et par une augmentation du potentiel de dommage aux structures elles-mêmes.

En résumé, on pourrait donc s'attendre, en toute vraisemblance, à ce que la plage sableuse qui se trouve devant les murs de protection de Pointe-aux-Bouleaux (figure 27b) soit érodée et qu'elle disparaisse dans un avenir rapproché; des évolutions semblables ont été observées ailleurs dans les secteurs à l'étude. L'aménagement de structures de protection trop loin vers la mer pourrait accélérer le processus d'érosion que les propriétaires tentent de freiner : la profondeur d'eau est plus grande, les vagues qui atteignent la structure sont plus fortes et le potentiel d'érosion est donc plus élevé.

4.5.4 Sommaire et conclusions

Le sud-est du Nouveau-Brunswick est une région de relief bas reposant sur un substrat gréseux plat et friable. Comme on le décrit dans la section 4.1, la région a été ennoyée par la mer juste après la déglaciation, après quoi les terres se sont relevées et le niveau relatif de la mer a baissé pour exposer de grandes étendues du plancher marin du détroit de Northumberland. Depuis 8 500 ans, le niveau de la mer remonte par rapport aux terres, faisant graduellement reculer le trait de côte dans un processus à long terme d'inondation et d'érosion des côtes. Il n'y a donc rien de nouveau dans la tendance au recul côtier observée dans les récentes décennies, mais l'impact sur l'habitation et l'infrastructure humaines augmente à mesure que s'accélèrent les aménagements en bord de mer.

Le taux d'érosion des côtes est surtout en fonction du niveau moyen de la mer (régi par l'élévation relative du niveau de la mer), du forçage des tempêtes et des vagues, de l'apport de sédiments, de la forme et de la réponse de la zone littorale (morphodynamique de la côte). Quand il n'y a pas d'apport excessif de sable, toutes choses étant égales par ailleurs, le taux de recul des côtes a des chances d'être corrélé avec le taux d'élévation relative du niveau de la mer.

Bien qu'il y ait de grandes quantités de sable sur la côte du Nouveau-Brunswick, une grande partie est stockée dans des dunes littorales (les plus importantes du nord) ou dans de grandes bermes de marée (les plus grandes du sud-est). Les volumes de sable présents dans la zone littorale immédiate sont limités. Certains sites, comme l'embouchure des havres de Shemogue et Little Shemogue, présentent des complexes à barres et bermes multiples sur la façade littorale intérieure, mais ils sont minces et les

plages elles-mêmes le sont invariablement. C'est pourquoi, malgré l'énergie limitée des vagues, il peut se produire des changements rapides du trait de côte lorsque les tempêtes passent par-dessus et ouvrent des brèches dans les plages et les barrières basses. De vieilles cartes mettent en évidence que certaines anciennes flèches et plages-barrières, comme dans les régions de Robichaud et de Cocagne, ont disparu, ne survivant que sous la forme de hauts-fonds sur la façade littorale. La crête de sable basse cartographiée dans 8 à 10 m d'eau au large de Pointe-Sapin est considérée comme une telle plage-barrière relique abandonnée sur la plate-forme intérieure.

La présente étude a montré que la forme et l'étendue de certaines flèches de la région de Shemogue ont connu des changements rapides dans les 60 années couvertes par l'enregistrement des photos aériennes (soit depuis 1944), et que d'autres de la même région (plage Grants) sont restées stables. Le grand système de flèches et d'îles-barrières dans le parc national Kouchibouguac présente de hautes dunes qui ne peuvent pas être franchies par la mer et qui agissent comme un tampon contre les assauts des vagues de tempête. Cependant, il existe un certain nombre de basses terres où des passes se sont ouvertes et fermées à diverses époques au cours du dernier siècle, causant des changements soudains qui ont perturbé la stabilité de la côte et les conditions de l'habitat, tant sur la barrière même que dans les lagunes, marais et autres habitats côtiers adjacents. Malgré la hauteur des dunes dans la région, de grandes sections du système de barrières de Kouchibouguac restent assez basses pour être franchies si une tempête majeure est accompagnée d'une onde et de vagues élevées. Cependant, les volumes de sable sont suffisants pour limiter le taux de recul de la côte. La grande flèche à pointe libre de Bouctouche (la Dune de Bouctouche) a des dunes de hauteur modérée et de multiples crêtes de dune, surtout dans sa partie distale. D'autres portions du système présentent des dunes étroites, voire pas de dune du tout. Dans ces zones, surtout sur la partie proximale (en amont de la dérive), il y a eu des débordements, des ouvertures de brèches et des migrations de la barrière vers les terres en réponse à d'importantes tempêtes ou périodes de tempêtes depuis que les premières photos aériennes ont été prises dans les années 1940 et longtemps auparavant.

Certaines sections de la côte se composent de falaises basses de grès ou de till, qui peuvent atteindre quelques mètres de hauteur, et présentent généralement des taux d'érosion à long terme (pluridécennaux) compris entre 0,1 et 0,4 m par an. Même si ces taux sont bas, certaines routes et certains immeubles ont été partiellement détruits ou abandonnés (p. ex. dans la région de Cap-Lumière). Les impacts de l'érosion sur les infrastructures et les immeubles (par conséquent sur les maisons) sont importants par endroits. Au cours du dernier siècle, à plusieurs endroits, des maisons et autres bâtiments ont été endommagés ou détruits par des vagues de tempête et par des glaces de mer déplacées par la tempête. De grandes sections de la côte sont maintenant protégées par des ouvrages longitudinaux, talus ou autres structures, et ce « durcissement » de la côte s'est accéléré depuis 20 ans. Toutefois, l'efficacité à long terme de ces mesures d'adaptation demeure douteuse et, pour nombre d'entre elles, l'entretien, la reconstruction ou le remplacement visant à maintenir leur fonction protectrice exigeront des investissements substantiels.

Sur les plages, flèches et barrières, les taux de changement du trait de côte sont parfois négatifs, parfois positifs. Des taux d'érosion supérieurs à 0,5 m par an sont courants sur de nombreuses plages, et certains sites en présentent même de plus élevés. Le point

d'ancrage de la flèche de Pointe-aux-Bouleaux a reculé en moyenne de 2,4 m par an entre 1944 et 2001. Dans d'autres cas, l'apport en sable local est suffisant pour maintenir la position du trait de côte ou en causer une progradation vers la mer. Certaines flèches ont allongé grâce au dépôt sur leurs extrémités distales, montrant des traces typiques d'érosion, de débordement et de progression graduelle, ou de dérivation dans la section proximale étroite (près du point d'ancrage à la côte) et de dépôt-engraissement à l'extrémité distale (en aval de la dérive). De façon très générale, c'est ce qu'on observe à la Dune de Bouctouche. D'autres systèmes, comme la plage Grants (côté est du havre de Little Shemogue), ont maintenu un équilibre dynamique : périodes de fragmentation des dunes entrecoupées de dépôt. Ces systèmes peuvent continuer à accumuler du sable de sources situées en amont dans l'embouchure de la baie ou sur la plate-forme intérieure. Dans d'autres cas, quand les volumes de sable sont faibles, la flèche peut être tronquée ou fragmentée. À Cap-Bimet, l'extrémité de la flèche a complètement disparu. Celle du côté est du havre de Shemogue (flèche de la pointe de Shemogue) a été ouverte d'une brèche avant 1971 et a fini par se fragmenter en deux en 2001, exposant au lessivage et à l'érosion des vagues le grand marais salé qui se trouvait derrière elle. La vulnérabilité de cette flèche au débordement et à la fragmentation a été accrue par son exposition au nord-ouest, la faible hauteur de sa crête, son étroitesse et son volume de sable réduit. D'importants changements survenus dans la morphologie et l'étendue de la flèche opposée (sur le côté ouest de l'estuaire) ont aussi pu jouer un rôle dans cette situation. Ces observations soulignent l'importance des changements de la morphologie des côtes (qui peut modifier à certains endroits les effets du fond et l'énergie des vagues), des vagues et ondes de tempête associées à de fortes tempêtes survenant individuellement ou en groupes, et du préconditionnement par l'érosion des dunes ou d'autres changements de la zone littorale. Certaines combinaisons de ces facteurs peuvent déclencher un changement rapide. Si l'on ajoute du sable au site, les brèches peuvent être réparées (on en veut pour exemple le remplissage de l'ancien chenal dragué traversant la Dune de Bouctouche), mais des changements morphologiques peuvent mener à une rétroaction positive, ce qui accroît la susceptibilité aux dommages causés par les tempêtes. La flèche du Petit-Cap dans le havre de Shemogue a construit une crête entièrement nouvelle et réalignée à l'extérieur de la flèche de 1944, alimentée par l'érosion des plages situées en amont de la dérive, à des taux de 0,2 à 0,8 m par an.

Ces résultats montrent la grande variabilité de la réponse des côtes au forçage des tempêtes ainsi que les changements graduels découlant de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique. Il est presque impossible d'effectuer des projections communes de la réponse sur l'ensemble de la zone à l'étude. Par contre, il existe plusieurs points communs de compréhension qui peuvent être appliqués à l'analyse des sites pris individuellement.

On peut s'attendre à ce que, à la plupart des sites où il y a actuellement de l'érosion, celle-ci se poursuive à l'avenir, probablement à des taux croissants. C'est pourquoi la planification et l'aménagement ne devraient pas reposer sur les seuls taux d'érosion historiques, mais prévoir une marge de retrait supplémentaire correspondant à une érosion plus rapide pendant la durée de vie utile d'une structure ou autre aménagement.

Le taux de subsidence dans la région baisse du sud-est vers le nord-ouest. Les taux les plus importants de changement du niveau relatif de la mer toucheront donc le sud-est, qui est aussi la région où les barrières et les volumes de sable sont les plus petits, ce qui

les rend plus sensibles à un changement rapide. Les systèmes plus grands, avec des dunes plus hautes, présents dans cette région seront plus stables, mais l'accélération de l'élévation du niveau de la mer, la présence moindre de glace de mer ou d'autres changements liés au climat peuvent quand même en accroître la sensibilité. On peut s'attendre à une certaine augmentation des taux d'érosion des falaises, mais ceux-ci devraient rester substantiellement inférieurs à 0,5 m par an dans la plupart des endroits, particulièrement là où le grès est exposé à la base des falaises.

Plus au nord, dans les régions de Bouctouche à Kouchibouguac, la présence de dunes beaucoup plus grandes et de crêtes plus hautes devrait amortir en partie l'augmentation de l'énergie des vagues. Cependant, certaines régions sont très sensibles à l'érosion ou au débordement, dont la partie proximale de la Dune de Bouctouche, où une succession de tempêtes qui a commencé en 2000 a écrêté la dune et entraîné plusieurs épisodes de débordement, qui ont déposé des nappes de sable sur la crête de la barrière et dans le marais situé en arrière. Une importante brèche s'est aussi ouverte à mi-chemin de la flèche. Il y a déjà eu par le passé de grandes brèches de ce genre, surtout au début des années 1940, et les successions rapides (sur quelques années) de fortes tempêtes en sont un facteur important. Cependant, l'accélération de l'élévation relative du niveau de la mer et d'éventuelles augmentations de l'intensité des tempêtes peuvent faire croître la fréquence et la gravité des impacts à l'avenir. Il n'y a pas de risque immédiat que la flèche se détache à Bouctouche, mais les taux moyens les plus élevés d'érosion du trait de côte le long de la flèche depuis 1944 (près de 2 m par an dans une section) se situent entre les kilomètres 6,0 et 8,5 de la flèche, juste avant la transition en amont de la dérive vers une progradation à long terme. Nous en concluons qu'on ne peut donc pas exclure la possibilité que la flèche se détache à horizon de 30 à 50 ans.

Il y a déjà eu dans la région des pertes de marais salés dues à un remplissage excessif à des fins de développement. Le rétrécissement littoral est lui aussi déjà une source de préoccupation à un certain nombre de sites de la zone à l'étude, lorsque les routes et les remblais forment des obstacles en dur à l'expansion des marais. Ces observations donnent à penser que certains marais salés de la région pourraient perdre en superficie à cause de l'érosion de leur façade maritime, de la dégradation de leur surface et de l'expansion graduelle des marais bas au détriment des marais élevés. Les impacts de cet état de choses pour de nombreux habitats côtiers seront étudiés plus en détail à la section 4.6.

Le succès de la gestion de l'érosion des côtes dans un climat en évolution exige que soient pris en compte tous les aspects du système côtier dans la région en question. Il faudra donc analyser la cellule côtière concernée et son bilan sédimentaire, ainsi que le forçage environnemental (niveau de la mer, tempêtes, ondes de tempête, vagues, vents et glace) et les interactions entre les divers éléments de la côte, y compris la totalité du système, au-dessus comme au-dessous de l'eau. Cette approche intégrée s'impose pour assurer une pleine compréhension du système, de manière que les mesures d'adaptation adoptées à un endroit ne soient pas contreproductives ailleurs. Les sections 4.8 et 4.9, plus loin dans le présent rapport, suggèrent d'autres considérations pour l'élaboration de stratégies d'adaptation adéquates et efficaces.

4.5.5 Glossaire

Barres prélittorales
Crêtes sableuses d'origine marine essentiellement situées sur l'avant-côte, toujours submergée, mais qui peuvent rejoindre le bas de plage et y être en partie émergées à marée basse. Leur position et leur forme varient saisonnièrement et d'une année à l'autre. Dans le secteur du détroit de Northumberland, les crêtes parallèles et distinctes des barres prélittorales s'estompent; elles sont plutôt remplacées par de vastes étendues de hauts-fonds sableux, prenant une allure légèrement ondulée.

Bilan sédimentaire
Expression de la disponibilité en sédiments de l'avant-côte, de la plage et des dunes littorales. Lorsque le bilan sédimentaire de la plage est positif, c'est-à-dire lorsqu'il existe un excédent de sable transitant par la plage, le trait de côte migre vers la mer (avancée ou progradation). Lorsque le bilan sédimentaire de la plage est négatif, c'est-à-dire lorsqu'il existe un déficit de sable transitant par la plage, il y a érosion (recul du trait de côte vers l'intérieur des terres).

Brèche
Trouée dans la dune bordière qui résulte de l'action marine, soit le plus souvent de l'érosion engendrée par l'attaque des vagues de tempête. Le plancher de la brèche se trouve au même niveau que celui du reste de la plage; il est possible d'observer, parsemés aléatoirement dans la brèche, des laisses de mer et des débris marins qui témoignent de l'action des vagues.

Cartographie géocodée multidate
Cartes numériques dont tous les éléments qui y figurent sont positionnés dans l'espace (valeurs de latitude et de longitude connues). Elles sont élaborées avec l'aide d'un système d'information géographique (SIG), à partir de documents (cartes topographiques, cartes bathymétriques) ou d'images (photographies aériennes, images satellitaires). Cet exercice d'attribution de coordonnées géospatiales à des documents, des cartes ou des images est le géocodage.

Dérive littorale
Acheminement et transport latéral des matériaux sableux par les vagues le long de la côte. La dérive littorale correspond à un courant d'eau et de sédiments parallèle au rivage. Le zigzag continuel des matériaux sableux perpétré par l'arrivée et le retrait des vagues crée un courant marin qui contribue à mobiliser, à transporter et à alimenter les plages le long de son trajet. Le sens de la dérive peut être inversé saisonnièrement selon la direction des vents dominants, qui sont à l'origine des vagues.

Dune littorale
Toute accumulation de sable déposée et modelée par les actions du vent. Les dunes littorales se forment lorsqu'il existe une source en sédiments, un vent du large d'une intensité assez forte pour mouvoir les sables, un endroit en retrait des grandes marées où le sable peut être déposé, et une végétation capable de piéger et de fixer le sable en transit (l'ammophile).

Érosion
Ensemble des processus géomorphologiques responsables de l'ameublissement et de l'enlèvement de matériaux à la surface terrestre. Dans la zone littorale, l'érosion marine correspond à l'attaque des côtes par l'action de la mer (processus hydrodynamiques, vagues et courants marins). Les effets de l'érosion marine sont multiples, mais le principal résultat, lorsqu'il y a usure et perte de matériaux, est le déplacement de la ligne de rivage et du trait de côte vers l'intérieur des terres : c'est le recul des falaises, la diminution en superficie des marais maritimes et des dunes littorales.

Falaise
Abrupt à pente forte (de raide à verticale) marquant le contact entre la terre et la mer, et qui est dû à l'action marine. Les falaises sont souvent précédées à leur pied d'un estran, rocheux ou sableux, de pente relativement faible (plate-forme littorale).

Flèche littorale
Type de plage sableuse prenant la forme d'une pointe qui s'attache à la terre ferme à une extrémité et qui s'allonge librement dans la mer à l'autre extrémité. La partie attachée des flèches sableuses est la section proximale, tandis que la partie libre est appelée pointe, ou section distale; entre les deux, c'est la section médiane. Les flèches sont souvent recouvertes de dunes.

Goulet de marée
Étroit passage d'eau maintenu par les courants de marée; passe ou chenal par lequel l'eau de la mer entre et sort d'une lagune ou autre plan d'eau similaire. Le goulet de marée peut aussi correspondre à une brèche dans une dune littorale, dont le fond est continuellement occupé par l'eau de mer (fond submergé).

Marais maritime
Surface basse et relativement plane constituée d'un dépôt de vases, de sables fins et de matières organiques, généralement recouverte de végétation. Les marais maritimes se développent sur les rivages en pente douce et abrités de l'énergie des vagues, soit dans les zones propices à l'accumulation des sédiments fins, souvent à l'arrière des dunes littorales. Les marais maritimes sont submergés par l'eau de mer durant les grandes marées mensuelles ou lors de tempêtes.

Marais saumâtre de transition
Surface légèrement surélevée par rapport au marais maritime, auquel il est associé, le marais saumâtre de transition se situe entre le marais maritime et la terre ferme. Il n'est submergé par l'eau de mer que de façon épisodique, par les grandes marées d'équinoxe ou lors de tempête.

Nappe de débordement
Dépôt marin de sable, de gravier et de matière organique laissé au-delà de la falaise dunaire par les vagues d'une tempête. La mise en place de nappes de débordement exige généralement la conjonction de plusieurs facteurs : un niveau élevé de la marée, une onde de tempête significative (dépression atmosphérique accusée), de fortes vagues et de forts vents. Sur la côte néo-brunswickoise du golfe Saint-Laurent, le processus de migration des flèches littorales, des îles-barrières et des dunes littorales vers l'intérieur des terres se fait principalement au moyen de nappes de débordement successives.

Plage
Accumulation de sédiments marins non cimentés. La taille des matériaux varie des sables fins (0,2 à 2 mm), aux graviers (0,2 à 2 cm) et aux galets (2 à 20 cm). Le point critique pour la formation des plages est lorsque la quantité de matériaux disponibles dépasse le volume de sédiments que les vagues et la dérive littorale peuvent soutirer : dans ces conditions, l'accumulation l'emporte sur l'érosion.

Point d'ancrage
Artéfact servant à la rectification ou au géocodage numérique de photographies aériennes. Les points d'ancrage représentent des éléments du paysage qui sont identifiables d'une photographie (année) à l'autre, et qui n'ont pas changé d'emplacement. Ils peuvent correspondre à des coins de maisons, de hangars, des intersections de routes ou même des limites de champs en culture, etc. Dans les secteurs où la présence humaine est limitée, voire absente, comme dans le cœur des marais maritimes ou bien dans la section distale de flèches littorales, les points d'ancrage sont plus difficilement identifiables. Dans ces cas-là, des éléments naturels sont utilisés, tels des arbres isolés, des bosquets de myrique de Pennsylvanie, des pannes dunaires, des mares ou petits plans d'eau dont les limites n'ont visiblement pas changé.

Structure de protection
Enrochement, murs de béton, de bois ou d'acier installés de façon parallèle au trait de côte. L'enrochement s'apparente à un monticule allongé de gros blocs rocheux ou de béton, disposé au pied d'une falaise ou d'une infrastructure, pour protéger la côte contre l'attaque des vagues. La surface inclinée et bosselée de l'enrochement permet de dissiper l'énergie des vagues et de ralentir l'amaigrissement inévitable de la plage située devant. À l'opposé, la surface verticale et lisse d'un mur tend à réfléchir l'énergie des vagues et à favoriser l'affouillement à sa base, d'où l'amaigrissement rapide de la plage.

Till
Dépôt d'origine glaciaire, généralement hétérogène, non consolidé et non stratifié. Il est composé, en proportions variables, d'argiles, de limons, de sables, de graviers et de blocs.

Zone littorale
Zone de contact entre le milieu continental et le milieu océanique. Le littoral se divise en trois parties, la côte, le rivage et l'avant-côte. La côte forme la partie supérieure du littoral. Elle s'étend entre la limite continentale de l'effet des embruns marins et le niveau supérieur des hautes eaux (NSHE), mais exclut les secteurs frappés par les hauts niveaux de tempête (vagues, inondations). La côte ne subit donc qu'indirectement l'influence océanique. Le rivage désigne la partie médiane du littoral. Il est compris entre le niveau supérieur des hautes eaux (NSHE) et le niveau inférieur des basses eaux (NIBE). Le rivage forme donc la zone de balancement des marées (à l'échelle annuelle), c'est l'estran au sens large. L'avant-côte forme la partie inférieure du littoral. Elle s'étend du niveau inférieur des basses eaux (NIBE) jusqu'à la profondeur correspondant à la limite de l'effet des vagues sur le fond marin. L'avant-côte ne subit donc qu'indirectement l'influence continentale.

4.5.6 Références

Bégin, Y., Arseneault, S. et Lavoie, J. 1989. Dynamique d'une bordure forestière par suite de la hausse récente du niveau de la mer, rive sud-ouest du golfe du Saint-Laurent, Nouveau-Brunswick. *Géographie physique et quaternaire*, **43** (3), 355-366.

Bérubé, D. 1993. Répartition des structures de protection côtières dans le détroit de Northumberland, Nouveau-Brunswick. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, Division des ressources minérales. Planche 93-319.

Bérubé, D. et Evans, P. 2003. Évolution de la flèche de Grande-Digue entre 1945 et 2001. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, Direction des études géologiques. Planche 2003-04.

Bérubé, D. et Thibault, J.J. 1996. Géomorphologie littorale du détroit de Northumberland, sud-est du Nouveau-Brunswick. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, Division des ressources minières et de l'énergie. Rapport géoscientifique 96-1, 86 pages.

Bérubé, D. et Thibault, J.J. 1998. Coastal geomorphology of Northumberland Strait, southeast New Brunswick. Geoscience Report 96-2, New Brunswick Department of Natural Resources and Energy, Minerals and Energy Division, 86 p.

Bérubé, D., O'hearn, S., Giangioppi, M. et Evans, P. 2002. Évolution de la barre de Cocagne, sur la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, entre 1839 et 2001. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, Division des minéraux, des politiques et de la planification.

Bérubé, D., Whalen, P. et Godin, J. 2006. Érosion littorale et dégradation de la forêt dans le secteur nord-est de l'île de Cocagne, Nouveau-Brunswick, entre 1940 et 1994. Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick, Direction des études géologiques. Rapport et affiche disponibles sur demande.

Boak, E.H. et Turner, I.L. 2005. Shoreline definition and detection: A review. *Journal of Coastal Research*, **21** (4), 688-703.

Carter, R.W.G. 1988. Coastal environments. Academic Press, London, 617 p.

Chiasson, M. 2000. Développement d'un plan de suivi environnemental pour la flèche littorale de Bouctouche (Nouveau-Brunswick). Mémoire de maîtrise, Études de l'environnement, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick, 211 p.

Cormier, M. 2006. La protection des infrastructures côtières dans le contexte d'une hausse relative du niveau de la mer aux Îles-de-la-Madeleine, Québec. Mémoire de baccalauréat, Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick, 125 p.

Dagneau, B. 1996. Mode d'évolution du système d'îles-barrières du parc national Kouchibouguac, au Nouveau-Brunswick, de 1930 à 1991. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 154 p.

Dagneau, B. 2002. Évolution holocène récente et dynamique actuelle des systèmes de barrières sableuses dunifiées des parcs nationaux canadiens des Maritimes. Thèse de doctorat, Département de géographie, Université Laval, Québec, Québec, 330 p.

Davidson-Arnott, R.G.D. et Greenwood, B. 1974. Bedforms and structures associated with bar topography in the shallow-water wave environment, Kouchibouguac Bay, New Brunswick, Canada. *Journal of Sedimentary Petrology*, **44**, 698-704.

Forbes, D.L. 1982. Sources of sand contributing to harbour shoaling at Pte Sapin, New Brunswick. Proceedings, Workshop on Atlantic Coastal Erosion and Sedimentation,

Halifax. Associate Committee for Research on Shoreline Erosion and Sedimentation, Conseil national des recherches du Canada, Ottawa, 51-58.

Forbes, D.L. 1987. Shoreface sediment distribution and sand supply at C^2S^2 sites in the southern Gulf of St. Lawrence. Proceedings, Coastal Sediments 87, New Orleans. American Society of Civil Engineers, New York, 694-709.

Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K. et Ketch, L.A. 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, **210**, 169-204.

Forward, C.N. et Raymond, C.W. 1960. The Physical Character of the Shorelines along Northumberland Strait and the Effects of the Tidal Changes Resulting from Construction of a Causeway: Supplementary Report. Ministère des Mines et des Services techniques, Direction géographique, Ottawa, 9 p.

Forward, C.N., Raymond, C.W. et Rayburn, J.A. 1959. The Physical Character of the Shorelines along Northumberland Strait and the Effects of the Tidal Changes Resulting from Construction of a Causeway. Ministère des Mines et des Services techniques, Direction géographique, Ottawa, 15 p.

French, P.W. 2001. Coastal Defenses. Routledge, Londres, 366 p.

Ganong, W.F. 1908. The physical geography of the north shore sand islands. *Natural History Society of New Brunswick*, Bulletin, **6** (26), 22-29.

Giangioppi, M. 2004. Variation du trait de côte et impact géomorphologique des tempêtes dans la cellule sédimentaire de la flèche de Bouctouche, sur le littoral sud-est du Nouveau-Brunswick, entre 1945 et 2001. Mémoire de maîtrise, Études de l'environnement, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick, 123 p.

Giangioppi, M., Bérubé, D. et Evans, P. 2002a. Déplacement de la ligne de côte dans la cellule sédimentaire du cap de Richibouctou - flèche de Bouctouche, Nouveau-Brunswick, entre 1945 et 2000/2001. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, Division des ressources minières et de l'énergie. Planche 2002-26.

Giangioppi, M., Bérubé, D. et Evans, P. 2002b. Formes et dépôts de tempêtes de la flèche de Bouctouche, côte sud-est du Nouveau-Brunswick, entre 1945 et 1971 et entre 1973 et 2000. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, Division des ressources minières et de l'énergie. Planches 2002-35A et 2002-35B.

Greenwood, B. et Davidson-Arnott, R.G.D. 1975. Marine bars and nearshore sedimentary processes, Kouchibouguac Bay, New Brunswick. In Nearshore sediments and sediment dynamics (Hails, J. and Carr, A., editors), Wiley, 123-150.

Greenwood, B. et Davidson-Arnott, R.G.D. 1977. An interpretive study of coastal processes, Parc national Kouchibouguac, Nouveau-Brunswick. Parcs Canada, Halifax, 398 p.

Greenwood, B. et Davidson-Arnott, R.G.D. 1979. Sedimentation and equilibrium in wave-formed bars: a review and case study. *Canadian Journal of Earth Science*s, **16**, 312-332.

Greenwood, B. et Hale, P.B. 1980. Depth of activity, sediment flux, and morphological change in a barred nearshore environment. In The coastline of Canada (McCann, S.B., editor). Commission géologique du Canada, DEMR, Ottawa, Paper 80-10, 89-109.

Hale, P.B. et Greenwood, B. 1980. Storm wave climatology: a study of the magnitude and frequency of geomorphic process. In The coastline of Canada (McCann, S.B., editor). Commission géologique du Canada, Ottawa, Paper 80-10, 73-88.

Hughes, M.L., McDowell, P.F. et Marcus, W.A. 2006. Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology*, **74**, 1-16.

Hunter, G.T. - Airphoto Analysis Associates Consultants Limited. 1975. Beach Resources, Eastern New Brunswick. Ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick. Direction des ressources minérales. Miscellaneous Report, 215 p.

Johnson, D. 1925. The New England -Acadian shoreline. Wiley, New York, 608 p.

Kranck, K. 1967. Bedrock and sediments of Kouchibouguac Bay, New Brunswick. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, **24**, 2241-2265.

Kranck, K. 1971. Surficial geology of Northumberland Strait. Geological Survey of Canada, Ottawa, Paper 71-53, 10 p. (and Canadian Hydrographic Service Chart 4023-G).

Kranck, K. 1972. Geomorphological development and post-Pleistocene sea-level changes, Northumberland Strait, Maritime Provinces. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **9**, 835-844.

McBride, R.A., Byrnes, M.R. et Matteson, W.H. 1995. Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective. *Marine Geology*, **126**, 143-159.

McCann, S.B. 1982. Barrier islands in the southern Gulf of St. Lawrence, Canada. In Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico (Leatherman, S.P., editor), Academic Press, New York, 29-63.

Nouveau-Brunswick. 2002. Atlas Nouveau-Brunswick. 2^{e} édition revue. Nimbus Publishing, Halifax, et Services Nouveau-Brunswick , Fredericton, 94 cartes et index.

O'Carroll, S. 1996. Sensibilité du littoral du Nouveau-Brunswick au recul du trait de côte. Rapport de stage, Maîtrise en sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, 32 p.

O'Carroll, S. et Bérubé, D. 1997. Sensibilité des côtes du Nouveau-Brunswick aux vagues de tempêtes. Ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick, Division des ressources minières et de l'énergie. Planche 97-3.

Ollerhead, J. 1993. The evolution of the Bouctouche spit, Nouveau-Brunswick, Canada. Thèse de doctorat, Department of Geography, Guelph University, Guelph, Ontario, 156 p.

Ollerhead, J. et Davidson-Arnott, R.G.D. 1995a. Canadian Landforms Examples: Bouctouche Spit, Nouveau-Brunswick, Canada. *The Canadian geographer*, **39** (3), 274-282.

Ollerhead, J. et Davidson-Arnott, R.G.D. 1995b. The evolution of Bouctouche Spit, Nouveau-Brunswick, Canada. *Marine Geology*, **124**, 215-236.

Ollerhead, J., Huntley, D.J. et Berger, G.W. 1994. Luminescence dating of sediments from Buctouche Spit, Nouveau-Brunswick. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **31**, 523-531.

Paskoff, R. 1998. Les littoraux. Impacts des aménagements sur leur évolution. Armand Colin, Paris, 260 p.

Pierre, G. 2006. Processes and rate of retreat of the clay and sandstone sea cliffs of the northern Boulonnais (France). *Geomorphology*, **73**, 64-77.

Rampton, V.N., Gauthier, R.C., Thibault, J. et Seaman, A.A. 1984. Quaternary geology of New Brunswick. Commission géologique du Canada, Ottawa, Mémoire 416, 77 p. (et carte 1594A).

Roberge, L. 1994. Calcul des taux d'érosion littorale dans le secteur est du Cap-Jourimain entre 1933 et 1993. Mémoire de baccalauréat, Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick, 48 p.

Robichaud, A. 1989. Évolution du littoral entre Robichaud et Dupuis Corner, Nouveau-Brunswick. Mémoire de baccalauréat, Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick, 44 p.

Robichaud, A. 1993. Effets des tempêtes et des fluctuations du niveau de la mer sur les bordures forestières du détroit de Northumberland au Nouveau-Brunswick. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et Centre d'études nordiques, Université Laval, Québec, Québec, 72 p.

Robichaud, A. et Bégin, Y. 1997. The Effects of Storms and Sea-Level Rise on a Coastal Forest Margin in New Brunswick, Eastern Canada. *Journal of Coastal Research*, **13** (2), 429-439.

Ruggiero, P., Kaminsky, G.M. et Gelfenbaum, G. 2003. Linking proxy-based and datum-based shorelines on a high-energy coastline: implications for shoreline change analysis. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. **38**, 57-82.

Shaw, J. et Forbes, D.L. 1987. Coastal barrier and beach-ridge sedimentation in Newfoundland. Proceedings, Canadian Coastal Conference 1987, Québec. Associate Committee for Research on Shoreline Erosion and Sedimentation, Conseil national des recherches du Canada, Ottawa, 437-452.

Shaw, J. et Forbes, D.L. 1992. Barriers, barrier platforms, and spillover deposits in St. George's Bay, Newfoundland: paraglacial sedimentation on the flanks of a deep coastal basin. *Marine Geology*, **105**, 119-140.

Tremblay, M. 1993. Calcul des taux d'érosion littorale dans le détroit de Northumberland entre Cap-Lumière et Port Elgin, Nouveau-Brunswick : une approche photogrammétrique. Mémoire de baccalauréat, Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick, 90 p.

Zuzek, P.J., Nairn, R.B. et Thieme, S.J. 2003. Spatial and temporal considerations for calculating shoreline change rates in the Great Lakes Basin. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. **38**, 125-146.

4.6 Impacts sur les écosystèmes

Alan Hanson[1]*, Donald Forbes [2], Dominique Bérubé[3], Stéphane O'Carroll[1,3], Matthew Mahoney[1], Jeffrey Ollerhead[4], Léa Olsen[4], Éric Tremblay[5], Andrew Boyne[6], Shawn Craik[7], Rodger Titman[7], Jennifer Stewart[1], Jennifer Strang[2,] George Parkes[8], Diane Amirault[1], Anna Calvert[9], Lee Swanson[10]

[1]Service canadien de la faune, Environnement Canada, C. P. 6227, Sackville, Nouveau-Brunswick E4L 1G6, Canada
[2]Commission géologique du Canada, Ressources naturelles Canada, 1, ch. Challenger (C. P. 1006), Dartmouth, Nouvelle-Écosse B2Y 4A2, Canada
[3]Division des études géologiques du Nouveau-Brunswick, Ministère des Ressources naturelles, C. P. 50, Bathurst, Nouveau-Brunswick E2A 3Z1, Canada
[4]Département de géographie, Université Mount Allison,
144, rue Main, Sackville, Nouveau-Brunswick E4L 1A7, Canada
[5]Parcs Canada,
186, Route 117, Parc national Kouchibouguac, Nouveau-Brunswick E4X 2P1, Canada
[6]Service canadien de la faune, 45, ch. Alderney, 16e étage, Queen Square,
Dartmouth, Nouvelle-Écosse B2Y 2N6, Canada
[7]Département des sciences des ressources naturelles, Université McGill,
Sainte-Anne-de-Bellevue, Québec H9X 3V9, Canada
[8]Centre canadien de prévision d'ouragan, Environnement Canada,
45, ch. Alderney, 16e étage, Dartmouth, Nouvelle-Écosse B2Y 2N, Canada
[9]Departement de biologie, Université Dalhousie, Halifax, Nouvelle-Écosse B3H 4J1, Canada
[10]Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, place Marysville, C. P. 6000, Fredericton, Nouveau-Brunswick E3B 5H1, Canada

* Pour communiquer avec l'auteur [courriel : al.hanson@ec.gc.ca]

4.6.1 Introduction aux impacts sur l'écosystème côtier de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et du changement climatique[22]

L'écosystème côtier comprend un grand nombre d'espèces, d'habitats et d'animaux. Notre analyse des impacts sur l'écosystème de l'élévation du niveau de la mer met l'accent sur les habitats et les espèces terrestres qui subiraient les conséquences d'une élévation du niveau de la mer et d'une onde de tempête. Étant donné la courte durée de l'étude, nous avons utilisé les données existantes.

Cette section donne un aperçu du travail réalisé dans le cadre de l'étude sur l'élévation du niveau de la mer. On trouvera plus de détails techniques sur les divers projets de recherche dans le rapport technique du Service canadien de la faune (Hanson 2006).

4.6.1.1 Références

Hanson, A.R. (dir. de publ.). 2006. Ecosystem impacts of sea-level rise and climate change on the coastal zone of south-eastern New Brunswick. Rapport technique no

[22] Auteurs : Alan Hanson, Lee Swanson et Éric Tremblay.

463. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada. 233 p.

4.6.2 Vue d'ensemble de l'habitat côtier dans le sud-est du Nouveau-Brunswick[23,24]

4.6.2.1 Introduction

Nous avons résumé les données du Maritime Wetland Inventory sur la zone à l'étude, afin de mieux comprendre l'importance relative de l'impact de l'élévation du niveau de la mer et des changements climatiques sur l'habitat. Nous avons également décrit l'ampleur de l'inondation éventuelle de l'habitat côtier dans divers scénarios d'élévation du niveau de la mer.

4.6.2.2 Méthodes

Nous avons obtenu les données sur les entités d'habitat côtier des unités côtières de la Pointe Escuminac à Cap-Tourmentin de la base de données numériques Maritime Wetland Inventory (Figure 1; Hanson et Calkins, 1996). Ces données constituent une excellente source de renseignements sur les habitats, mais nous n'avions pas accès à des données numériques sur l'étendue spatiale des entités d'habitat côtier. C'est pourquoi nous n'en avons pas utilisé pour modéliser la prédiction des inondations.

[23] Auteurs : Allan Hanson, Matthew Mahoney et Lee Swanson.

[24] Les auteurs remercient Tim Webster et ses collègues pour la cartographie des zones exposées aux inondations.

Figure 1 : Limites des unités côtières du Maritime Wetland Inventory.

Nous avons téléchargé les couches SIG sur les caractéristiques naturelles et culturelles à partir du site Web de Services Nouveau-Brunswick (SNB, 2004). Nous avons utilisé le logiciel ArcGIS pour acquérir et fusionner les couches hydrographiques de soixante feuilles de carte (1:10 000) (figure 2). La zone à l'étude s'est limitée aux régions pour lesquelles nous disposions de données numériques sur l'élévation, telles que recueillies par LiDAR (Section 4.4).

Nous avons analysé quatre différents scénarios d'inondation : 0,6 m au-dessus du zéro du MAN (approximativement le niveau moyen de la mer), évaluation de l'impact de l'élévation prévue de la mer dans la région d'ici l'an 2100; 2,55 m au-dessus du zéro du MAN, reproduction de l'onde de tempête de janvier 2000; 3,05 m au-dessus du zéro du MAN, l'onde de tempête de janvier 2000 avec une élévation de 0,5 m du niveau de la mer; 3,25 m au-dessus du zéro du MAN, l'onde de tempête de janvier 2000 avec une élévation de 0,7 m du niveau de la mer. Pour les scénarios d'inondation, nous nous sommes basés sur les élévations et la présence d'une voie de passage pour les eaux (Section 4.4.2.7). Pour le parc national Kouchibouguac nous ne disposions que de scénarios d'inondation pour une élévation de plus de 60 cm.

Pour une description complète de la méthodologie des systèmes d'information géographique, consultez Hanson (2006).

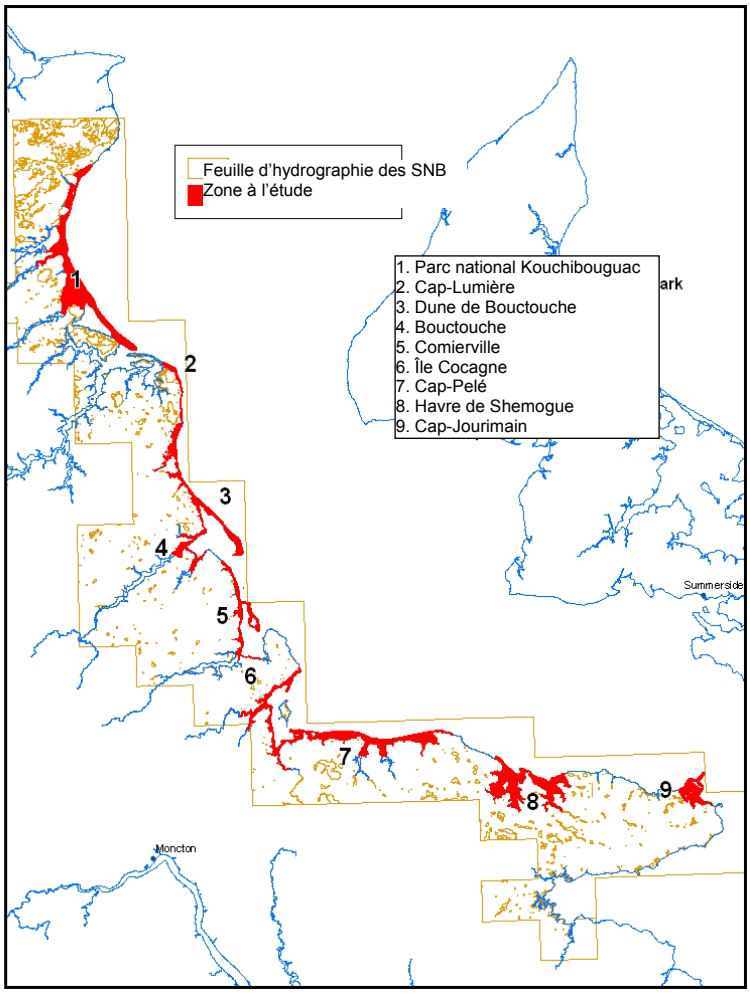


Figure 2. Location des levés par LiDAR et de la zone à l'étude sur l'inondation de l'habitat côtier

4.6.2.3 Résultats

D'après le Maritime Wetland Inventory (Hanson et Calkins, 1995), le plus grand nombre et la plus grande surface d'habitats côtiers se trouvent dans le nord-ouest et le sud-est de la zone à l'étude (tableau 1). L'unité côtière n° 7 (figure 1) est riche en marais et en étangs salés, en habitats de plages et de dunes. C'est dans l'unité n° 7 que l'on retrouve le parc national Kouchibouguac, et le littoral relativement intact qui va de Pointe-Sapin à Escuminac, au nord du parc. On trouve moins d'habitats côtiers dans les unités côtières n° 8 et n° 9 qui comprennent les collectivités de Cocagne, de Shediac et de Cap-Pelé. La Dune de Bouctouche, dans l'unité côtière n° 8, contribue beaucoup à l'habitat de dunes total de cette unité. L'unité côtière n° 10 comprend 700 ha de marais salés, dont la

plupart dans la région de Shemogue et la réserve nationale de faune de Cap-Jourimain (figure 1).

Quand le niveau d'eau augmente, de plus en plus d'habitats côtiers sont inondés et les inondations sont de plus en plus profondes (tableau 2). Nous n'avons pas utilisé la carte de base améliorée de Services Nouveau-Brunswick pour déterminer l'étendue totale de l'habitat côtier, car nous ne disposions d'aucune méthode normalisée pour décider si une entité était réellement de nature côtière ou non. Par exemple, certains marais salés associés à une rivière à marées sont parfois très éloignés du bord de mer. Par conséquent, les données des tableaux 1 et 2 doivent être considérées comme complémentaires les unes des autres, mais il est impossible de comparer directement les deux tableaux.

L'étendue et la profondeur d'inondation des entités côtières sont directement fonction de leur élévation relative (tableau 2). Ce sont d'abord les rivières, les marais et les plages de la côte qui subissent l'inondation, suivis de la plate-forme rocheuse et des dunes. Le niveau d'eau de 0,6 m au-dessus du zéro du MAN touche une plus petite surface et beaucoup moins d'entités côtières que le scénario d'une élévation de 2,55 m associée à une onde de tempête, et que les scénarios d'une élévation de 3,05 ou de 3,25 m associée à une onde de tempête en plus d'une élévation du niveau de la mer.

Dans le scénario d'une élévation de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN, 1 397 ha de terres hautes, 1 634 ha de marais côtiers, 388 ha de dunes, 159 ha de marécages et 226 ha de plages ont été inondés. La profondeur moyenne de l'inondation dans ce scénario était de 0,74 m pour les terres hautes, 0,84 m pour les marécages, 1,13 m pour la dune, 1,58 m pour la plage et 1,64 m pour les marais côtiers.

Tableau 1. Nombre et superficie totale des entités côtières dans l'unité n° 7, (Pointe Escuminac à Cap-Lumière), n° 8 (Cap-Lumière à Cap-des-Caissie), n° 9 (Cap-des-Caissie à Trois-Ruisseaux) et n° 10 (Trois-Ruisseaux à Cap-Tourmentin). Données tirées du Maritime Wetland Inventory.

	Marais salés		Étangs		Plages		Dunes		Vasières		Îles	
Unité	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)	Nombre	Surface (ha)
7	207	457,2	20	133,2	40	352,2	27	518,2	61	8 412,7	2	140,3
8	61	169,4	21	69,1	26	121,6	19	310,7	28	3965,7	1	275,9
9	51	234,6	5	23,8	16	51	22	50,7	20	2593	1	275
10	76	701,2	3	63,4	17	51,9	17	51,1	16	1088	0	0
Total	395	1 562,4	49	289,5	99	576,7	85	930,7	125	1 6059,4	4	691,2

Tableau 2. Nombre de polygones d'habitats côtiers inondés, surface totale inondée et profondeur moyenne de l'inondation dans quatre différents scénarios d'élévation du niveau de la mer. Données tirées de la carte de base améliorée du Nouveau-Brunswick

	Nombre	Surface (ha) inondée	Nombre	Surface (ha) inondée	Prof. moyenne	Nombre	Surface (ha) inondée	Prof. moyenne	Nombre	Surface (ha) inondée	Prof. moyenne
Habitat	ÉNM de 0,60 m	ÉNM de 0,60 m	ÉNM de 2,55 m	ÉNM de 2,55 m	ÉNM de 2,55 m	ÉNM de 3,05 m	ÉNM de 3,05 m	ÉNM de 3,05 m	ÉNM de 3,25 m	ÉNM de 3,25 m	ÉNM de 3,25 m
Terre haute	12	11,62	21	1 396,88	0,74	21	2 127,17	0,96	21	2 431,45	1,12
Arrière-plage	255	13,66	341	226,41	1,58	342	231,06	2,02	342	231,92	2,26
Marais côtier	382	81,83	473	1 634,34	1,64	480	1 670,16	2,08	481	1 672,30	2,34
Dune	76	4,97	113	388,19	1,13	114	487,15	1,48	114	509,06	1,72
Plate-forme rocheuse	3	0,02	3	0,26	1,33	3	0,28	1,60	3	0,28	1,96
Lac	3	1,32	9	7,31	1,16	14	8,63	1,29	16	9,60	1,29
Rivière	1	0,00	1	0,18	1,83	1	0,18	2,32	1	0,18	2,52
Marécage	4	0,01	21	159,36	0,84	26	211,92	0,99	27	229,10	1,18

4.6.2.4 Sommaire et conclusions

Sur l'ensemble de la zone à l'étude, la quantité d'habitats côtiers varie d'un endroit à l'autre. De Cocagne à Cap-Pelé, les habitats côtiers sont plus clairsemés que dans les régions contiguës au nord-ouest ou au sud-est. Les habitats côtiers de marais salés, de plages, de dunes et de plate-forme rocheuse sont tous situés dans des endroits relativement bas et, par conséquent, exposés aux changements provoqués par l'inondation.

Les données du tableau 3 ne permettent pas de généraliser facilement l'impact d'une inondation due à la marée montante sur diverses entités côtières. Certaines entités côtières et espèces végétales récupèrent bien après avoir été inondées par de l'eau salée. Sous le vocable de marais côtiers, on peut trouver des milieux humides dont la capacité d'adaptation à la salinité est variable. En outre, la durée et la profondeur de l'inondation peuvent influer grandement sur l'impact qu'elle aura, puisqu'elles sont étroitement liées avec les régimes de marée. Comme on le verra dans la Section 4.6.5, la flore des marais salés est très sensible à la fréquence et à la durée des inondations d'eau salée. Les données fournies dans cette section visent à présenter des renseignements sur l'étendue de l'habitat côtier qui subira les conséquences de ces forces de changement.

Il convient de noter que 27 marécages seront submergés par des inondations de 3,25 m. Les espèces arborescentes du Nouveau-Brunswick ne se remettent pas facilement d'une inondation par l'eau salée. À bien des endroits au Canada atlantique, par exemple à Escuminac, la perte des arbres sur le rebord extérieur est l'un des premiers signes visibles de l'élévation du niveau de la mer.

L'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête peuvent exercer divers impacts sur les entités d'habitat côtier. Ce sont ces changements potentiels qui sont étudiés dans les prochains chapitres.

4.6.2.5 Références

Hanson, A.R. (dir. de publ.). 2006. Ecosystem impacts of sea-level rise and climate change on the coastal zone of south-eastern New Brunswick. Rapport technique n° 463. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada. 223 p.

Hanson, A., et L. Calkins. 1996. Wetlands of the Maritime Provinces: Revised Documentation for the Wetlands Inventory. CWS Technical Report No. 267. Canadian Wildlife Service, Sackville, NB.

Services Nouveau-Brunswick. 2004. Base de données topographiques numériques - 1998 (BDTN). https://www.web11.snb.ca/snb7001/e/2000/2900e_1c_i.asp

4.6.3 Impact de l'élévation du niveau de la mer et de l'expansion résidentielle sur la superficie occupée par les marais salés dans le sud-est du Nouveau-Brunswick de 1944 à 2001[25,26]

4.6.3.1 Introduction

Les marais salés sont des écosystèmes uniques, résultat d'interactions complexes entre l'hydrologie, la sédimentation, la salinité, l'amplitude et la périodicité des marées et la productivité primaire (Bertness, 1999). Les mêmes caractéristiques physiques et biologiques qui font des marais salés l'un des écosystèmes les plus productifs de la zone tempérée ont également favorisé la colonisation européenne du nord-est de l'Amérique du Nord (qu'on appellera désormais le nord-est dans la suite de ce propos). Depuis la première colonisation européenne, l'augmentation de la population humaine et l'expansion des villes et des villages a fait en sorte que les marais salés n'ont cessé d'être vidés, remplis ou altérés.

En plus de l'impact direct de l'activité humaine sur les milieux humides côtiers, les changements climatiques, l'élévation prévue du niveau de la mer et l'augmentation de fréquence et d'intensité des tempêtes risquent également d'exercer un impact sur ces entités. Les marais salés sont des systèmes dynamiques qui peuvent réagir à l'élévation du niveau de la mer en s'élevant par accumulation de sédiments et de matières organiques, et également reculer vers l'intérieur des terres. La question à savoir si les marais peuvent croître sur la verticale à la même vitesse que l'élévation du niveau de la mer dépend de nombreux facteurs locaux comme l'apport en sédiments, la productivité primaire et les taux de décomposition. Modéliser la réaction des marais salés à l'élévation du niveau de la mer peut par conséquent se révéler un exercice très complexe et limité par la disponibilité des données (Galbraith, 2002).

La capacité de migration vers l'intérieur des marais salés, en réaction aux élévations du niveau de la mer, dépend de l'élévation relative du terrain adjacent, des infrastructures existantes et de l'intervention humaine. Le rétrécissement littoral empêche les milieux humides côtiers de migrer vers l'intérieur en réaction aux élévations du niveau de la mer, à cause de la présence d'infrastructures humaines comme les digues (Nicholls et Branson, 1998).

Les marais salés exercent de nombreuses fonctions et rendent de nombreux services au sein de l'écosystème (Bertness, 1999); ils fournissent, par exemple, un habitat à diverses espèces d'oiseaux à tous les stades de leur cycle annuel. Ils sont d'importants sites de reproduction pour de nombreux oiseaux (Hanson et Shriver, 2006). Dans le nord-est, les organismes de la province, du fédéral et des États-Unis ont déterminé que les espèces

---

[25] Auteurs : Allan Hanson, Dominique. Bérubé, Donald Forbes, Stéphane O'Carroll, Jeff Ollerhead et Léa Olsen

[26] Les auteurs désirent remercier M[me] Christina Tardiff, M[me] Angela Pitcher et M. Francois Léger du *Mount Allison Coastal Wetland Institute* pour leur aide au chapitre de la cartographie. Nous remercions tout spécialement M. Serge Jolicoeur et le département de géographie de l'Université de Moncton pour le soutien logistique et technique. Le Fonds d'action pour le changement climatique (Projet A591) a contribué au financement du projet, de même qu'Environnement Canada, Ressources naturelles Canada et le ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick.

comme le bruant de Nelson, le bruant à queue aiguë et le chevalier semipalmé sont des espèces à surveiller.

Bien qu'on dispose de peu de données sur les taux d'accrétion verticale des marais salés le long du détroit de Northumberland, cette analyse rétrospective aide à comprendre comment les marais peuvent réagir à de futures élévations du niveau de la mer. Le deuxième aspect important de cette étude est de décrire les changements survenus dans les marais salés en raison d'activités humaines comme le drainage et le remplissage.

4.6.3.2 Méthodes

Tous les sites à l'étude étaient dans le sud-est du Nouveau-Brunswick le long du golfe du Saint-Laurent (figure 3). Pour une description du site à l'étude et des marais salés, consultez Hanson 2006.

4.6.3.2.1 Sites à l'étude

Le site à l'étude de Cap-Jourimain, d'une superficie de 563 ha, se trouve dans les limites de la réserve nationale de faune de Cap-Jourimain; il est centré sur le centre d'interprétation de la nature et le pont de la Confédération vers l'Île-du-Prince-Édouard (figure 4).

Le site à l'étude de Shemogue couvre environ 13 230 ha et 105 km de rivage (figure 5).

Le site à l'étude de l'Aboiteau est contigu à la limite ouest du site à l'étude Shemogue et couvre environ 6 501 ha et 59 km de rivage (figure 3).

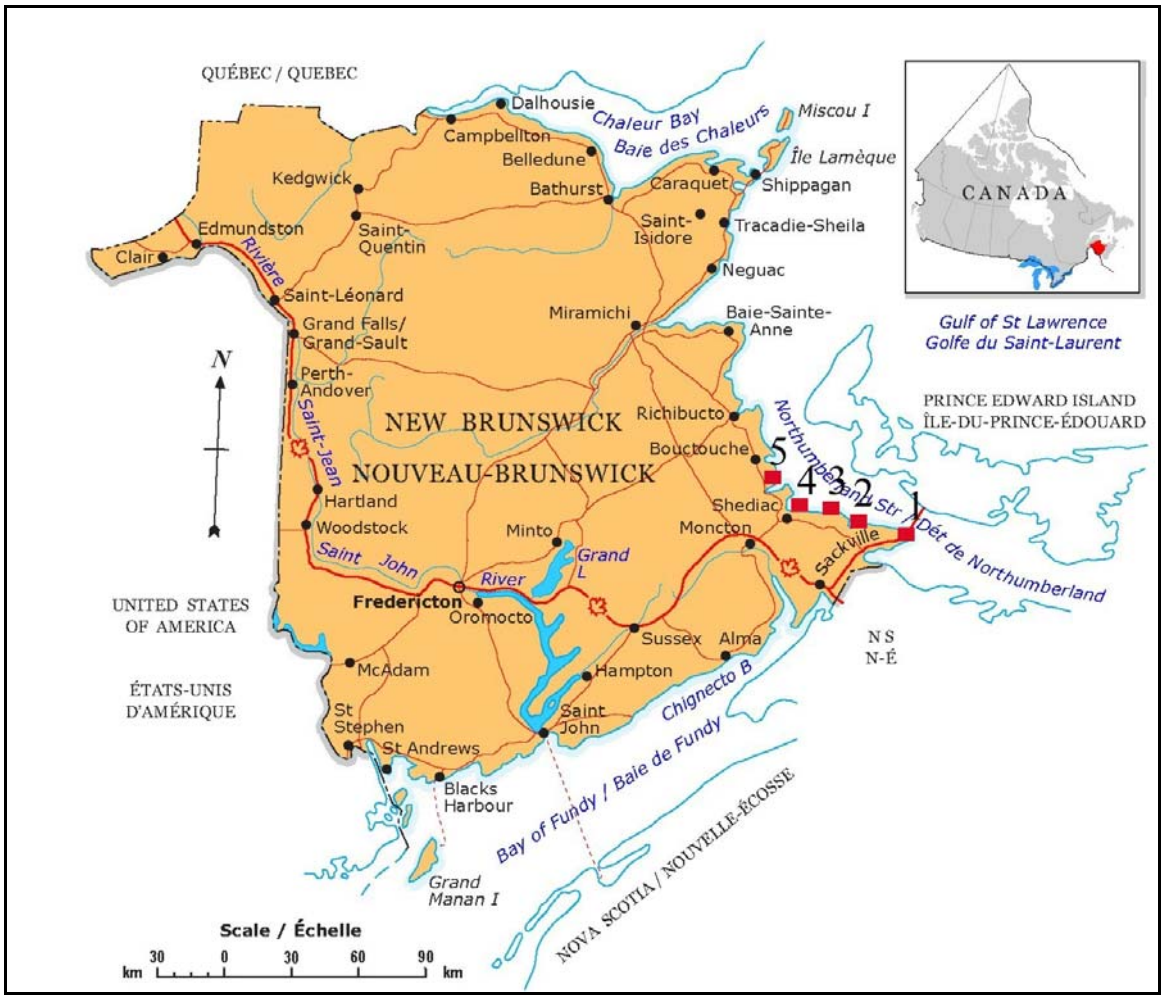


Figure 3. Emplacement approximatif des sites à l'étude dans le sud-est du Nouveau- Brunswick (1 - Cap-Jourimain; 2 - Shemogue; 3 - l'Aboiteau; 4 - Shediac; 5 - Cocagne).

Le site à l'étude de Shediac est contigu à la limite ouest du site à l'étude de l'Aboiteau et couvre environ 1 240 ha (figure 6). Parmi tous les sites à l'étude, c'est celui où l'on trouve la plus grande densité d'ensembles résidentiels et récréatifs, et des résidences d'été.

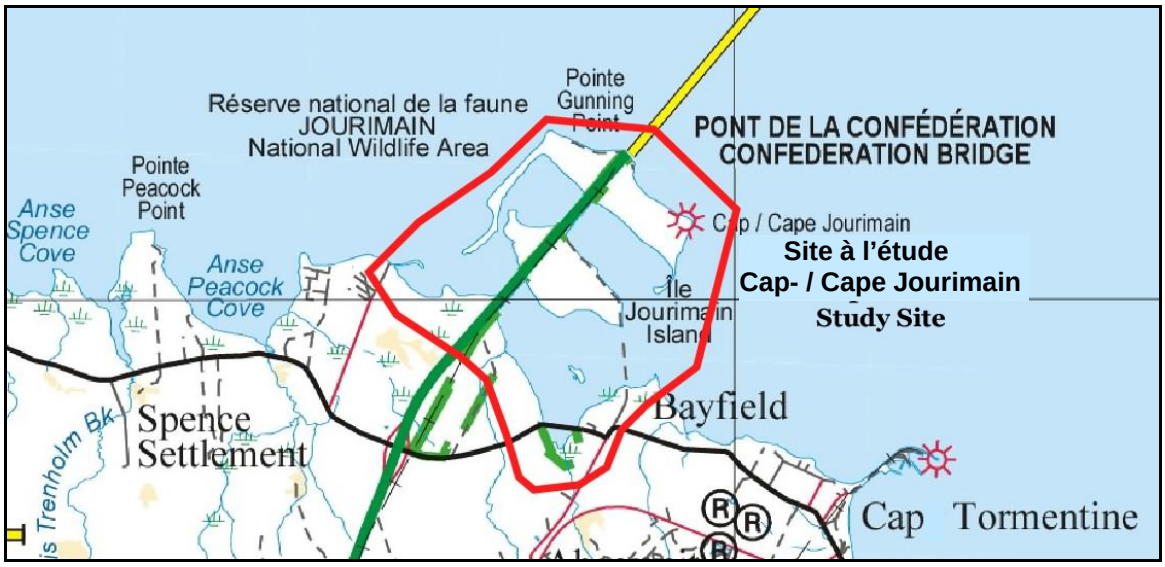


Figure 4. Limites approximatives (en rouge) du site à l'étude de Cap-Jourimain dans le sud-est du Nouveau-Brunswick.

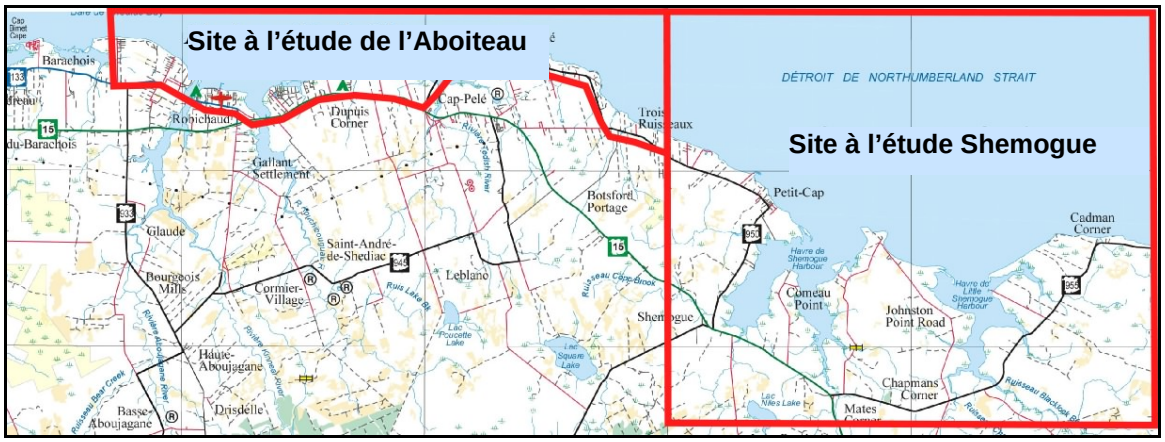


Figure 5. Limites approximatives (en rouge) des sites à l'étude de Shemogue et de l'Aboiteau dans le sud-est du Nouveau-Brunswick.

Le site à l'étude de Cocagne est juste à l'ouest du site à l'étude de Shediac et couvre environ 14 395 ha et 66 km de rivage (figure 7). On y trouve une densité modérée d'ensembles résidentiels.

Figure 6. Limites approximatives (en rouge) du site à l'étude de Shediac dans le sud-est du Nouveau-Brunswick.

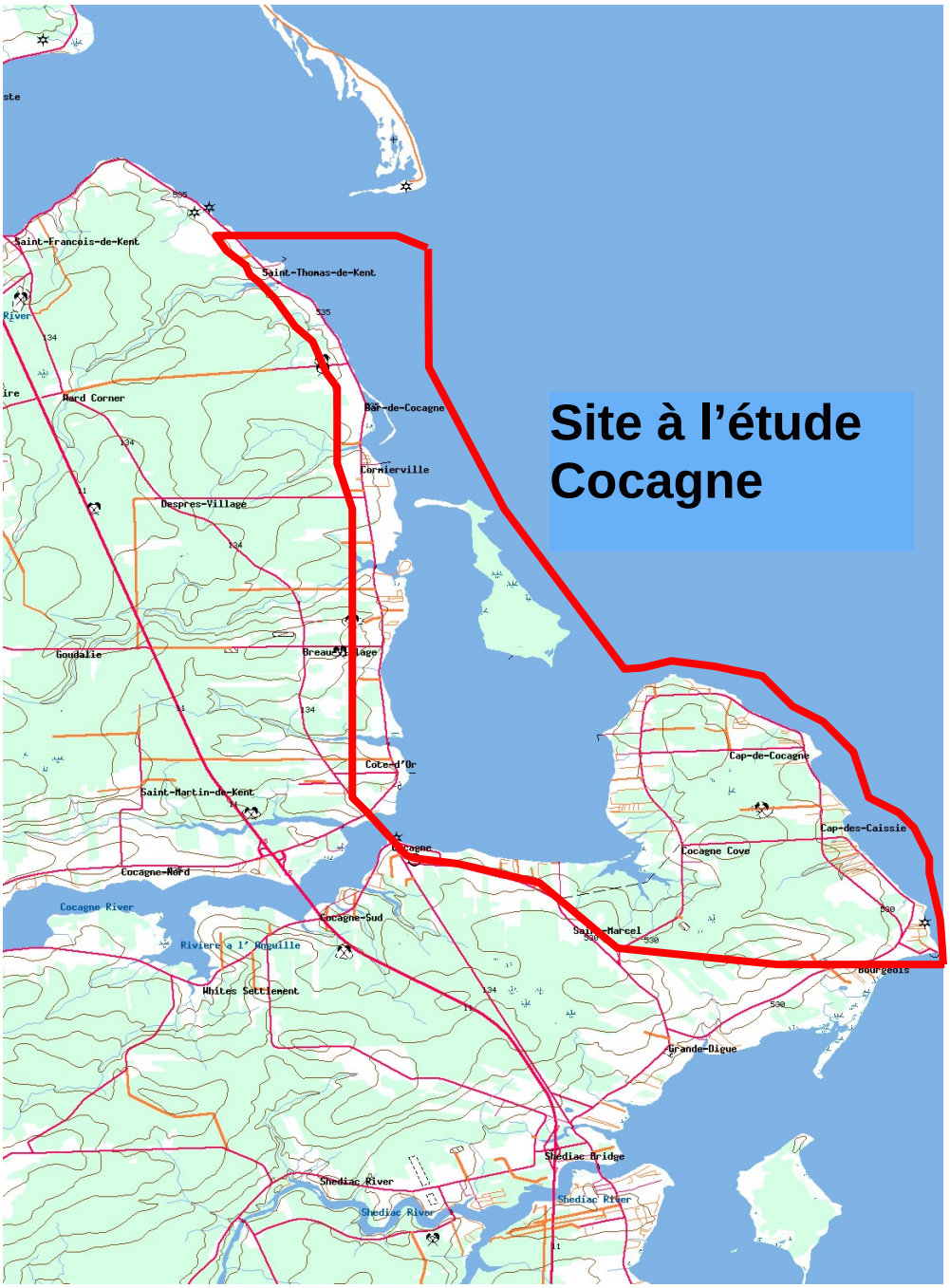


Figure 7. Limites approximatives (en rouge) du site à l'étude de Cocagne dans le sud-est du Nouveau-Brunswick.

4.6.3.2.2 Méthodes de cartographie

On trouvera dans Hanson (2006) et à la section 4.5 une description détaillée des méthodes de cartographie. Nous avons balayé 940 photographies aériennes en tout, à une résolution appropriée pour que chaque pixel corresponde à des unités de terrain d'environ 0,25 m^2. Nous avons utilisé le nombre minimal de dix points de canevas pour le redressement d'une photographie aérienne. Nous nous sommes servis des orthophotographies numériques 1996 du Nouveau-Brunswick (orthophotographies numérisées et géoréférencées) pour le redressement de toutes les photographies aériennes balayées. Une fois les cartes obtenues pour toutes les années où on a procédé à des photographies aériennes (1944, 1953, 1963, 1971, 1973, 1982, 1996 et 2001 selon le site à l'étude), nous avons superposé ces cartes géoréférencées pour produire la carte pluriannuelle définitive.

Nous avons déterminé la topologie des entités côtières selon ce qui pouvait être détecté sur toutes les photographies aériennes, y compris les anciennes photographies en noir et blanc. Dans les marais salés végétalisés, on trouvait les espèces végétales suivantes : *Spartina alterniflora*, *Spartina patens* et *Juncus gerardii*. Le marais inférieur (*Spartina alterniflora)* n'a pas été séparé du marais moyen (*Spartina patens)* parce qu'il était difficile de distinguer les espèces végétales sur les clichés aériens historiques en noir et blanc, sans validation sur le terrain. Le marais de transition des terres hautes abritait d'autres communautés de plantes adaptées aux milieux salés et saumâtres là où le marais était plus haut. Cette flore comprenait les espèces suivantes : *Juncus balticus*, *Carex palacea* et *Spartina pectinata*. La superficie des marais salés couvrait toutes les surfaces d'eau et de marais salés végétalisés.

Les marais et les étangs barachois se forment entre les entités du rivage, comme les dunes et les terres hautes. Les dunes réduisent la fréquence des inondations d'eau salée à ces endroits. L'ensemble des milieux humides côtiers comprend des marais salés, des marais saumâtres de transition et des barachois.

4.6.3.3 Résultats

Les deux régions non bâties comptaient moins de marais salés en 2001 que dans les années antérieures. En 2001 à Cap-Jourimain (tableau 3), les marais salés végétalisés avaient diminué de 28 % par rapport à 1944 (de 175 ha à 156 ha). Ce changement est partiellement attribuable à la construction à travers le marais d'une plate-forme routière, qui a physiquement détruit 10 ha de terrain marécageux et modifié les caractéristiques hydrologiques. La superficie d'eau libre a également augmenté durant cette période.

En 2001 à Shemogue, les marais salés végétalisés avaient diminué de 5 % (15 ha) par rapport à 1944 (tableau 4). Durant la même période, la quantité d'eau libre des marais salés a augmenté de 18 % (9 ha). De 1944 à 1971, le nombre de cuvettes avait augmenté et, en 2001, elles avaient fusionné pour former de grands étangs. On entretenait des fossés dans les marais en 1944, mais ce n'était plus le cas en 1971. La superficie totale des fossés est passée de 1,1 ha à 0,8 ha et, en 2001, il ne restait plus que 0,42 ha de fossés de drainage encore visibles dans les marais salés de ce site à l'étude. La perte de milieux humides côtiers due au remplissage a été inférieure à 0,5 ha. Des 141,7 ha de marais saumâtres de transition recensés en 1944, il n'en restait plus que 134,1 en 1971, et 134,1 en 2001 (tableau 4), ce qui représente une perte de 7 ha. La longueur des brise-mer est passée de 0 m en 1944 à 1 084 m en 2001.

À l'Aboiteau, la superficie des marais salés végétalisés atteignait 85 ha en 1944 et seulement 62 ha en 2001 (tableau 5), soit une réduction de 27 % (23 ha). Pour ce qui est des marais saumâtres de transition, la superficie qu'ils occupaient a diminué de 24% (30 ha), passant de 119 ha en 1944 à 104 ha en 1971 et à 91 ha en 2001. De 1944 à 2001, la diminution totale des milieux humides côtiers a été de 43 ha. Nous avons répertorié 19 ha de milieux humides côtiers remplis (principalement des marais saumâtres de transition) et 3,2 ha d'infrastructures d'appontement. Pour ce qui est des brise-mer, les chiffres sont passés de 454 m en 1944 à 8 324 m en 2001.

À Shediac, la superficie des marais salés végétalisés était de 93 ha en 1944 et de 74 ha en 2001 (tableau 6), soit une diminution de 21 % (19 ha). La superficie occupée par les marais saumâtres de transition a diminué de 32 % (30 ha), passant de 66 ha en 1944 à 58 ha en 1971 et à 45 ha en 2001, ce qui correspond à une diminution totale de 35 ha de milieux humides côtiers de 1944 à 2001. Nous avons répertorié 42 ha de remplissage (surtout de marais saumâtres de transition) et 0,8 ha d'infrastructures d'appontement.

À Cocagne, la superficie des marais salés végétalisés est passée de 53 ha en 1944 à 34 ha en 2001, ce qui représente une réduction de 36 % (tableau 7). Les marais saumâtres de transition sont passés de 51 ha à 42 ha, soit une diminution de 17 %. Durant la même période, 8,9 ha de milieux humides ont été comblés, et 5,7 ha d'infrastructures d'appontement se sont ajoutés. Les chiffres relatifs aux brise-mer sont passés de 100 m en 1944 à 13 287 m en 2001.

Tableau 3. Superficie (ha) occupée par chaque type d'habitat côtier au site à l'étude de Cap-Jourimain en 1944, 1971 et 2001.

	Année	1944	1971	2001
	Type d'habitat (ha)	Superficie (ha)		
1	**Marais salés**	**311,6**	**236,4**	**223,5**
1.a	Marais salé végétalisé	174,5	151,7	156,4
1.b	Eau	137,1	84,7	67,1
1.b.1	Eau libre fermée	3,7	7,2	6,1
1.b.2	Eau libre partiellement fermée	132,9	77,0	60,9
1.b.3	Chenal de marée	0,5	0,0	0,0
1.b.4	Fossé	0,1	0,4	0,1
1.c	Dépôt de sable	0,0	0,0	0,0
2	**Marais saumâtres de transition**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
3	**Barachois**	**20,7**	**89,6**	**86,2**
3.a	Marais végétalisé	20,7	31,0	30,3
3.b	Lagune ou cuvette	0,0	58,6	55,9
3.c	Crique	0,0	0,0	0,0
3.d	Fossé de drainage	0,0	0,0	0,0
Note	Superficie totale des milieux humides côtiers (salé + saumâtre + barachois)	332,3	326,0	309,7
4	**Infrastructures humaines**	**1,1**	**10,9**	**10,8**

	Année	1944	1971	2001
	Type d'habitat (ha)	Superficie (ha)		
4.a	Appontement	0,0	0,0	0,0
4.b	Pont-jetée et pont	0,0	10,3	10,3
4.c	Remplissage des marais	0,0	0,0	0,0
4.d	Bâtiment	0,0	0,0	0,0
4.e	Brise-mer ou ouvrage longitudinal	0,0	0,0	0,0
4.f	Route à travers le marais	1,1	0,6	0,6
4.g	**Longueur d'ouvrage longitudinal (m)**	**0,0**	**0,0**	**0,0**

Tableau 4. Superficie (ha) occupée par les milieux humides côtiers et exploitation du sol au site à l'étude de Shemogue en 1944, 1971 et 2001.

	Année	1944	1971	2001
	Type d'habitat (ha)	Superficie (ha)		
1	**Marais salés**	**336,4**	**339,2**	**339,2**
1.a	Marais salé végétalisé	285,2	282,7	282,7
1.b	Eau	48,4	55,1	55,1
1.b.1	Eau libre fermée	34,2	42,4	42,4
1.b.2	Eau libre partiellement fermée	7,3	6,9	6,9
1.b.3	Chenal de marée	5,7	4,9	4,9
1.b.4	Fossé	1,1	0,8	0,8
1.c	Dépôt de sable	2,8	1,4	1,4
2	**Marais saumâtres de transition**	**141,7**	**134,1**	**134,1**
3	**Barachois**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
3.a	Marais végétalisé	0,0	0,0	0,0
3.b	Lagune ou cuvette	0,0	0,0	0,0
3.c	Crique	0,0	0,0	0,0
3.d	Fossé de drainage	0,0	0,0	0,0
Note	Superficie totale des milieux humides côtiers (salé + saumâtre + barachois)	478,1	473,3	473,3
4	**Infrastructures humaines**	**0,8**	**2,4**	**2,4**
4.a	Appontement	0,0	0,3	0,3
4.b	Pont-jetée et pont	0,8	2,2	2,2
4.c	Remplissage des marais	0,0	0,0	0,0
4.d	Bâtiment	0,0	0,0	0,0
4.e	Brise-mer ou ouvrage longitudinal	0,0	0,0	0,0
4.f	Route à travers le marais	0,0	0,0	0,0
4.g	**Longueur d'ouvrage longitudinal (m)**	**0,0**	**32,0**	**1 084,0**

Tableau 5. Superficie (ha) occupée par les milieux humides côtiers et utilisation du sol au site à l'étude de l'Aboiteau en 1944, 1971 et 2001.

	Année	1944	1971	2001
	Type d'habitat (ha)	Superficie (ha)		
1	**Marais salés**	**99,6**	**85,0**	**72,9**
1.a	Marais salé végétalisé	84,9	73,2	61,8
1.b	Eau	14,3	10,6	10,3
1.b.1	Eau libre fermée	6,9	4,6	3,9
1.b.2	Eau libre partiellement fermée	5,3	4,2	5,3
1.b.3	Chenal de marée	0,9	0,5	0,5
1.b.4	Fossé	1,1	1,3	0,6
1.c	Dépôt de sable	0,5	1,3	0,8
2	**Marais saumâtres de transition**	**119,2**	**104,0**	**90,6**
3	**Barachois**	**47,1**	**49,5**	**44,7**
3.a	Marais végétalisé	40,7	37,7	37,7
3.b	Lagune ou cuvette	5,5	11,4	6,9
3.c	Crique	0,6	0,1	0,2
3.d	Fossé de drainage	0,3	0,4	0,0
Note	Superficie totale des milieux humides côtiers (salé + saumâtre + barachois)	266,0	238,5	212,9
4	**Infrastructures humaines**	**4,4**	**8,8**	**27,6**
4.a	Appontement	0,3	1,4	3,2
4.b	Pont-jetée et pont	1,1	2,0	2,5
4.c	Remplissage des marais	2,8	5,2	19,2
4.d	Bâtiment	0,1	0,1	0,0
4.e	Brise-mer ou ouvrage longitudinal	0,1	0,0	2,6
4.f	Route à travers le marais	0,0	0,0	0,0
4.g	**Longueur d'ouvrage longitudinal (m)**	**454,0**	**868,0**	**8 324,0**

Tableau 6. Superficie (ha) occupée par les milieux humides côtiers et utilisation du sol au site à l'étude de la baie de Shediac en 1944, 1971 et 2001.

	Année	1944	1971	2001
	Type d'habitat (ha)	Superficie (ha)		
1	**Marais salés**	**108,9**	**109,5**	**83,0**
1.a	Marais salé végétalisé	93,3	95,8	74,0
1.b	Eau	15,6	13,7	9,0
1.b.1	Eau libre fermée	10,0	8,1	7,2
1.b.2	Eau libre partiellement fermée	5,2	3,4	1,0
1.b.3	Chenal de marée	0,0	0,0	0,0
1.b.4	Fossé	0,4	2,2	0,8

	Année	1944	1971	2001
	Type d'habitat (ha)	Superficie (ha)		
1.c	Dépôt de sable	0,0	0,0	0,0
2	**Marais saumâtres de transition**	**65,8**	**58,3**	**45,0**
3	**Barachois**	**1,9**	**11,2**	**13,4**
3.a	Marais végétalisé	0,9	8,9	11,6
3.b	Lagune ou cuvette	1,0	2,3	1,8
3.c	Crique	0,0	0,0	0,0
3.d	Fossé de drainage	0,0	0,0	0,0
Note	Superficie totale des milieux humides côtiers (salé + saumâtre + barachois)	176,5	179,0	141,4
4	**Infrastructures humaines**	**6,0**	**19,9**	**46,9**
4.a	Appontement	0,0	0,1	0,8
4.b	Pont-jetée et pont	0,6	0,7	0,3
4.c	Remplissage des marais	3,2	18,6	45,5
4.d	Bâtiment	0,0	0,0	0,0
4.e	Brise-mer ou ouvrage longitudinal	0,3	0,5	0,1
4.f	Route à travers le marais	0,8	0,0	0,0
4.g	**Longueur d'ouvrage longitudinal (m)**	**365,0**	**1 079,0**	**9 408,0**

Tableau 7. Superficie (ha) occupée par les milieux humides côtiers et utilisation du sol au site à l'étude de Cocagne en 1973 et 2001.

	Année	1944	1973	2001
	Type d'habitat (ha)	Superficie (ha)		
1	**Marais salés**	**60,1**	**48,5**	**38,6**
1.a	Marais salé végétalisé	52,9	41,1	34,2
1.b	Eau	5,4	7,3	4,0
1.b.1	Eau libre fermée	3,3	4,8	3,0
1.b.2	Eau libre partiellement fermée	1,2	1,7	0,5
1.b.3	Chenal de marée	0,4	0,4	0,5
1.b.4	Fossé	0,5	0,3	0,1
1.c	Dépôt de sable	1,8	0,1	0,4
2	**Marais saumâtres de transition**	**50,6**	**49,6**	**42,2**
3	**Barachois**	**5,8**	**5,6**	**3,9**
3.a	Marais végétalisé	5,0	5,1	3,8
3.b	Lagune ou cuvette	0,7	0,3	0,1
3.c	Crique	0,0	0,0	0,0
3.d	Fossé de drainage	0,1	0,1	0,0
Note	Superficie totale des milieux humides côtiers (salé + saumâtre + barachois)	116,4	103,6	84,5
4	**Infrastructures humaines**	**2,6**	**4,4**	**21,2**

	Année	1944	1973	2001
	Type d'habitat (ha)	Superficie (ha)		
4.a	Appontement	0,6	1,6	5,7
4.b	Pont-jetée et pont	1,1	2,0	1,8
4.c	Remplissage des marais	0,0	0,1	8,9
4.d	Bâtiment	0,3	0,1	0,0
4.e	Brise-mer ou ouvrage longitudinal	0,0	0,2	4,8
4.f	Route à travers le marais	0,6	0,3	0,0
4.g	**Longueur d'ouvrage longitudinal (m)**	**100,0**	**593,0**	**13 287,0**

4.6.3.4 Sommaire et conclusions

Cette section présente les données d'une étude visant à quantifier les changements survenus dans la superficie des marais salés le long du détroit de Northumberland, dans le sud-est du Nouveau-Brunswick, de 1944 à 2001. Deux sites à l'étude (Cap-Jourimain et Shemogue) sont présentement recouverts en grande partie de marais salés, alors que les trois autres sites (Shediac, l'Aboiteau et Cocagne) comptent surtout des ensembles résidentiels. Tous les sites ont subi, à divers degré, le contrecoup de l'activité humaine et de l'élévation du niveau de la mer. Les activités humaines dans ces marais et la zone côtière empêchent d'évaluer l'impact des changements climatiques indépendamment des perturbations anthropiques directes.

Cap-Jourimain comptait moins de marais salés en 2001 qu'en 1963. Ce changement est attribuable, du moins en partie, à la construction d'une route d'accès au pont de la Confédération vers l'Île-du-Prince-Édouard en 1966. Les travaux de construction de la plate-forme ont mené à la disparition physique du marais salé, non seulement par le tracé de la route, mais également par la perte subséquente de marais salés consécutive aux changements de l'hydrologie. La construction de la plate-forme a entraîné la formation d'un grand étang d'eau saumâtre au nord-ouest de la route et réduit le prisme de marée de cet estuaire.

Ce sont les résultats obtenus au site à l'étude de Shemogue qui donnent l'idée la plus claire des changements que pourrait entraîner une élévation du niveau de la mer dans la région. Celle-ci a connu une élévation apparente (relative) du niveau de la mer de 25 à 32 cm au cours du siècle dernier, et les modèles climatiques laissent entrevoir une élévation beaucoup plus rapide dans les années à venir. De 1944 à 2001, on n'a observé aucune perturbation anthropique d'importance dans les marais salés du site à l'étude. Nous avons observé que la quantité d'eau libre des marais salés a augmenté durant cette période et que, les cuvettes étant plus grandes, elles ont fini par fusionner pour former de grands étangs. Cette séquence d'événements a été observée dans d'autres marais où le taux d'accrétion verticale est inférieur au taux d'élévation relative du niveau de la mer (Hartig *et al*., 2002; Erwin *et al*., 2006). L'interprétation visuelle de la carte pluriannuelle laisse également croire à une perte du rebord extérieur, du côté de la mer, des marais salés de ce site à l'étude. La ligne de démarcation entre le marais et les terres hautes ne semble pas avoir beaucoup bougé dans cette région à l'étude, et la superficie totale des marais de transition a diminué durant cette période, ce qui donne à penser que les milieux humides côtiers n'ont pas beaucoup reculé vers l'intérieur. Les

marais saumâtres de transition sont de toute première importance pour les passereaux qui nichent à terre, comme le bruant de Nelson (Hanson, 2004).

Des milieux humides côtiers ont disparu ou subi des changements dans tous les sites à l'étude et qui sont bâtis (l'Aboiteau, Shediac et Cocagne). Il s'agissait de marais salés végétalisés, de marais saumâtres de transition et parfois de barachois. Les cartes et les documents qui font état de l'augmentation des terrains comblés ou utilisés pour des routes, des ponts-jetées ou des appontements indiquent que cette perte d'habitat est attribuable à l'activité humaine. L'étendue de l'habitat perdu de 1944 à 1971 est mineure comparativement à celle de 1971 à 2001. Le nombre de permis de construire émis par les commissions d'aménagement locales et nos observations personnelles suggèrent d'autres pertes d'habitat au cours des années 2001 à 2005, attribuables au remplissage des marais et à la construction d'infrastructures humaines. Nos résultats préliminaires suggèrent une perte importante d'habitat côtier le long du détroit de Northumberland et donnent à penser que, si le niveau de la mer continue de monter, il pourrait s'ensuivre des pertes additionnelles.

4.6.3.5 Références

Bertness, M. D. 1999. The Ecology of Atlantic Shorelines. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts.

Erwin, R. M., D. Prosser, G. Sanders et D.R. Cahoone. Sous presse. High tides and rising seas: potential effects on estuarine birds. *In*: Terrestrial Vertebrates of Tidal Marshes: Evolution, Ecology, and Conservation. Studies in Avian Biology. Greenberg, R., J.E. Maldonado, S. Droege et M.V. McDonald (présenté)

Galbraith, H., R. Jones, R. Park, J. Clough, S. Herrod-Julius, B. Harrington et G. Page. 2002. Global climate change and sea level rise: potential losses of intertidal habitat for shorebirds. Waterbirds, 25,173-183.

Hanson, A.R. (dir. de publ.). 2006. Ecosystem impacts of sea-level rise and climate change on the coastal zone of south-eastern New Brunswick. Rapport technique n° 463. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada. 223 p.

Hanson, A.R. 2006. Breeding bird use of salt marsh habitat in the Maritime Provinces. Rapport technique n° 414. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada. 45 p.

Hanson, A.R, et. Shriver, W.G. 2006. Breeding birds of northeast salt marshes: habitat use and conservation. *In* Terrestrial Vertebrates of Tidal Marshes: Evolution, Ecology, and Conservation. Studies in Avian Biology XX. Greenberg, R., J.E. Maldonado, S. Droege et M.V. McDonald. S. (dir. de publ.).

Hartig, E., Gornitz, V., Kolker, A., Mushacke, F. et Fallon, D. 2002. Anthropogenic and climate change impacts on salt marshes of Jamaica Bay, New York City. Wetlands,

Nicholls, R.J., et J. Branson. 1998. Coastal resilience and planning for an uncertain future: an introduction. Geographical Journal, 164 (3), 255-258.

4.6.4 Modifications temporelles de l'habitat de plages et de dunes dans le sud-est du Nouveau-Brunswick de 1944 à 2001[27,28]

4.6.4.1 Introduction

En plus de l'activité humaine qui a un impact direct, les changements climatiques et l'élévation prévue du niveau de la mer, ainsi que la fréquence et la rigueur des tempêtes, risquent également d'avoir un impact sur l'habitat de plages et de dunes. Les prévisions les plus récentes d'élévation du niveau de la mer pour la période de 2000 à 2100 vont de 53 à 60 cm (±30 cm) sur la région à l'étude et elles sont plus élevées au sud et à l'est (voir section 4.1 de ce rapport). Les plages et les dunes sont des systèmes dynamiques et certaines tendances prolongées peuvent changer après une tempête. Modéliser les changements futurs de l'habitat de plages et de dunes peut donc se révéler un exercice très complexe et limité par l'accès aux données. Les plages et les dunes constituent un habitat important pour de nombreuses espèces sauvages, ainsi qu'une ressource considérable sur le plan socioéconomique, en raison des occasions de loisir qu'elles procurent.

Bien que nous ne disposions que de données limitées sur les taux d'érosion et de dépôt, ainsi que sur la modification que ces taux pourraient subir plus tard, cette analyse rétrospective nous éclaire sur la façon dont l'habitat de plages et de dunes réagira à de futures élévations du niveau de la mer. Le deuxième aspect important de cette étude est de documenter les modifications subies par les plages du fait de l'activité humaine, comme les carrières de sable et la construction d'infrastructures.

4.6.4.2 Méthodes

Nos méthodes sont semblables à celles décrites aux sections 4.5 et 4.6.3. Pour plus de détails, consultez Hanson 2006.

Nous avons déterminé la topologie des entités côtières selon ce qui pouvait être détecté sur toutes les photographies aériennes, y compris celles en noir et blanc.

Les photographies aériennes de Cap-Jourimain et de Shediac prises en 1944 étaient de qualité médiocre et n'ont pas permis de différencier les habitats de plages et de dunes en divers sous-types.

4.6.4.3 Résultats

Dans les deux régions relativement non bâties, on trouvait moins d'habitat de plages et de dunes en 2001 qu'en 1944. En 2001, Cap-Jourimain (tableau 8) comptait 22 % moins de plages et de dunes qu'en 1944 (18 ha par rapport à 23,1 ha). Shemogue (tableau 9)

---

[27] Auteurs : Stéphane O'Carroll, Dominique Bérubé, Alan Hanson, Donald Forbes, Jeff Ollerhead et Léa Olsen.

[28] Les auteurs désirent remercier M[me] Christina Tardiff, M[me] Angela Pitcher et M. François Léger du Mount Allison Coastal Wetland Institute pour leur aide au chapitre de la cartographie. Nous remercions tout particulièrement M. Serge Jolicoeur et le département de géographie de l'Université de Moncton pour le soutien logistique et technique. Ce projet a été financé par le Fonds d'action pour le changement climatique (Projet A591), le Fonds interministériel pour le rétablissement (Subventions 180 et 414), Environnement Canada, Ressources naturelles Canada et le ministère des Ressources naturelles du Nouveau-Brunswick.

comptait 8 % moins de plages et de dunes en 2001 qu'en 1944 (51,6 ha par rapport à 56,1 ha). Ce résultat global s'explique par la perte de 26 % d'habitat de plages et de 2 % d'augmentation d'habitat de dunes.

Au site à l'étude de l'Aboiteau, la diminution totale d'habitat de plages et de dunes était de 12 % en 2001 par rapport à 1944 (tableau 10). La superficie occupée par les plages et les dunes était de 63,7 ha en 1944, 59 ha en 1971 et 56,6 ha en 2001. Au cours de cette période, la réduction d'habitat de plages a été plus importante que la réduction d'habitat de dunes (17 % comparativement à 5 %).

Au site à l'étude de Shediac, la perte d'habitat de plages et de dunes de 1944 à 1971 était de 32 % (tableau 11), avec une petite perte additionnelle de 1971 à 2001. En 1944, on y trouvait 52,5 ha d'habitat de plages et de dunes, mais il n'en restait plus que 35,7 en 1971.

À Cocagne, la superficie occupée par les plages et les dunes est passée de 48,7 ha qu'elle était en 1944 à 35,4 ha en 2001, ce qui représente une diminution de 27 % (tableau 12). La superficie de plages est passée de 27 ha à 16,4 ha, soit une diminution de 40 %. Au cours de cette même période, la superficie occupée par les dunes est passée de 21,7 ha à 19 ha, une diminution de 12 %.

Aux sites à l'étude de l'Aboiteau, Shediac et Cocagne, la proportion de littoral consolidé avait beaucoup augmenté en 2001 comparativement aux années antérieures (tableaux 8 à 12). En 2001, l'étendue de littoral consolidé était de 8 324 m à l'Aboiteau, de 9 408 m à Shediac et de 13 287 m à Cocagne.

Les cartes pluriannuelles de Cap-Jourimain (figures 8 à 10) et de Shediac (figures 11 à 13) laissent voir les changements subis à ces endroits quant à l'étendue et à la distribution de l'habitat côtier. Le tableau 13 rend compte de la topologie de ces cartes. On trouvera en annexe les cartes pluriannuelles de Shemogue, de l'Aboiteau et de Cocagne á la section 5, Annexe D.

Tableau 8. Superficie (ha) d'habitat côtier de plages et de dunes au site à l'étude de Cap-Jourimain en 1944, 1971 et 2001.

	Année	1944	1977	2001
	Type d'habitat		Super. (ha)	
3.a	Plages et dunes	22,5	18,5	17,9
3.b	Surfaces de sable	0,0	0,0	0,0
3.c	Brèches	0,0	0,0	0,0
3.d	Goulets	0,6	0,2	0,1
3	**Total pour plages et dunes**	**23,1**	**18,7**	**18,0**
	Longueur d'ouvrage longitudinal (m)	**0,0**	**0,0**	**0,0**

Tableau 9. Superficie (ha) d'habitat côtier de plages et de dunes au site à l'étude de Shemogue en 1944, 1971 et 2001.

	Année	1944	1977	2001
	Type d'habitat		Super. (ha)	
1	Habitat de plages	19,5	21,5	14,4
1.a	Plages de sable	13,7	18,6	13,2
1.b	Brèches d'avant-dune	0,9	0,0	0,2
1.c	Cônes de débordement	2,0	0,0	0,0
1.d	Surfaces sablonneuses des marais	2,8	1,4	0,3
1.e	Plages de galets	0,1	1,6	0,7
2	Habitat de dunes	36,6	38,2	37,2
2.a	Dunes actives et dunes mortes	36,5	38,1	37,2
2.b	Creux de déflation	0,1	0,1	0,0
2.c	Dunes naissantes	0,0	0,0	0,0
2.d	Dunes de sommet de falaise	0,0	0,0	0,0
3	**Total pour plages et dunes**	**56,1**	**59,7**	**51,6**
	Longueur d'ouvrage longitudinal (m)	**0,0**	**32,0**	**1 084,0**

Tableau 10. Superficie (ha) d'habitat côtier constitué par les plages et les dunes au site à l'étude de l'Aboiteau en 1944, 1971 et 2001.

	Année	1944	1977	2001
	Type d'habitat		Super. (ha)	
1	Habitat de plages	32,9	35,7	27,2
1.a	Plages de sable	28,3	31,6	26,2
1.b	Brèches d'avant-dune	1,4	1,8	0,1
1.c	Cônes de débordement	2,7	0,0	0,1
1.d	Surfaces sablonneuses des marais	0,5	1,3	0,8
1.e	Plages de galets	0,0	1,0	0,0

2	Habitat de dunes	30,8	23,3	29,4
2.a	Dunes actives et dunes mortes	30,8	22,6	29,4
2.b	Creux de déflation	0,0	0,7	0,0
2.c	Dunes naissantes	0,0	0,0	0,0
2.d	Dunes de sommet de falaise	0,0	0,0	0,0
3	**Total pour plages et dunes**	**63,7**	**59,0**	**56,6**
	Longueur d'ouvrage longitudinal (m)	**454,0**	**868,0**	**8 324,0**

Tableau 11. Superficie (ha) d'habitat côtier constitué par les plages et les dunes au site à l'étude de la baie Shediac en 1944, 1971 et 2001.

	Année	1944	1977	2001
	Type d'habitat		Super. (ha)	
3.a	Plages et dunes	40,6	35,7	34,9
3.b	Surfaces de sable	11,9	0,0	0,3
3.c	Brèches	0,0	0,0	0,0
3.d	Goulets	0,0	0,0	0,0
3	**Total pour plages et dunes**	**52,5**	**35,7**	**35,1**
	Longueur d'ouvrage longitudinal (m)	**365,0**	**1 079,0**	**9 408,0**

Tableau 12. Superficie (ha) d'habitat côtier constitué par les plages et les dunes au site à l'étude de Cocagne en 1973 et 2001.

	Année	1944	1977	2001
	Type d'habitat		Super. (ha)	
1	Habitat de plages	27,0	25,4	16,4
1.a	Plages de sable	22,8	23,3	13,7
1.b	Brèches d'avant-dune	1,2	0,4	0,0
1.c	Cônes de débordement	0,0	0,0	0,3
1.d	Surfaces sablonneuses des marais	1,8	0,1	0,4
1.e	Plages de galets	1,3	1,5	2,0
2	Habitat de dunes	21,7	21,7	19,0
2.a	Dunes actives et dunes mortes	21,1	20,3	17,8
2.b	Creux de déflation	0,0	0,0	0,0
2.c	Dunes naissantes	0,0	0,0	0,8
2.d	Dunes de sommet de falaise	0,6	1,5	0,3
	Total pour plages et dunes	**48,7**	**47,1**	**35,4**
	Longueur d'ouvrage longitudinal (m)	**100,0**	**593,0**	**13 287,0**

Tableau 13. Description de la topologie utilisée pour les cartes des figures 6 à 13.

Code d'entité	Brève description du relief cartographié
Entités cartographiées sous forme de polygones	
BAMARSH	Marais salé transformé en barachois saumâtre ou d'eau douce, situé derrière une flèche de sable; à l'abri de la marée. On en trouve dans la région de Grande-Digue et à l'ouest de Cap-Brûlé.
BREAKWATER	Structure linéaire composée de galets empilés ou de béton; fait typiquement partie d'une infrastructure d'appontement.
BRECHE	Trait de côte, brèche (érosion et destruction de l'avant-dune par l'activité marine).
BRIDGE	Pont.
CAUSEWAY	Infrastructure routière qui traverse un plan d'eau et fait obstacle au passage de l'eau de l'autre côté.
DRAIN	Système de drainage linéaire artificiel, le plus souvent dans un marais.
DUNE or DUNEX	Dune qui sert d'habitat, y compris dunes actives et dunes mortes.
ENTAILLE	Entaille anthropique dans la dune ou la crête de l'avant-dune (passage d'accès à pied à une plage, sentier de véhicules hors route, etc.).
ETIER	Étier, directement relié à la mer et soumis aux fluctuations de la marée.
GALETS	Trait de côte, plage de galets et de pierres.
GOULET	Passe (canal par lequel l'eau circule entre la mer et l'intérieur des terres).
INFILLINGW	Partie d'une infrastructure d'appontement où la rive ou des entités côtières autres qu'un marais ont été comblées.
JETTY	Structure anthropique avançant dans l'eau perpendiculairement à la rive.
LAGUNE	Lagune; plan d'eau saumâtre peu profond situé derrière une plage et relié à la mer par une passe de marée.
MARAIS*	Marais salé*; zone où l'on trouve les espèces S. *Alterniflora et S. patens*; défini par la présence de nombreuses cuvettes et chenaux d'écoulement parallèles.
MAREART	Étang artificiel situé sur le rivage et contenu dans une structure fabriquée de main d'homme.
MARE_DOM	Région de marais salés composée de 60 % de marécages bas ou moyens et de 40 % de cuvettes semi-dégagées. Ce code a été attribué là où les cuvettes étaient trop nombreuses pour être numérisées individuellement, ou lorsque la résolution des photographies laissait à désirer ou que le trop grand nombre de cuvette ne permettait pas de les représenter avec précision.
MARE	Cuvette de marais salé (étang); plan d'eau situé dans le marais salé, généralement vers le milieu.
MAREDRY	Cuvette asséchée; uniquement visible sur la carte 2001 (ne peut être cartographiée qu'à partir des photographies en couleurs).
MARESO	Étang semi-dégagé, relié à une passe de marée. Situé dans le marais salé, couvre de vastes étendues dans les marais de Cap-Jourimain.
NAPPE	Zone de débordement récemment produite par une tempête, non encore végétalisée de nouveau.
SPECTINATA**	Zone où on retrouve l'espèce *Spartina pectinata*; marais saumâtre de transition**; zone définie par la présence de nombreux chenaux d'écoulement parallèles, typiquement dépourvue de cuvettes; située entre le marais salé et la lisière de la forêt.
SANDYSURF	Surface plane sablonneuse sur la côte, autre qu'une dune, une plage ou un chenal de débordement.
WETLAND	Un marais dont la composition en espèces végétales n'est pas clairement définie.
Linear features mapped as polylines on separate shapefiles	

Code d'entité	Brève description du relief cartographié
ProtecS01	Murs de protection; entité linéaire comprise sur la carte de Shediac 2001
ProtecS71	Murs de protection; entité linéaire comprise sur la carte de Shediac 1971
ProtecS44	Murs de protection; entité linéaire comprise sur la carte de Shediac 1944

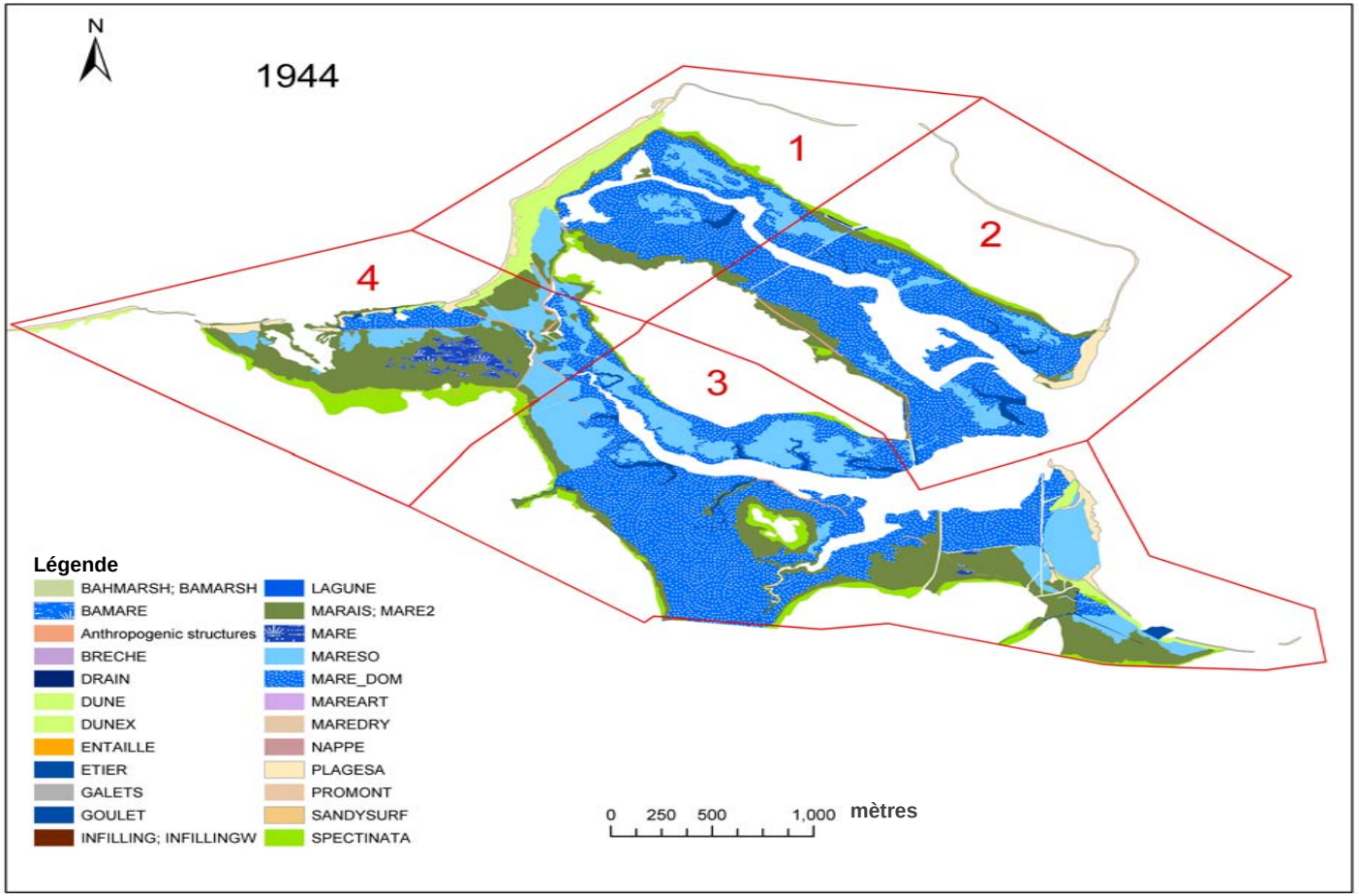


Figure 8. Carte des entités côtières à Cap-Jourimain en 1944. Voir au tableau 6 une description de la topologie.

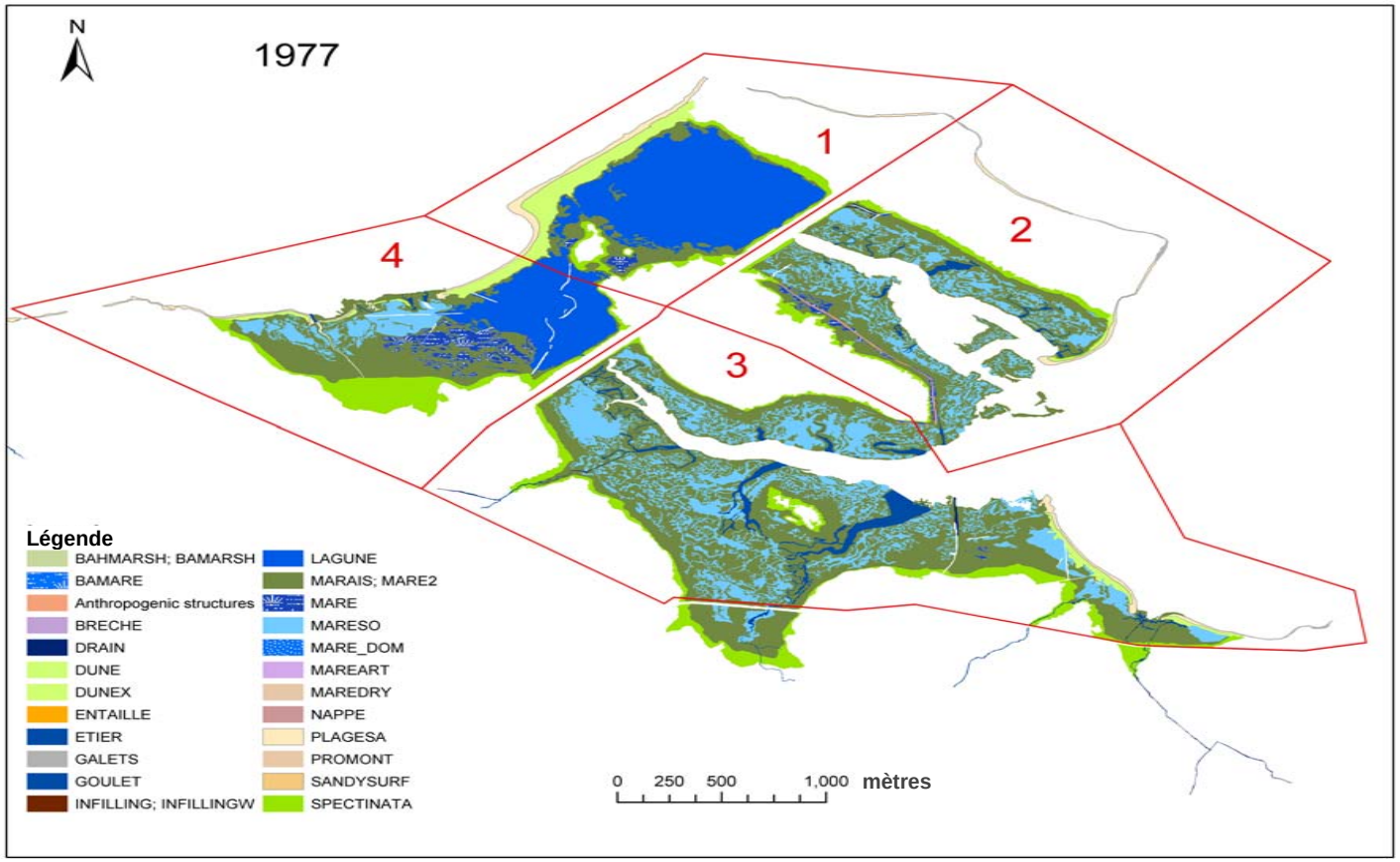


Figure 9. Carte des entités côtières à Cap-Jourimain en 1977. Voir au tableau 6 une description de la topologie.

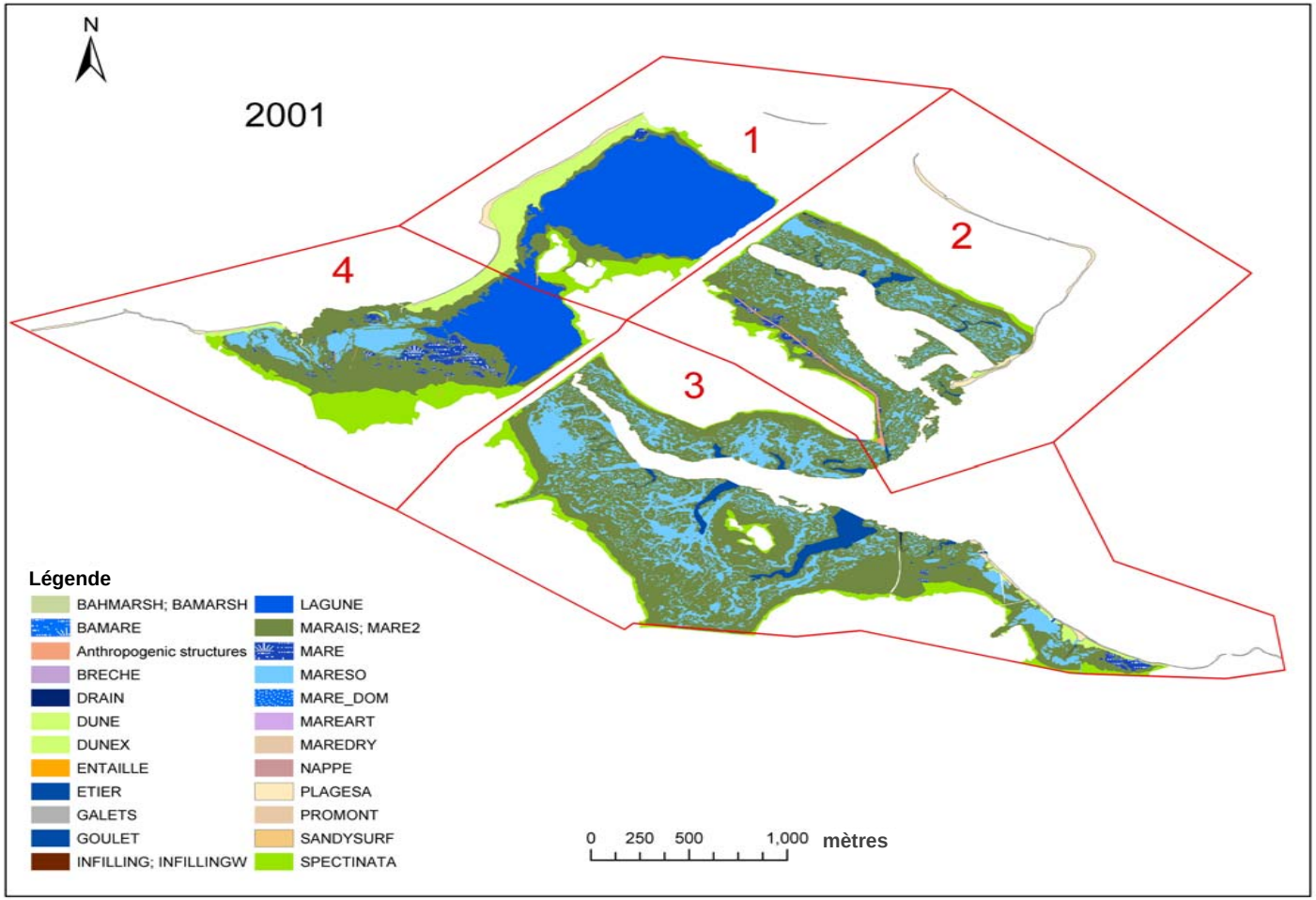


Figure 10. Carte des entités côtières à Cap-Jourimain en 2001. Voir au tableau 6 une description de la topologie.

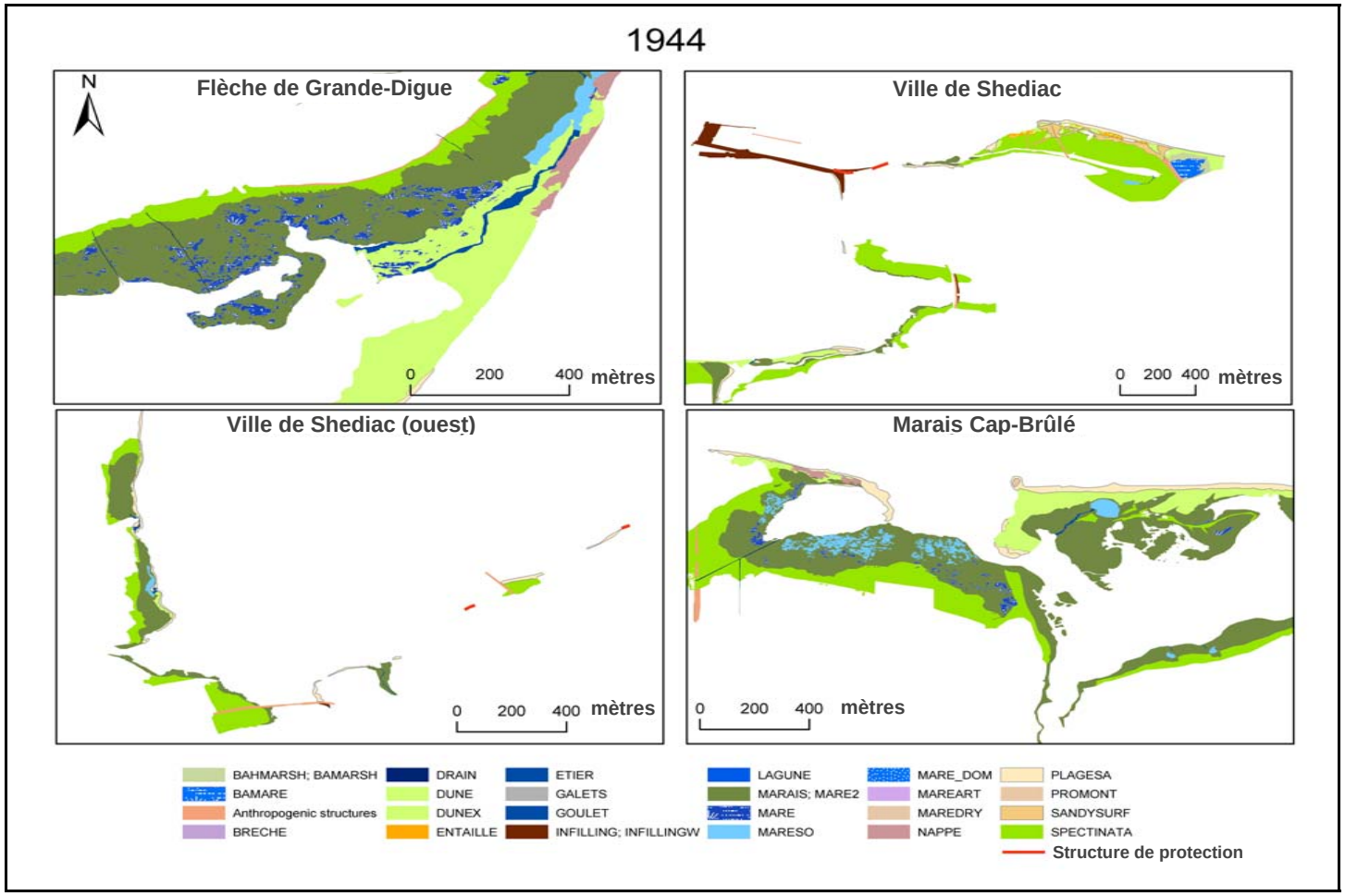


Figure 11. Carte des entités côtières à Shediac en 1944. Voir au tableau 6 une description de la topologie.

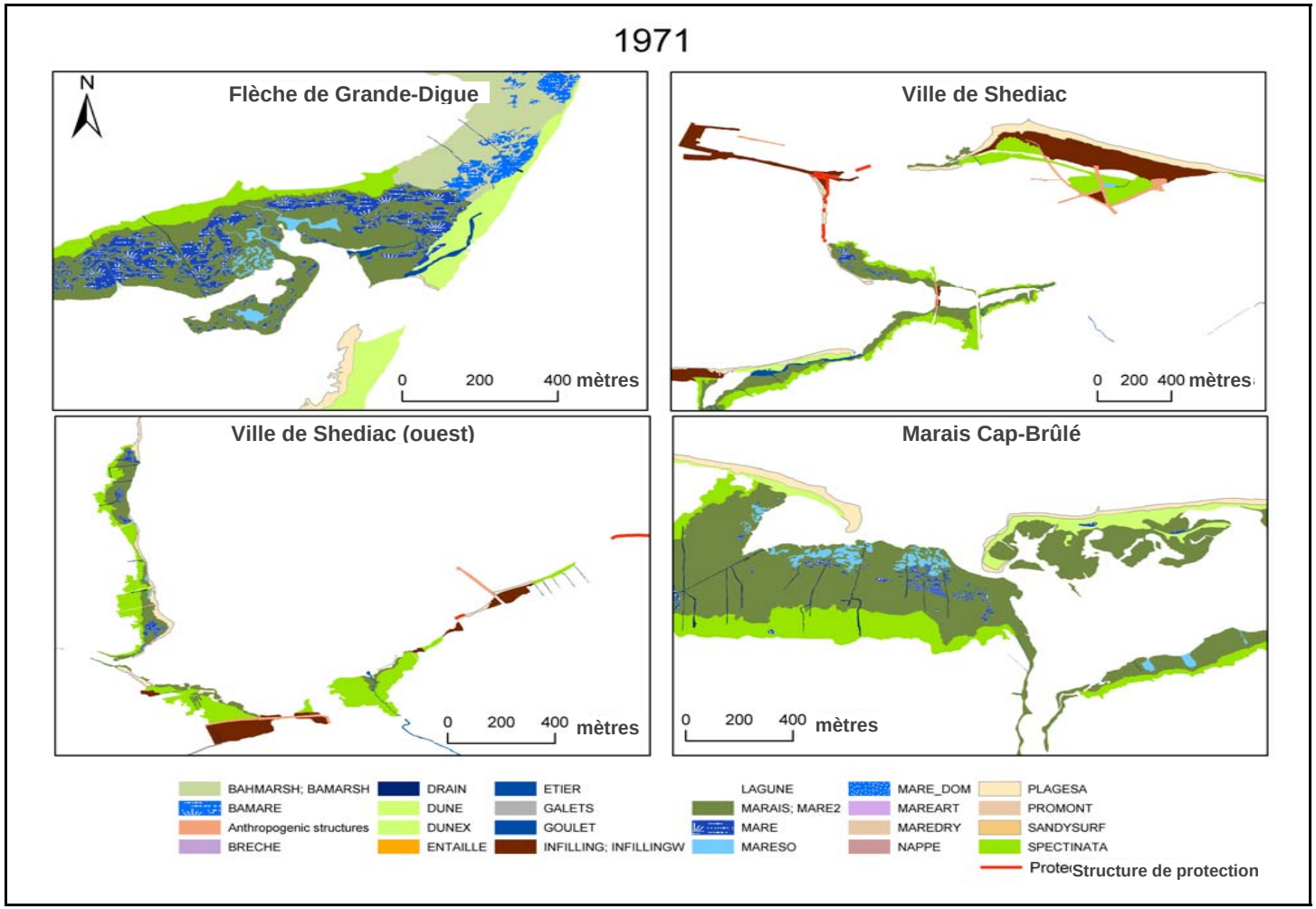


Figure 12. Carte des entités côtières à Shediac en 1971. Voir au tableau 6 une description de la topologie.

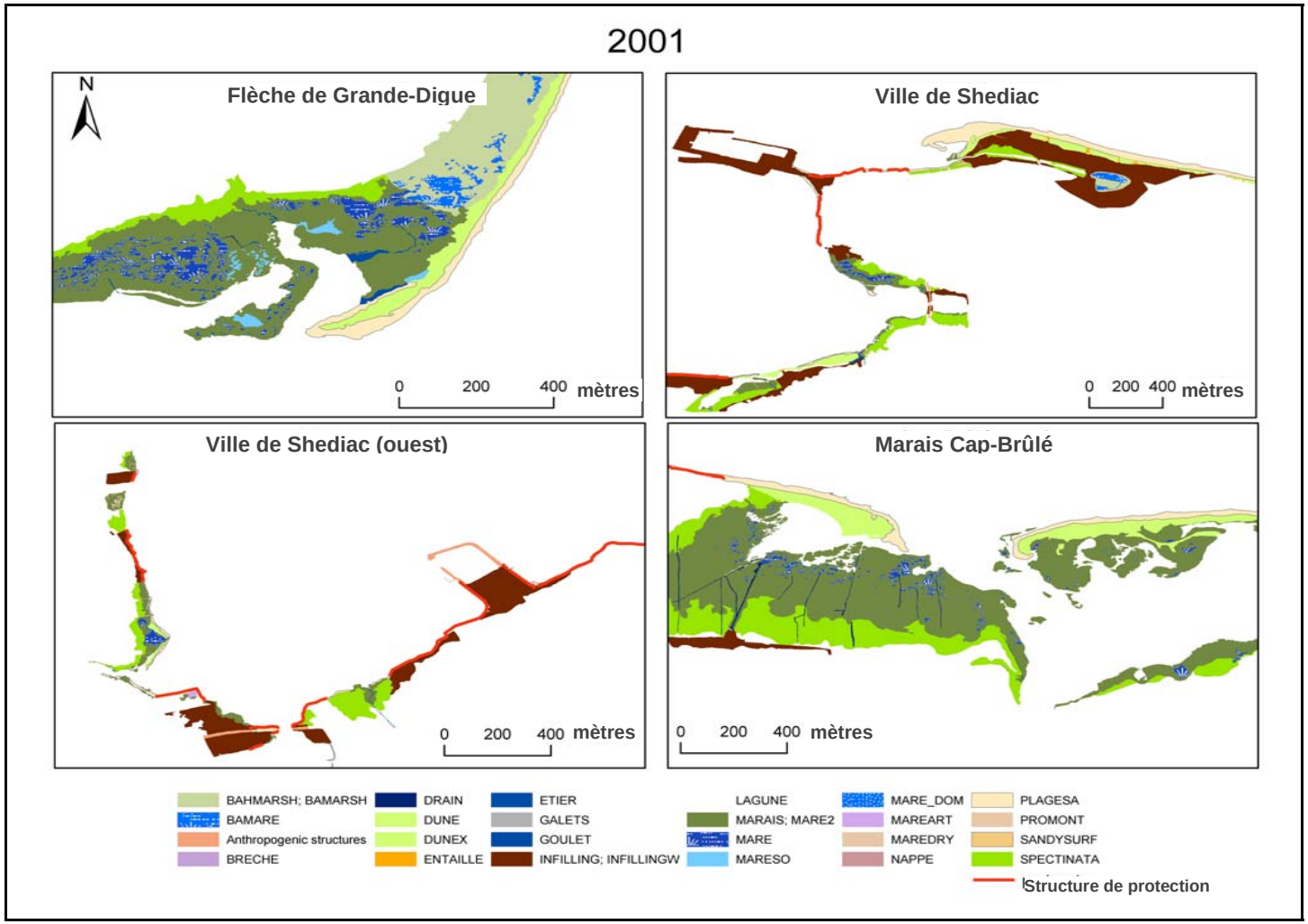


Figure 13. Carte des entités côtières à Shediac en 2001. Voir au tableau 6 une description de la topologie.

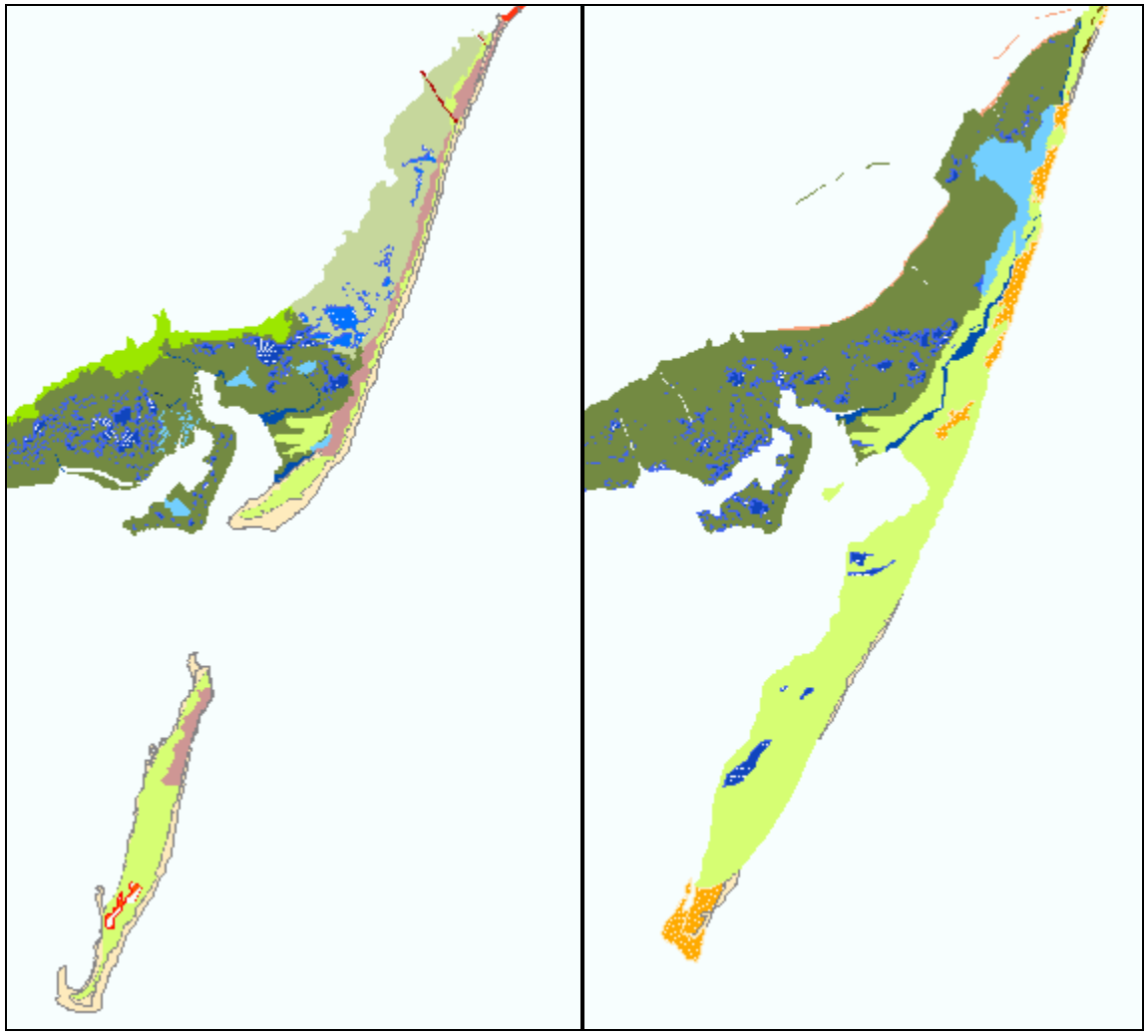


Figure 14. Flèche littorale de Grande-Digue en 1944 et en 2001. Voir au tableau 6 une description de la topologie.

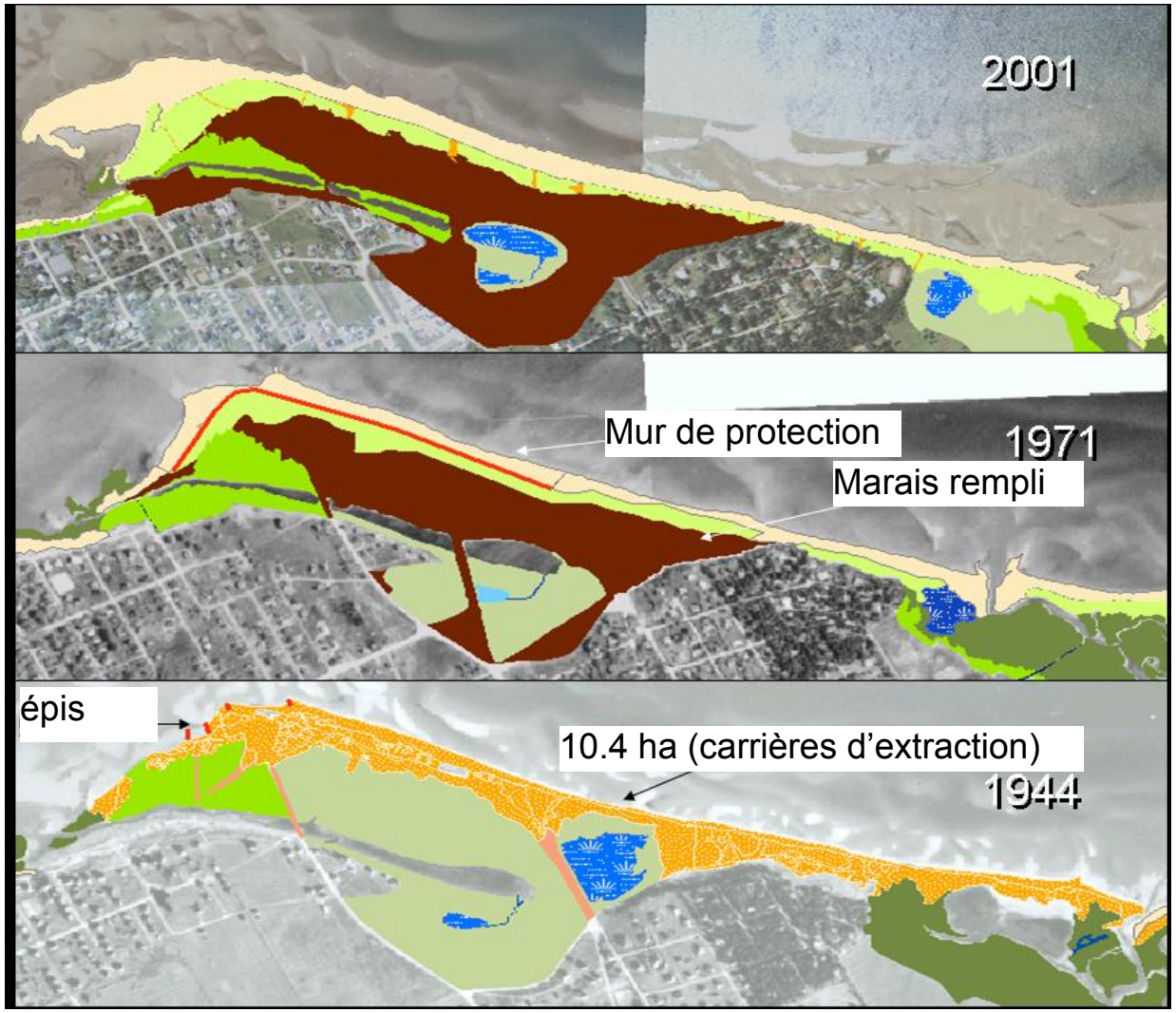


Figure 15. Région de la plage Parlee en 1944 et en 2001. Voir au tableau 6 une description de la topologie.

4.6.4.4 Sommaire et conclusions

À Cap-Jourimain, l'habitat de plages avait diminué en 2001 par rapport à 1944. Ce changement peut être partiellement attribuable à la construction de la route d'accès au pont de la Confédération vers l'Île-du-Prince-Édouard en 1966. La plate-forme a entraîné la formation d'un grand étang saumâtre au nord-ouest de la route et a réduit le prisme de marée de cet estuaire. L'impact de cette construction sur la dynamique des sédiments est encore inconnu. L'habitat de plages a considérablement diminué dans la partie est des sections 2 et 3.

Le site à l'étude de Shemogue a perdu 5 ha d'habitat de plages entre 1944 et 2001, mais l'habitat de dunes y est demeuré relativement constant. Selon Bérubé (section 4.5), ce site a subi une importante variation décennale de l'emplacement et de la forme des plages, celles-ci augmentant à certains endroits et diminuant à d'autres.

En tout, le site de Shediac a perdu 17,4 ha de plages. Toutefois, les cartes de Shediac révèlent une importante variation temporelle des tendances des plages et des dunes d'un endroit à un autre (figures 11 à 13). La carte de la flèche littorale Grande-Digue révèle une diminution de l'habitat de plages et de dunes de 1944 à 1971 (tableau 11, figure 14). Or, on a prélevé beaucoup de sable à cet endroit. C'est probablement cette extraction de sable, couplée avec les tempêtes, qui a entraîné la formation d'une brèche dans la flèche de Grande-Digue. Les carrières de sable ont été réglementées en 1954 (*Sand Removal Act*) et en 1968 (*Loi sur l'exploitation des carrières*). Toutefois, on a prélevé 17 000 m^3 de sable de plus, de 1968 à 1971, à la barre de Grande-Digue. L'extraction du sable a probablement perturbé de nombreuses plages. En 1971, l'activité économique de la région et la demande pour la fabrication de granulats s'étaient accélérées au point où toutes les plages du détroit de Northumberland avaient été dégarnies, à l'exception des plages Cap-Jourimain et Grant, et de la barre de Bouctouche (Airphoto Analysis Associates, 1975).

Le programme de rechargement de la plage Parlee (voir section 4.5), qui a consisté à transporter la matière sablonneuse de la zone intertidale à la plage (figure 15), a influé sur les tendances au site de la ville de Shediac. On a ainsi beaucoup augmenté l'habitat de plages dans cette région, et réduit l'importance de la perte nette d'habitat de plages et de dunes à d'autres parties de la zone à l'étude (tableau 4).

La tendance dans la zone ouest de la ville de Shediac a été de consolider le littoral (figures 11 - 13). Une grande partie de la région à l'étude a vu s'ériger des structures et des infrastructures de lutte contre l'érosion le long du rivage. La technique qui consiste à déposer de gros rochers ou des blocs de béton le long du rivage, ou encore à y construire des murs, a contribué à réduire la surface d'habitat pour les oiseaux nichant dans des cavités comme l'hirondelle de rivage et le martin-pêcheur d'Amérique. L'installation inadéquate de ces murs de rocs destinés à lutter contre l'érosion a souvent eu pour résultat de couvrir de grandes distances de plage de rochers. Pour ce qui est de la pointe distale de la flèche du marais Cap-Brûlé, elle s'est agrandie avec le temps.

À Cocagne, la surface occupée par les plages a connu une diminution de 10,6 ha, la plupart du temps en raison de la perte d'habitat de plages sur l'île et la barre de Cocagne. Les changements subis par ces entités côtières concordent avec l'élévation du niveau de la mer et l'impact des tempêtes.

Les gains physiques de superficie de dunes et de plages, en particulier par les programmes de rechargement, n'équivalent pas nécessairement à un gain en habitats de qualité pour la faune. C'est avec prudence qu'il faut tenter de généraliser à grande échelle l'analyse de l'habitat faunique de plages et de dunes à partir des photographies aériennes, car il est difficile de quantifier l'impact des activités humaines sur ces habitats.

Tous les sites ont été touchés à divers degrés par l'activité humaine et l'élévation du niveau de la mer. Les activités humaines de la zone côtière nous empêchent d'évaluer l'impact des changements climatiques indépendamment des perturbations anthropiques directes.

Pour diverses raisons, dont certaines associées à l'élévation du niveau de la mer, nous avons observé dans la zone à l'étude une nette diminution de la surface occupée par les plages et les dunes de 1944 à 2001. La diversité des changements survenus alors dans la zone à l'étude met en évidence l'importance des processus locaux d'accrétion et d'érosion, ainsi que celle des tempêtes et de l'activité humaine locale. Si on veut prédire avec précision quel impact auront les futurs changements climatiques et l'élévation du niveau de la mer sur la surface d'habitat de plages et de dunes, il nous faut mieux connaître les processus physiques qui exercent un effet sur la formation et la persistance des plages, l'effet exercé sur ces processus par l'élévation du niveau de la mer et les changements climatiques, et les conséquences de l'activité humaine sur ces plages et ces dunes. Nous pouvons obtenir ces renseignements itérativement, et mettre au point des solutions de gestion en conséquence. L'impact de l'élévation du niveau de la mer et des changements climatiques se fera sentir sur une plus longue période que ne le sera l'effet des tempêtes ou de l'activité humaine, qui peuvent avoir un effet immédiat sur les plages et les dunes. Comme c'est le cas de bien d'autres ressources qui risquent d'être touchées par l'élévation de la mer et le changement climatique, on ne peut gérer ces risques isolément des autres. Du point de vue de l'habitat faunique, une gestion prudente veillera à prévenir une détérioration physique et des perturbations encore plus importantes des actuels habitats de plages et de dunes.

4.6.4.5 Références

Airphoto Analysis Associates. 1975. Beach Resources: Eastern New Brunswick. Toronto. 205 p.

Hanson, A.R. (dir. de publ.). 2006. Ecosystem impacts of sea-level rise and climate change on the coastal zone of south-eastern New Brunswick. Rapport technique n° 463. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada. 223 p..

4.6.5 Impact de l'élévation du niveau de la mer sur la flore des marais salés[18,19]

4.6.5.1 Introduction

L'un des aspects les plus frappants du milieu des marais salés est la zonation verticale de la végétation, visible à la fois sur le terrain et sur les photographies aériennes. Ce trait distinctif est bien connu et a fait l'objet de nombreuses études (Bertness, 1991; Sanchez et al., 1996; Zedler et al., 1999; Sanderson et al., 2001; Bockelmann et al., 2002; Ursino et al., 2004; Pennings et al., 2005; Silvestri et al., 2005). Il y a toutefois eu peu d'études de ce phénomène sur le littoral des Maritimes. Cette étude a pour objectif d'examiner la relation qui existe entre la zonation des halophytes dans les marais salés du détroit de Northumberland et dans la baie de Fundy et l'influence de l'élévation du terrain sur ces configurations spatiales. Si nous comprenons mieux ce phénomène dans les conditions actuelles de niveau de la mer et de régimes des marées, nous comprendrons mieux l'effet de l'élévation du niveau de la mer sur la flore des marais salés. La comparaison des résultats pour deux rivages et deux régimes de marées nous éclaire sur le rôle du niveau moyen de la mer et des marées extrêmes sur la zonation de la flore des marais salés. En plus de l'élévation du terrain, nous avons examiné la distribution des espèces halophytes en tant que fonction des niveaux de marée.

4.6.5.2 Méthodes

4.6.5.2.1 Zones à l'étude

Cette étude porte sur deux littoraux très différents qui, bien qu'ils ne soient séparés que par un isthme de 24 km à l'endroit le plus étroit, sont très différents sur le plan des marées et des processus côtiers. La baie de Fundy est un plan d'eau très dynamique avec des marées pouvant aller jusqu'à plus de 15 mètres. Le détroit de Northumberland se caractérise par de petites marées, inférieures à 2 mètres. Les deux zones à l'étude suivent des cycles de marée semi-diurne. On trouvera dans Hanson (2006) une description plus détaillée des marais soumis à l'action des marées dans ces zones, ainsi que des méthodes utilisées.

4.6.5.2.2 Relevé des communautés végétales

Du mois de juillet au mois de septembre 2004, nous avons étudié en tout douze marais salés. Nous avons effectué des levés GPS et des relevés de la végétation à neuf sites du détroit de Northumberland et trois sites de la baie de Fundy. Nous avons identifié les espèces de plantes vasculaires et estimé la proportion du terrain occupée par ces plantes sur la carte, dans un quadrat de 1 m^2, à 385 endroits. Les quadrats ont été

[18] Auteurs : Léa Olsen, Jeff Ollerhead et Alan Hanson

[19] Les auteurs remercient M. David Nourry (Université de Sherbrooke), qui a agi comme auxiliaire aux travaux sur le terrain pour ce projet, Dr Liette Vasseur, qui nous a aidés à élaborer un protocole de travail sur le terrain (Université Laurentienne) et M. Sean Blaney, Mme Cindy Spicer (Centre de données sur la conservation du Canada atlantique) et M. David Mazerolle (Université de Moncton) pour leur aide dans l'identification des végétaux. Les auteurs doivent également beaucoup à Mme Kelly Mazerolle, Mme Sarah Robinson (Université Saint Mary's), Mme Christina Tardif, M. Dany Tardiff, Mme Angela Pitcher (Université Mount Allison), Mme Lisa Léger, M. Kénel Délusca et M. Stéphane O'Caroll (Université de Moncton) pour leur aide sur le terrain et le traitement des données. Enfin, nous aimerions remercier le Fonds de fiducie du Nouveau-Brunswick pour l'environnement, Environnement Canada, et le Programme des jeunes stagiaires d'Horizons Sciences du gouvernement fédéral pour leur soutien financier.

choisis dans le marais par échantillonnage aléatoire stratifié, de façon à échantillonner toutes les espèces végétales et toutes les élévations. L'élévation absolue du terrain de chaque parcelle a été mesurée et consignée au moyen d'un appareil Trimble Pro XR GPS à une résolution de ±5 cm sur la verticale et de ±3 cm sur l'horizontale.

4.6.5.2.3 Détermination des niveaux de marée

Les données PMSMM (pleine mer supérieure, marée moyenne) et PMSGM (pleine mer supérieure, grande marée) sont référencées au zéro des cartes (ou niveau moyen d'eau) et doivent donc être converties en niveau de référence géodésique (CGVD28), également équivalent au niveau moyen de la mer (NMM), afin qu'on puisse les comparer aux élévations mesurées par GPS. Pour ce faire, on a soustrait le niveau moyen de la mer des données PMSMM ou PMSGM (Webster *et al.*, 2004).

4.6.5.3 Résultats

La zonation des espèces végétales était très influencée par l'élévation dans les marais salés du détroit de Northumberland (figure 16). Les différences quantitatives d'élévation absolue de la surface du marais (et donc des aires de répartition des plantes) entre les marais de la baie de Fundy sont remarquables, et les différences entre les marais de la baie de Fundy et ceux du détroit de Northumberland sont frappantes (Hanson, 2006).

En tenant compte des différences d'amplitude des marées nous avons trouvé les végétaux beaucoup plus bas dans le détroit de Northumberland qu'à la baie de Fundy. *Spartina alterniflora*, une espèce qui occupe habituellement les parties basses d'un marais, se trouvait à des hauteurs moyennes dans la baie de Fundy, soit de 3 à 5,2 mètres, comparativement à 0,44 à 0,70 mètre dans le détroit de Northumberland. Nous avons observé des résultats semblables pour *Spartina pectinata,* qu'on retrouvait sur le bord des marais du côté de la terre, à une hauteur de 3,8 à 6,8 mètres dans la baie de Fundy et de 0,9 à 1,1 mètre le long du détroit. La faible amplitude des marées observée dans le détroit de Northumberland explique probablement ces chiffres peu élevés. Il faut souligner que les différences de distribution des espèces végétales selon l'élévation sont dues à des différences entre les niveaux de marée.

Référencer la hauteur des espèces végétales en fonction d'un niveau de marée spécifique permet de mieux comparer les sites, car ces valeurs deviennent relatives les unes par rapport aux autres. Les élévations référencées selon le niveau moyen de la mer (figure 17) comparées au niveau Pleine Mer Supérieure, Grande Marée (figure 18) pour *Spartina pectinata* (qui se retrouve au-dessus de ce niveau) démontrent l'importance du niveau de référence.

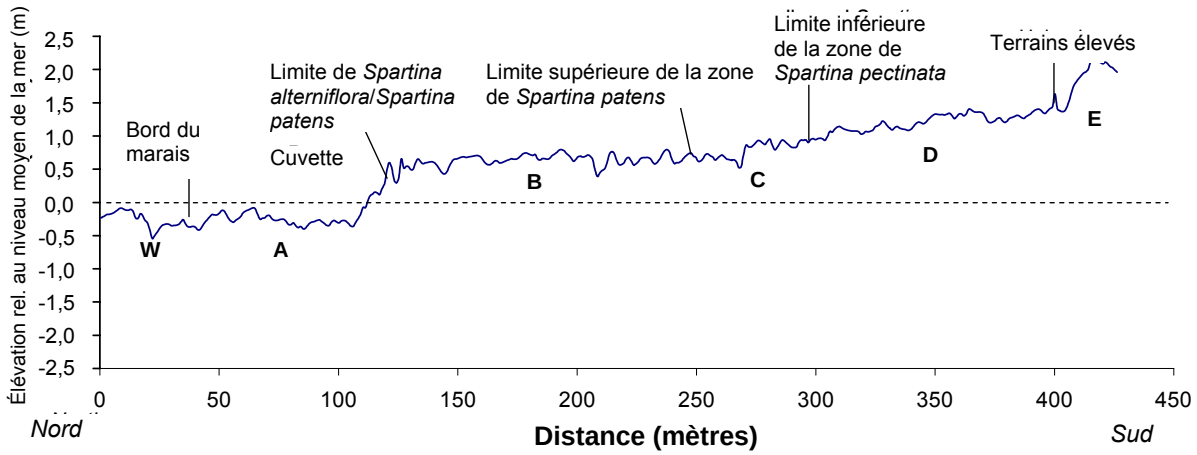


Figure 1. Vue transversale du transect C, Shediac (Cap-Brûlé), Nouveau-Brunswick

Légende : (W) Eau (A) Zone de *Spartina alterniflora* ou marais inférieur [*Spartina alterniflora, Salicornia europaea, Spergularia canadensis, Sueda maritima*] (B) Zone de *Spartina alterniflora* ou marais moyen [*Spartina patens, Atriplex, Plantago maritima, Glaux maritima, Triglochin maritima*] (C) Zone de transition [*Juncus gerardii, Juncus arcticus, Carex paleacea, Hierochloë odorata, Potentilla anserina*] (D) Zone de *Spartina alterniflora* ou marais supérieur [*Spartina pectinata, Festuca rubra, Solidago sempervirens, Calystegia sepium, Aster novi-belgii, Schoenoplectus tabernaemontani*], (E) Terrains élevés [*Phragmites australis, Typha latifolia, Impatiens capensis, Rosa virginiana*]. Les espèces sélectionnées ont été étudiées le long du transect et sont caractéristiques de leurs zones marécageuses respectives.

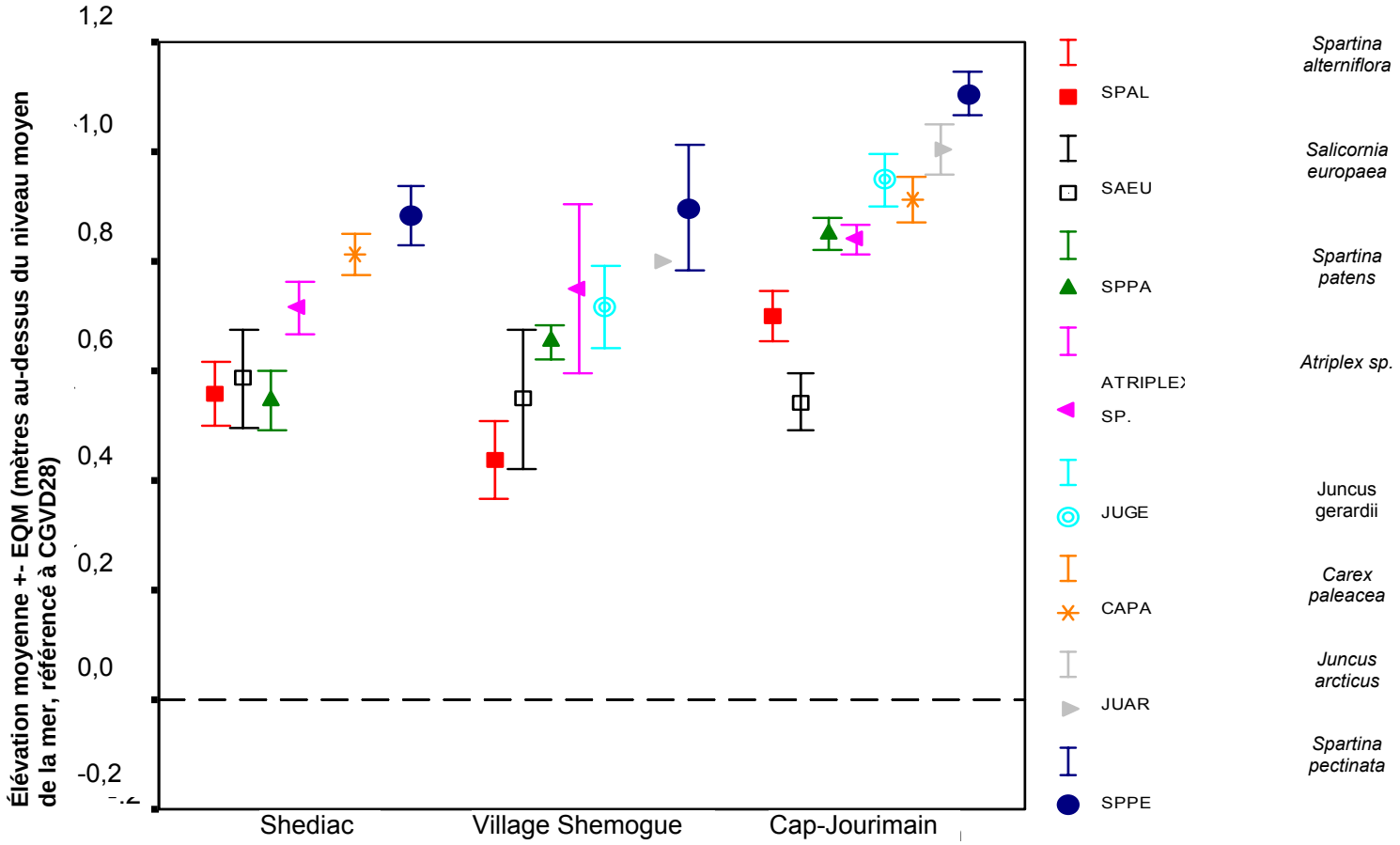


Figure 17. Élévations (± 1 écart quadratique moyen) d'espèces végétales halophytes dans les marais salés sélectionnés du détroit de Northumberland au Nouveau-Brunswick (Les ordonnées sont en mètres). Abréviations des espèces : SPAL - *Spartina alterniflora*, SAEU - *Salicornia europaea*, SPPA- *Spartina patens*, ATRIPLE SP - *Atriplex sp*. JUGE - *Juncus gerardii*, CAPA - *Carex paleacea*, JUAR - *Juncus arcticus*, SPPE - *Spartina pectinata*.

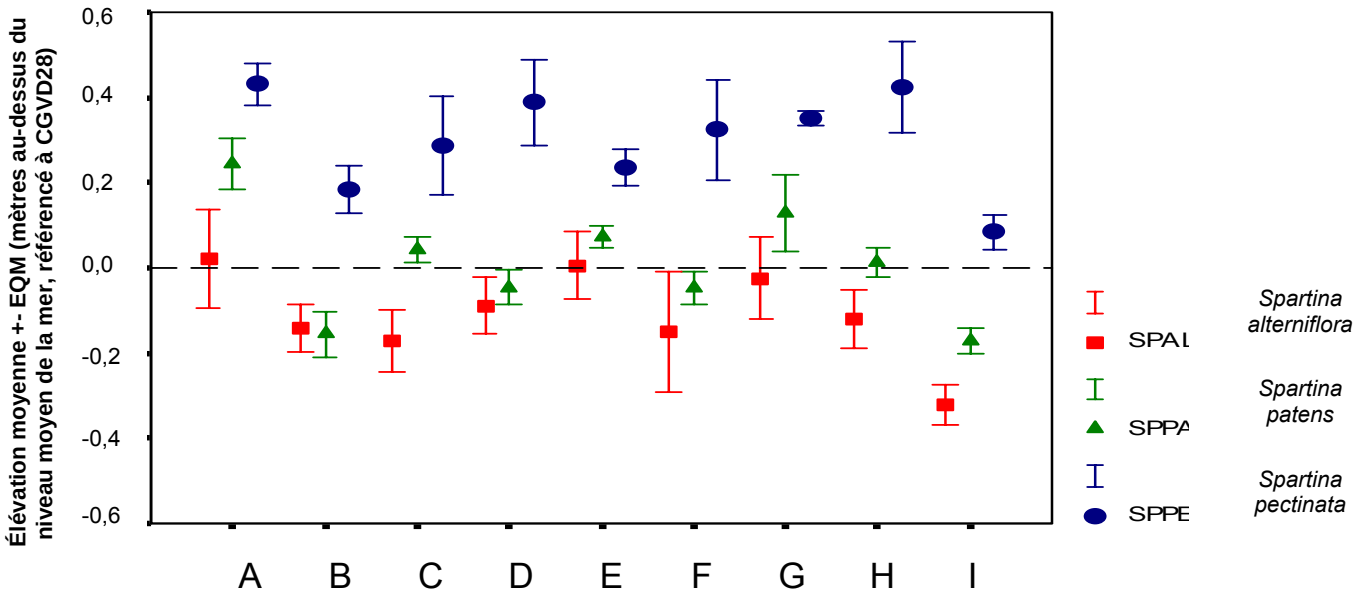


Figure 18. Distribution verticale des espèces *Spartina* en relation avec les données PMSGM (pleine mer supérieure, grande marée) dans 9 marais salés du détroit de Northumberland au Nouveau-Brunswick : (A) Cap-de-Cocagne, (B) Shediac, (C) Village de Shemogue, (D) Petit-Cap, (E) Pointe Comeau, (F) Crique Fox, (G) Pointe Johnston, (H) Crique Grant, (I) Cap-Jourimain (les ordonnées sont en mètres). Abbréviations des espèces : SPAL - *Spartina alterniflora, SPPA - Spartina patens, SPPE - Spartina pectinata.*

4.6.5.4 Sommaire et conclusions

Certaines espèces végétales tendent à occuper des niches d'élévation relative, ce que révèle leur distribution à des hauteurs moyennes et leur relation verticale à d'autres espèces végétales vasculaires. Cette situation tend à se répéter aux deux sites à l'étude. *Spartina alterniflora*, *Spartina patens*, *Juncus gerardii* (vulpin géniculé*), Carex paleacea, Juncus arcticus* et *Spartina pectinata,* par exemple, se retrouvent toujours en bandes le long du même gradient de pente (de bas à élevé) des marais salés étudiés. Ces zonations latitudinales sont bien visibles sur le terrain et sur les photographies aériennes. Elles sont caractéristiques des marais salés, et probablement liées aux niveaux de marée, ainsi qu'à la fréquence et à la durée des inondations. Cette étude révèle donc que les mesures de l'élévation de la surface du marais *per se* pourraient grandement nous éclairer sur la probabilité d'occurrence de ces espèces végétales.

D'autres espèces végétales comme *Atriplex*, *Salicornia europaea* et *Solidago sempervirens* tendent à manifester une plus grande variabilité et leur distribution à être plus aléatoire. Elles alternent en bandes le long du gradient de pente, adjacentes aux cuvettes ou aux chenaux créés par la marée, ou en agrégats sur les dépôts de vase laissés par la glace flottante. Ces distributions découlent de divers mécanismes qui, en conjonction avec l'élévation, influent sur les régimes de zonation. Ce peut être, par exemple, la compétition interspécifique ou les conditions édaphiques (dépôts de vase par la glace, saturation d'eau des sols, salinité, etc.).

Les conditions qui ont fait que *Spartina patens* et *Spartina pectinata,* que l'on trouve au-dessus de la marque PMSGM sur le détroit de Northumberland, pourraient être liées à la fréquence et à la durée des inondations. Les marais où l'amplitude des marées est moindre risquent d'être inondés plus souvent que ceux où elle est plus grande (Desplanque et Mossman, 2004). On pose donc l'hypothèse que l'inondation (ou des périodes prolongées de submersion) est plus fréquente dans le détroit de Northumberland et que *Spartina patens* et *Spartina pectinata,* en ce qui concerne les limites physiologiques, pourraient devoir pousser à des niveaux relativement plus élevés dans ces marais que dans ceux de la baie de Fundy, pour que les conditions édaphiques conviennent à leur développement et à leur subsistance.

Les résultats de cette étude réaffirment l'importance de l'élévation relative pour déterminer la distribution et l'abondance des espèces végétales dans les marais salés. Les différences de zonation végétale selon l'élévation entre ces marais, et entre les marais de la baie de Fundy et ceux du golfe du Saint-Laurent, mettent en lumière le fait que l'élévation n'est qu'un indice des facteurs proximaux de la fréquence et de la durée des inondations d'eau salée qui influent sur les communautés végétales. Les importantes relations qui existent entre la flore et l'élévation relevées dans notre étude révèlent qu'il serait possible de prédire comment la flore des marais salés réagira aux changements d'élévation relative. Il n'est pas possible pour le moment de procéder à une modélisation quantitative précise et prédictive de la réaction de la flore à l'élévation du niveau de la mer, car nous ne disposons que de données quantitatives limitées sur les changements d'élévation de la surface des marais, en particulier ceux qui sont attribuables à l'élévation du niveau moyen de la mer. L'établissement de sites dans le golfe du Saint-Laurent en vue de mesurer les taux d'accrétion dans le cadre du réseau mondial SET facilitera ce travail de prédiction (D. Cahoon USGS, comm. pers.). Notre étude nous permet cependant de prédire qu'un changement relatif de 25 cm du niveau moyen de la mer

pourrait entraîner un décalage des grandes zones de communautés végétales de *Spartina alterniflora, Spartina patens* et *Spartina pectinata*.

Une importante composante de l'impact potentiel de l'élévation du niveau de la mer sur les marais salés, et sur leurs communautés végétales, est la capacité de migration des entités côtières vers les terrains plus élevés. D'après les observations sur le terrain et sur les photographies aériennes, et d'après les modèles MAN et la cartographie des inondations, il semble que la capacité de migration des marais côtiers vers l'intérieur des terres soit limitée quand ils sont situés directement le long du littoral. Ils pourraient en effet se buter à une infrastructure humaine adjacente, ou à une pente trop abrupte, ce qui limite le gain d'espace en hauteur avec chaque augmentation verticale du niveau de la mer. En plus des changements que risque de subir la flore des marais, l'incapacité ce ceux-ci de migrer vers l'intérieur des terres pourrait mener à la disparition d'espèces végétales de terrains plus élevés, comme *Carex palacea*. Les zones plus élevées des marais salés sont importantes pour les oiseaux qui nichent au sol comme le bruant de Nelson (Hanson, 2004; Hanson et Shriver, 2006). La superficie couverte par nos recherches n'allait pas jusqu'à la limite des conditions salées le long des rivières à marée. Le potentiel pour les marais salés de s'étendre plus loin dans l'intérieur des terres le long de ces rivières mériterait d'être étudié.

4.6.5.5 Références

Bertness, M.D. 1991. Zonation of *Spartina patens* and *Spartina alterniflora* in a New England salt marsh. Ecology, 1 (72), 138-148.

Bockelmann, A.-C., J.P. Bakker, R. Neuhaus et J. Lage. 2002. The relation between vegetation zonation, elevation and inundation frequency in a Wadden Sea salt marsh. Aquatic Botany, 73, 211-221.

Desplanque, C., et D. Mossman. 2004. Tides and their seminal impact on the geology, geography, history and socio-economics of the Bay of Fundy, Eastern Canada. Atlantic Geology, 1 (40), 1-130.

Hanson, A., et L. Calkins. 1996. Wetlands of the Maritime Provinces: Revised Documentation for the Wetlands Inventory. Rapport technique du SCF n^{o} 267. Service canadien de la faune – Environnement Canada, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada.

Hanson, A. R., et W. G. Shriver. Sous presse. Breeding birds of northeast saltmarshes: habitat use and conservation. Pp xx-xx *in* R. Greenberg, J. E. Maldonado, S. Droege et M.V. McDonald (dir. de publ.). Biogeography and evolution of tidal marsh faunas. Studies in Avian Biology 32. (Sous presse)

Pennings, S. C., M.-B. Grant et M.D. Bertness. 2005. Plant zonation in low-latitude salt marshes: disentangling the roles of flooding, salinity and competition. Journal of Ecology, 93, 159-167.

Sanchez, J.M., J. Izco et M. Medrano. 1996. Relationships between vegetation zonation and altitude in a salt marsh system in Northwest Spain. Journal of Vegetation Science, 7, 695-702.

Sanderson, E.W., T.C. Foin et S.L. Ustin. 2001. A simple empirical model of salt marsh plant spatial distributions with respect to a tidal channel network. Ecological Modelling, 139, 293-307.

Silvestri, S., A. Defina et M. Marani. 2005. Tidal Regime, salinity and salt marsh plant zonation. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 62, 119-130.

Ursino, N., S. Silvestri et M. Marani. 2004. Subsurface flow and vegetation patterns in tidal environments. Water Resources Research, 40, W05115, doi:10.1029/2003WR002702.

Webster, T., M. Christian, C. Sangster et D. Kingston, D. 2004. High-resolution elevation and image data within the Bay of Fundy coastal zone, Nova Scotia, Canada. *In* GIS for Coastal Zone Management, Bartlett, D., et J. Smith (dir. de publ.), CRC Press, p. 195-218.

Zedler, J.B., J.C. Callaway, J.S. Desmond, G. Vivian-Smith, G.D. Williams, G. Sullivan, A.E. Brewster et B.K. Bradshaw. 1999. Californian salt-marsh vegetation: An improved model of spatial pattern. Ecosystems, 2, 19-35.

4.6.6 Impact de l'élévation du niveau de la mer sur la sterne et le goéland nicheurs coloniaux[20]

4.6.6.1 Introduction

Le littoral du Nouveau-Brunswick abrite un grand nombre d'espèces d'oiseaux, mais aucune n'est aussi bien connue des gens, ni autant associée aux rivages, que le goéland, le héron et la sterne. Il faut à ces oiseaux des sites de nidification non perturbés par l'activité humaine et les autres prédateurs. Ces oiseaux sont appelés nicheurs coloniaux car, lorsque les conditions y sont favorables, ils nichent tous ensemble très près les uns des autres.

Depuis 1964, on a procédé à des recensements plus ou moins intenses (Boyne et Hudson 2002) de la sterne pierregarin (*Sterna hirundo)*, du goéland marin (*Larus marinus*), du goéland argenté (*L. argentaus*), du goéland à bec cerclé (*L. delawarensis)*, du cormoran à aigrettes (*Phalacrocorax auritus*), du grand héron (*Ardea herodias*) et de la mouette tridactyle (*Rissa tridactyla*) le long de la côte du Nouveau-Brunswick. Lock a estimé à 15 500 le nombre de couples de sternes pierregarins qui ont tenté de nicher à 26 sites (Lock *et al.*, 1984) en 1983. En 2002, ce nombre était tombé à 12 618 nids dans 11 colonies (Boyne et Hudson, 2002).

Afin d'étudier l'impact potentiel de l'élévation du niveau de la mer et d'une onde de tempête sur la nidification au sol du goéland et de la sterne, nous avons analysé l'élévation des colonies dans divers scénarios d'inondation.

4.6.6.2 Méthodes

4.6.6.2.1 Recensement des colonies de nicheurs

La méthodologie utilisée pour recenser les oiseaux nicheurs coloniaux au Nouveau-Brunswick a déjà été décrite (Lock *et al.*, 1984; Lock *et al.*, 1987; Boyne et Hudson, 2002; Boyne *et al.*, 2006). Boyne a dirigé les plus récents recensements effectués au moyen d'un aéronef à voilure fixe avec vérifications sur le terrain, en adaptant la période d'observation et la méthodologie au goéland à bec cerclé, au goéland argenté, au goéland marin et à la sterne pierregarin.

[20] Auteurs : Alan Hanson, Matthew Mahoney, Andrew Boyne et Shawn Craik.

4.6.6.2.2 Cartographie

Le logiciel ArcGIS a servi à déterminer l'impact d'une élévation du niveau de la mer sur la sterne et le goéland nicheurs sur le littoral du golfe du Saint-Laurent, dans le centre et le sud-est du Nouveau-Brunswick (figure 19). On trouvera plus de détails sur la méthode de cartographie dans Hanson (2006). Nous avons orienté notre étude sur quatre scénarios de niveaux d'eau : 0,6 m, 2,55 m, 3,05 m et 3,25 m au-dessus du zéro du MAN.

4.6.6.3 Résultats

De 1964 à 2000, il y avait 14 sites (tableau 14) dans la zone à l'étude de nidification. Sur le littoral du golfe du Saint-Laurent au Nouveau-Brunswick, on trouvait plus de colonies de nidification au nord de la baie de Miramichi qu'au sud. Seule la colonie de la barre de Cocagne serait touchée par un niveau d'eau de 0,6 m. Un niveau d'eau de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN, associé à une onde de tempête, inonderait la plupart (11 sur 14) des colonies. Les colonies qui n'auraient pas été submergées par cette inondation de 2,55 m occupaient des terrains surélevés en plus des terrains plats que préfèrent la sterne et le goéland nicheurs. La plupart des colonies fréquentent des îles et ne sont pas associées aux habitats en milieu sec (tableau 15). Les données de 2000 et de 2005 sur la sterne pierregarin illustrent l'importance des terrains plats de nidification, sans arbres ni autre végétation haute (tableau 16).

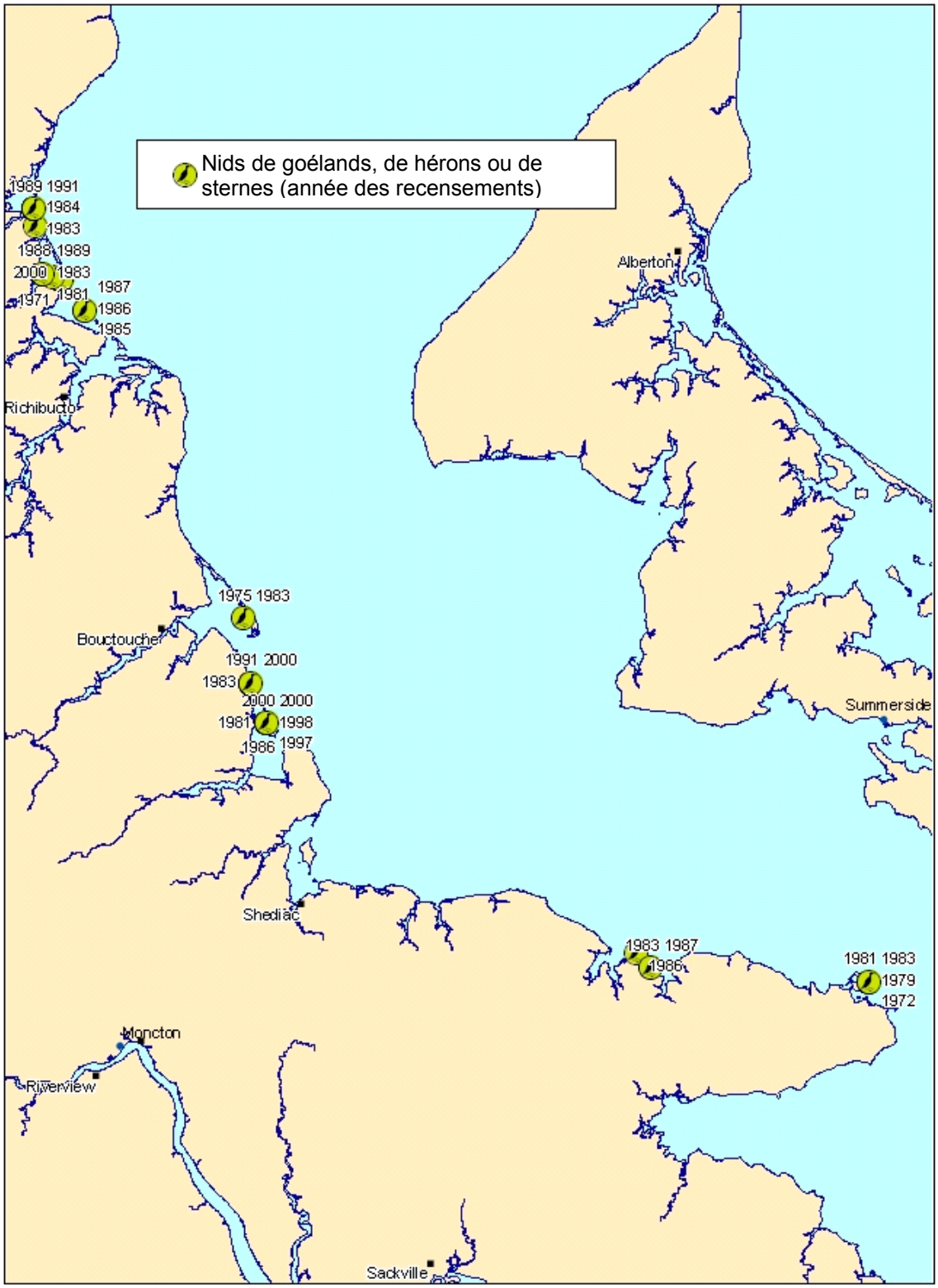


Figure 19. Emplacements des nids de goélands, de hérons et de sternes de 1964 à 2000.

Tableau 14. Emplacement des colonies d'oiseaux de mer (goélands, hérons, sternes) dans la zone à l'étude (de Cap-Jourimain au parc national Kouchibouguac); années où la colonie était présente d'après les renseignements de la base de données; inondation ou non de la colonie à des niveaux d'eau de 0,6 m, 2,55 m, 3,05 m ou 3,25 m au-dessus du zéro du MAN.

COLONIE	Années où la colonie était présente	Niveau d'eau 0,6 m	Niveau d'eau 2,55 m	Niveau d'eau 3,05 m	Niveau d'eau 3,25 m
Barre de Bouctouche	1975, 1983	N	N	N	N
Dune de l'île Cap-de-Saint-Louis	1971	N	O	O	O
Cap-Jourimain	1972, 1979, 1981, 1983	N	N	N	N
Barre de Cocagne	1964, 1969, 1979, 1983, 1991, 2000	O	O	O	O
Île de Cocagne	1974, 1979, 1981, 1986, 1997, 1998, 2000	N	N	N	N
Île Hut	1989, 1993	N	O	O	O
Pointe Johnston	1986	N	O	O	O
Kouchibouguac, Île Loggiecroft	1973, 1976, 1981, 1983, 1984, 1989, 1991	N	O	O	O
Kouchibouguac, Richibucto nord	1985,1986,1987	N	O	O	O
Kouchibouguac, plage sud	1986	N	O	O	O
Kouchibouguac, dune sud	1981, 1983, 1988, 1989	N	O	O	O
Kouchibouguac, Îles aux sternes (1,2)	1971, 1974, 1975, 1976, 1984, 1987, 1989, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000	N	O	O	O
Havre de Little Shemogue	1983, 1987	N	O	O	O
Havre de Richibucto	1983	N	O	O	O

Tableau 15. Superficie d'habitat dans un rayon de 500 m du site de nidification (m^2) d'après la carte de base améliorée de Services Nouveau-Brunswick

COLONIE	Terres hautes	Arrière-plage	Littoral	Marais	Dune	Marécage	Zone d'exclusion
Barre de Bouctouche	0	9 975	755 150	6 125	14 325	0	0
Dune de l'île Cap-de-Saint-Louis	0	0	614 625	54 400	0	116 425	0
Cap-Jourimain	207 550	0	546 525	23 275	1 150	0	0
Barre de Cocagne	133 800	12 350	558 500	77 225	475	3 225	0
Île Cocagne	0	11 025	260 625	152 400	8 850	0	352 200
Île Hut	0	55 700	711 975	4 275	13 600	0	0
Pointe Johnston	195 400	450	589 750	0	0	0	0
Kouchibouguac, Île Loggiecroft	0	55 700	711 975	4 275	13 600	0	0
Kouchibouguac, Richibucto nord	0	17 525	577 375	28 350	161 975	0	0
Kouchibouguac, plage sud	285 375	9 075	286 700	110 700	93 725	0	0
Kouchibouguac, dune sud	37 250	4 175	719 850	6 650	0	15 850	1 575
Kouchibouguac, Îles aux sternes (1,2)	0	51 125	703 300	0	30 100	0	0
Havre de Little Shemogue	72 750	2 175	469 800	227 275	13 525	0	0
Havre de Richibucto	0	55 700	711 975	4 275	13 600	0	0

Tableau 16. Nombre de nids de sternes pierregarins recensés le long de la côte du golfe du Saint-Laurent au Nouveau-Brunswick, en 2000 et en 2005 (Boyne *et al*., 2005).

Emplacement	Latitude	Longitude	Nids 2000	Nids 2005
Marina de Shediac	46,2275	-64,5453	2	121
Havre de Richibucto	46,6737	-64,8607	0	8
Île aux sternes, Tabusintac	47,3298	-64,9326	2 607	3 463
Inkerman I	47,6619	-64,7935	0	165
Inkerman II	47,6597	-64,7947	0	465
Plage Fox Dens	47,8867	-64,5049	678	880
Flèche de sable de Tracadie	47,5260	-64,8670	0	2 161
Îles aux sternes, PNK	46,7770	-64,8750	6 911	6 020
Flèche, Neguac Nord	47,2570	-65,0000	601	0
Neguac, 3	47,2920	-64,9500	546	0
Grande-Anse (sans nom)	47,6700	-64,7770	656	0
Île de Caraquet	47,8250	-64,8960	128	0
Dune de Maisonnette	47,8150	-64,3965	180	0
Île du havre de Bathurst, 3	47,6330	-65,6480	240	0
Dalhousie (jetée Bowater)	48,0720	-66,3700	69	0
Total			12 618	13 283

4.6.6.4 Sommaire et conclusions

Le grand héron niche en colonies dans les arbres. Dans la zone à l'étude, les arbres de même que les nids sont situés assez haut et ne seraient relativement pas touchés par une élévation du niveau de la mer de 0,6 m à marée haute normale et par une onde de tempête de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN. L'inondation par l'eau salée pourrait nuire aux racines des arbres de nidification à certains endroits, selon l'écoulement souterrain, l'élévation relative et la hausse du niveau de l'eau. La sterne pierregarin et le goéland sont plus exposés aux impacts des ondes de tempête parce qu'ils nichent sur le sol et dans des zones basses par rapport au niveau de la mer. L'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les îles de nidification au large des côtes dépendra beaucoup des processus d'érosion et de dépôt. On prévoit qu'un niveau d'eau de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN inonderait la plupart des colonies et des nids de sternes.

La sterne pierregarin qui se reproduisait sur les trois îles aux sternes et sur l'île Kellys à Kouchibouguac, de 2002 à 2006, choisissait souvent pour nicher des zones insulaires où la végétation est moins dense, où il est moins facile de se cacher et où le terrain est plus bas que les sites de nidification du harle (Craik *et al.*, 2006). Les nids de sternes sont distribués à distances variées de la limite de marée haute (par ex. 0,5 à 30 m), mais on trouve habituellement plus de nids en périphérie des îles, là où la végétation est la moins dense. Un grand nombre de nids de sternes auraient pu être inondés dans les 3 scénarios d'onde de tempête. La tempête printanière de 1993 a inondé un grand nombre de nids de sternes, entraînant la mort de la progéniture, ce qui a considérablement diminué les tentatives annuelles de reproduction dans les années qui ont suivi la tempête

(Richard, 1996; É. Tremblay, comm. pers.). On a répertorié 6 400 nids en tout sur les trois îles aux sternes en 1992, mais seulement 3 698 en 1994, et 4 104 en 1995 (Richard, 1995, 1996). Les observations des nids sur le terrain indiquent que la pluie et les vagues associées aux tempêtes estivales entraînent effectivement l'inondation des nids des îles de nidification au large des côtes (Boyne *et al.*, 2006). On sait que la sterne pierregarin change de site de reproduction après une année de reproduction infructueuse et se regroupe à des sites qui ne sont pas fréquemment inondés (Nisbet, 2002).

À l'heure actuelle et dans l'avenir, ce qui risque surtout d'exercer un impact sur l'habitat de nidification des oiseaux nicheurs coloniaux est l'activité humaine et les prédateurs terrestres. La colonisation récente par la sterne pierregarin d'une péniche enfoncée, qui fait partie du brise-mer de la marina de Shediac (tableau 16), indique qu'on pourrait créer des habitats de nidification pour cette espèce advenant le cas où l'activité humaine ou une élévation du niveau de la mer limiterait la possibilité de nidification à certains endroits.

4.6.6.5 Références

Boyne, A.W., et J.K. Hudson. 2002. Census of terns and other colonial waterbirds along the Gulf of St. Lawrence coast of New Brunswick- 2000. Rapport technique n° 397. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique. 29 p.

Boyne, A.W., et J. McKnight. 2005. Census of terns and gulls in Prince Edward Island-2004. Rapport technique n° 428. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique. 29 p.

Boyne, A.W., B.E. Toms et J. McKnight. 2006. Census of terns and other colonial water birds along the Gulf of St. Lawrence coast of New Brunswick-2005. Rapport technique n° 467. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique. 31 p.

Craik, S. R., R. D. Titman, A. Rousseau et M. J. Richardson. 2006. First report of Black Terns breeding on a coastal barrier island. Wilson Journal of Ornithology 118:104-106.

Hanson, A.R. (dir. de publ.). 2006. Ecosystem impacts of sea-level rise and climate change on the coastal zone of south-eastern New Brunswick. Rapport technique n° 463. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada. 223 p.

Lock, A. R. 1987. A census of gull colonies in northern New Brunswick-1986. Rapport non publié. Service canadien de la faune, Dartmouth, Nouvelle-Écosse.

Lock, A. R., T. Currie et M. Malone. 1984. Tern colony surveys in New Brunswick 1983. Service canadien de la faune, Dartmouth, Nouvelle-Écosse. 14 p.

Nisbet, I. C. T. 2002. Common Tern (*Sterna hirundo*). *In* The Birds of North America, No. 618 (A. Poole and F. Gill, eds.). The Birds of North America, Inc., Philadelphia, PA.

Richard, B. 1995. Compte rendu annuel des activités de monitoring et de gestion de la sterne et du goéland sur l'Île aus Sternes du Parc National Kouchibouguac pour l'année 1994. Kouchibouguac National Park report no. KOU-95-02, Environment Canada-Parks, New Brunswick, Canada.

Richard, B. 1996. Compte rendu annuel des activités de monitoring et de gestion de la sterne et du goéland sur l'Île aus Sternes du Parc National Kouchibouguac pour l'année 1995. Kouchibouguac National Park report no. KOU-96-03, Environment Canada-Parks, New Brunswick, Canada.

4.6.7 Impact de l'élévation du niveau de la mer sur le harle huppé colonial du parc national Kouchibouguac [21,22,]

4.6.7.1 Introduction

Le harle huppé (*Mergus serrator*) est un canard de mer de moyenne taille, piscivore, qui se reproduit dans divers milieux humides d'eau salée, saumâtre ou douce, tant sur le continent que dans les îles, dans tout l'hémisphère nord (Titman, 1999). Le harle a depuis longtemps l'habitude de nicher en colonies dans le parc national Kouchibouguac au Nouveau-Brunswick, sur plusieurs petites îles-barrières du littoral. Ces petites îles séparent les lagunes d'eau salée peu profondes des eaux marines de la baie Kouchibouguac, dans le détroit de Northumberland (Young et Titman, 1986). C'est en 1984 qu'on a pour la première fois observé la dynamique des populations de la colonie. Cette observation se poursuit tous les ans depuis 1992 (Young et Titman, 1988; Titman, 1997). C'est dans des bosquets denses de longs roseaux hamophiles (*Ammophila breviligulata*) et d'élymes de mer (*Leymus mollis*) que l'on retrouvait les nids de harles, dont le nombre varie de 25 à 91 par an depuis 1992 (Bouchard, 2001). Cet oiseau construit son nid dans une dépression peu profonde du sable qu'il tapisse d'herbes mortes et de duvet arraché du ventre de la femelle (Titman, 1999). On estime que le harle a souvent dépassé un taux de reproduction de 60 % et qu'il a même atteint 70 % (Mayfield, 1961; R. Titman, données non publiées).

Cette étude avait pour objectifs : 1) de déterminer à quelle hauteur au-dessus du niveau de la mer le harle huppé fait son nid sur plusieurs îles-barrières du parc national Kouchibouguac; 2) de prédire le risque d'inondation des nids de harles dans divers scénarios d'élévation du niveau de la mer, compte tenu de la hauteur des nids; 3) de représenter les types d'habitats côtiers du site de Kouchibouguac; 4) et de calculer la superficie de chaque habitat côtier dans un rayon de 500 mètres autour du site de nidification. Les données sur la reproduction du harle huppé du parc Kouchibouguac ont été recueillies dans le cadre d'une étude de 5 ans (2002 à 2006) sur le choix de l'habitat de nidification et de couvée (R. Titman, données non publiées).

4.6.7.2 Méthodes

De 2002 à 2005, nous avons dénombré les nids de harles huppés des trois îles aux sternes du parc national Kouchibouguac, un complexe d'îles-barrières de 4 ha dans la lagune Saint-Louis, à l'embouchure de la rivière Kouchibouguac (figure 1). Nous avons déterminé les coordonnées du nid à l'aide d'un appareil Garmin® eTrex, avec une précision de 1 à 5 mètres. Nous avons mesuré la distance entre le centre de chaque dépression occupée par le nid et la limite de marée haute la plus proche au moyen d'un ruban à mesurer. On trouvera plus de détails sur les procédures de cartographie GPS dans Hanson (2006).

---

[21] Auteurs: Alan Hanson, Shawn Craik, Rodger Titman et Matthew Mahoney.

[22] Les auteurs remercient A. Rousseau, O. Fraser, P.-E. Hébert et B. Martin qui ont agi comme auxiliaires sur le terrain à Kouchibouguac de 2000 à 2005, dans le cadre des études sur le choix de l'habitat pour le nid et la couvée. Nous remercions également Parcs Canada, en particulier É. Tremblay, qui a fourni le soutien logistique tout au long des études du harle sur le terrain. Le financement de la recherche sur le harle provient du Fonds en fiducie pour la faune du Nouveau-Brunswick, de la Société québécoise pour la protection des oiseaux, de la Fédération canadienne de la faune et de l'Université Bishop.

4.6.7.3 Résultats

De 2002 à 2005, nous avons observé que le harle huppé nichait en colonies sur quatre îles-barrières au large du parc national Kouchibouguac (figure 20). Il convient de noter que l'île Kellys s'est formée en 2000 lorsqu'une violente tempête a ouvert une brèche dans la dune de Kouchibouguac; sur la figure 20, elle correspond à la portion distale de la dune. On compte en moyenne cinq nids de harles chaque année sur l'île Kellys. L'élévation moyenne des nids est de 2 m au-dessus du NMM et leur distance moyenne à l'eau de 29 m (tableau 17). L'île aux sternes 1 compte en moyenne 27 nids par année. L'élévation moyenne de ces nids est de 2,29 m au-dessus du NMM et leur distance moyenne à l'eau de 15 m (tableau 17). L'île aux sternes 2 compte en moyenne 13 nids par année, avec une élévation moyenne de 2,01 m au-dessus du NMM et une distance à l'eau de 18 m (tableau 17). Sur l'île aux sternes 3, se trouvent dix nids en moyenne, à une hauteur moyenne de 1,95 m au-dessus du NMM et une distance moyenne à l'eau de 10 m (tableau 17). La plupart des nids des quatre îles-barrières se situent plus haut que les 60 cm associés à l'élévation prévue du niveau de la mer. Toutefois, la plupart seraient inondés par une onde de tempête avec un niveau d'eau de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN (tableau 17). Tous les nids de l'île aux sternes 3 seraient inondés dans le scénario d'une onde de tempête de 2,55 m et près de 35 % des nids de l'île aux sternes 1 auraient survécu à l'élévation de 2,55 m de l'onde de tempête. Plusieurs nids résisteraient à des élévations d'onde de tempête de 3,05 m et de 3,2 m. Nous avons observé une plus grande densité de nids de harles sur une crête végétalisée de cette île. Il semble que le harle choisisse cette région pour sa combinaison de végétation et d'élévation.

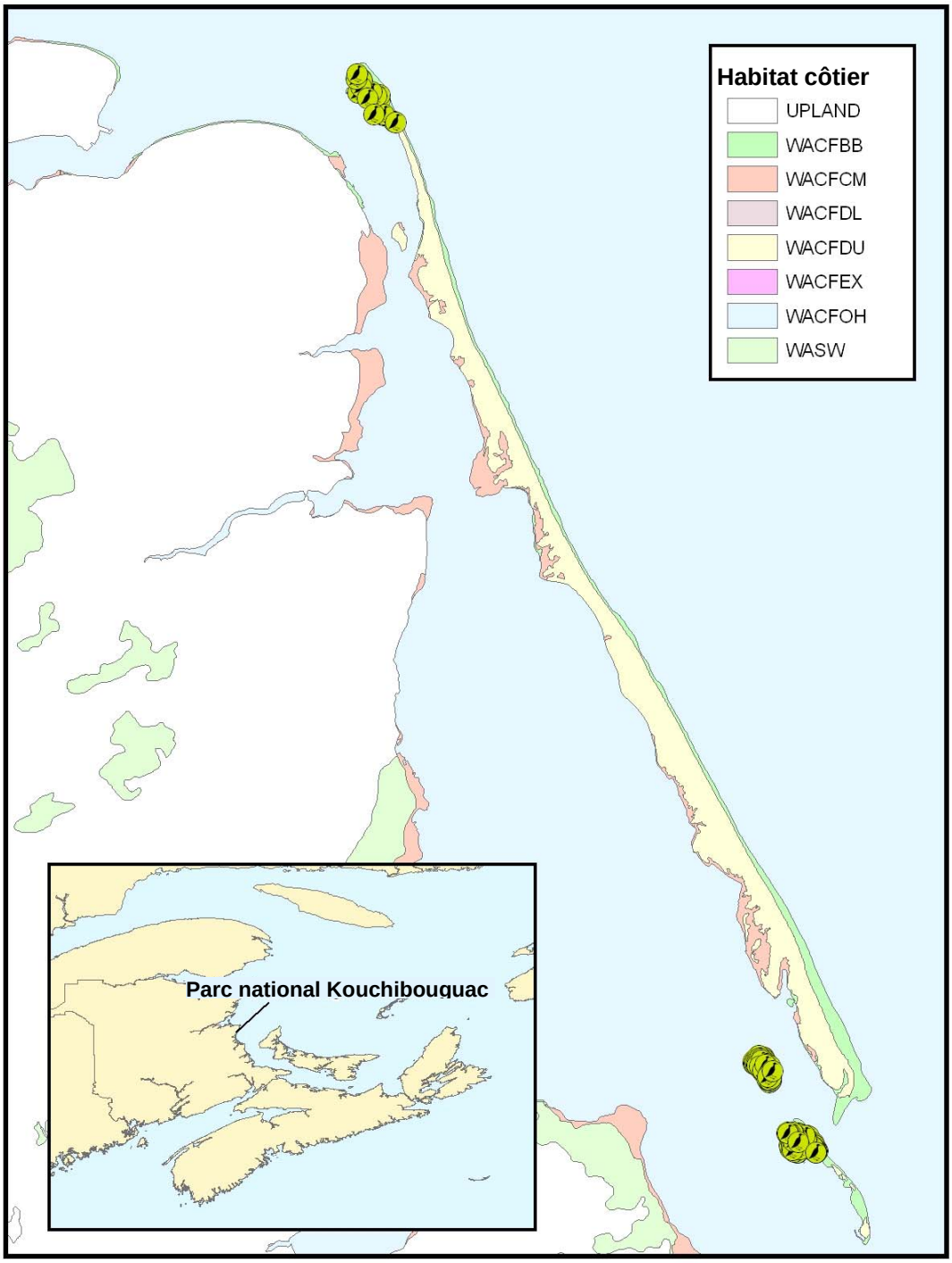


Figure 20. Sites de nidification du harle huppé (*Mergus serrator*) (cercles verts) sur l'île Kelly (nord) et les trois îles aux sternes (sud) du parc national Kouchibouguac de 2002 à 2005. Les parties en jaune (WACFDU) représentent les dunes, en vert pâle (WACFBB) l'arrière-plage et en rose les marais côtiers (WACFCM).

Tableau 17. Distribution des nids de harles huppés dans le parc national Kouchibouguac de 2002 à 2005; estimation de la hauteur moyenne du nid (mètres au-dessus du niveau moyen de la mer, CGVD28); écart type; nombre de nids inondés à des niveaux d'eau de 0,6 m, de 2,55 m, de 3,05 m et de 3,2 m au-dessus du zéro du MAN; distance entre le nid et la limite habituelle de marée haute.

Île	Année	Nids	Hauteur (m)	Écart type	Inondés 0,6 m	Inondés 2,55 m	Inondés 3,05 m	Inondés 3,2 m	Distance à l'eau (m)	Écart type
Kellys	2002	5	1,69	0,96	0	3	5	5	43,82	25,71
Kellys	2003	6	2,26	0,17	0	6	6	6	31,85	17,15
Kellys	2004	3	1,96	0,51	0	3	3	3	24,03	16,78
Kellys	2005	4	2,01	0,26	0	4	4	4	10,25	6,25
Kellys	**TOUTES**	**18**	**2,00**	**0,57**	**0**	**16**	**18**	**18**	**29,07**	**20,90**
sternes 1	2002	19	2,02	0,55	0	17	18	19	19,89	9,77
sternes 1	2003	23	2,30	0,49	0	18	21	22	14,87	7,34
sternes 1	2004	23	2,05	0,38	0	19	23	23	15,16	8,99
sternes 1	2005	43	2,54	0,49	0	19	38	41	13,08	6,36
sternes 1	**TOUTES**	**108**	**2,29**	**0,52**	**0**	**73**	**100**	**105**	**15,10**	**8,08**
sternes 2	2002	10	1,88	0,32	0	9	10	10	27,62	18,81
sternes 2	2003	13	1,98	0,27	0	13	13	13	13,83	9,08
sternes 2	2004	11	2,14	0,34	0	10	11	11	19,35	10,79
sternes 2	2005	16	2,04	0,23	0	16	16	16	14,88	11,36
sternes 2	**TOUTES**	**50**	**2,01**	**0,29**	**0**	**48**	**50**	**50**	**18,14**	**13,25**
sternes 3	2002	6	1,45	0,38	0	6	6	6	14,00	9,22
sternes 3	2003	12	2,13	0,16	0	12	12	12	12,34	4,74
sternes 3	2004	7	1,84	0,43	0	7	7	7	6,47	2,23
sternes 3	2005	14	2,07	0,18	0	14	14	14	8,44	3,86
sternes 3	**TOUTES**	**39**	**1,95**	**0,35**	**0**	**39**	**39**	**39**	**10,14**	**5,57**
TOUTES	**TOUTES**	**215**	**2,14**	**0,48**	**0**	**176**	**207**	**212**	**16,08**	**11,62**

4.6.7.4 Sommaire et conclusions

Les ondes de tempête du printemps et du début de l'été dans l'est du Nouveau-Brunswick peuvent avoir de graves conséquences sur la dynamique des populations reproductrices de harle huppé dans les îles-barrières du parc national Kouchibouguac. La plupart des nids de harles surveillés de 2002 à 2005 à Kouchibouguac se trouvaient à proximité de l'eau, tant sur l'horizontale que sur la verticale. Les résultats des quatre scénarios d'inondation suggèrent que la majorité des nids auraient été inondés dans la plupart des cas étudiés d'onde de tempête. Une onde de tempête avec un niveau d'eau de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN (comme la tempête du 21 janvier 2000) durant la saison de reproduction aurait probablement inondé la plupart des nids, entraînant un taux élevé de mortalité des oisillons et de destruction des œufs de ces populations au cours de la période de quatre ans. Une onde de tempête avec un niveau d'eau de plus de 3,05 mètres aurait inondé tous les nids sauf huit, alors qu'une onde de plus de 3,2 m les aurait tous inondés sauf trois. L'élévation prévue du niveau de la mer de 60 cm au cours du prochain siècle aggraverait les inondations catastrophiques dues aux ondes de tempête. De même, les inondations qui surviennent à d'autres moments de l'année, comme à l'occasion de tempêtes d'automne, soumettraient les îles de nidification à d'autres forces de changement physique.

Une tempête côtière survenue dans le golfe du Saint-Laurent le 23 juin 1993 a entraîné la formation d'une onde de tempête qui a directement changé le taux de reproduction du harle huppé sur les trois îles aux sternes (Titman, 1997). Le marégraphe d'Escuminac avait enregistré un niveau d'eau de 2,07 m associé à une onde de tempête de 0,725 m (voir Section 4.6.9). L'inondation des îles-barrières a amené de nombreuses femelles à abandonner leur nid, et nous savons que le taux de la reproduction en 1993 a été le plus bas (22,3 %) depuis que l'observation annuelle du taux de succès de la reproduction à Kouchibouguac a débuté en 1992 (Mayfield, 1961; Titman, données non publiées). L'onde de tempête printanière de 1993 semble également avoir influencé, pendant plusieurs années après la tempête, le nombre de femelles qui sont retournées nicher sur les îles.

Comme nous l'avons vu à la Section 4.6.6, une élévation du niveau de la mer et une onde de tempête entraîneraient également l'inondation des nids de la sterne pierregalin. La baisse consécutive de vigilance de la sterne favoriserait la prédation des nids et des femelles de harle par diverses espèces aviaires, dont le goéland, le corbeau, le hibou et le busard Saint-Martin (Young et Titman, 1986).

La femelle harle de Kouchibouguac pourrait choisir un site de nidification plus élevé afin de réduire le risque d'inondation du nid. De 2002 à 2005, sur les îles, les nids étaient plus densément regroupés sur la crête que dans les régions plus basses (S. Craik, obs. pers.). Ces crêtes de plage surélevées, qui peuvent atteindre plus de 3 m au-dessus du niveau de la mer, sont formées par l'accrétion du vent lorsque les vents du sud-ouest érodent les arrière-dunes et en forment d'autres le long des falaises maritimes (Desloges, 1980). Une crête importante sur l'île aux sternes 1 abrite chaque année de 10 à 15 nids, dont bon nombre sont situés à moins d'un mètre du nid suivant. Ces observations appuient nos résultats selon lesquels près de 35 % des nids de l'île aux sternes 1 n'auraient pas été inondés par une onde de tempête de 2,55 m alors que tous les nids, sauf quatre, des trois autres îles auraient été inondés par une onde de tempête de 2,55 m. Puisque les conditions de microhabitat sur la crête sont souvent semblables à

celles observées plus bas (par ex. hauteur et densité de la végétation, possibilités de se mettre à l'abri), il est possible que les harles femelles préfèrent construire leur nid plus haut afin de réduire le risque d'inondation.

Bon nombre des changements observés et prédits sur le littoral et sur les îles du large, dont il a été question à la Section 4.5, modifieront d'année en année la qualité des îles en tant que site de nidification. Avec le temps, s'il y a des changements, plutôt que des variations annuelles, de la distribution et de la qualité des habitats du harle huppé nicheur, celui-ci risque d'en subir les conséquences. Si on veut conserver l'habitat du harle huppé, et d'autres oiseaux qui nichent sur les sols sablonneux, il faudra adopter une approche au niveau du paysage, car la qualité des habitats de nidification peut, en plus de varier d'une année à l'autre, changer pour longtemps.

4.6.7.5 Références

Bouchard, M. J. 2001. Determining rates of intraspecific nest parasitism in a colony of Red-breasted Mergansers (*Mergus serrator*) using microsatellite analysis. Mémoire de maîtrise, Université McGill, Montréal, Québec, Canada. 63 p.

Desloges, C. 1980. The Natural Resources of Kouchibouguac National Park. Parcs Canada – Région de l'Atlantique, Nouveau-Brunswick, Canada.

Hanson, A.R. (dir. de publ.). 2006. Ecosystem impacts of sea-level rise and climate change on the coastal zone of south-eastern New Brunswick. Rapport technique n° 463. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada. 223 p.

Mayfield, H. 1961. Nesting success calculated from exposure. *Wilson Bulletin*, **73**, 255–261.

Titman, R. D. 1997. Population dynamics and social system of reproductive red-breasted mergansers in Kouchibouguac National Park, New Brunswick. Pages 119-128 *in* E. Tremblay (dir. de publ.). Actes d'un atelier sur la recherche, le monitoring et la gestion des ressources naturelles dans le grand écosystème de Kouchibougiac. Parcs Canada - Dossiers en matière de sciences des écosystèmes: rapport n° 3, p. 119-128.

Titman, R. D. 1999. Red-breasted merganser (*Mergus serrator*). *In* A. Poole et F. Gill (dir. de publ.). The Birds of North America, No. 443. The Birds of North America, Inc., Philadelphie, PA.

Young, A. D., et R. D. Titman. 1986. Costs and benefits to red-breasted mergansers nesting in tern and gull colonies. Revue canadienne de zoologie 64: 2339-2343.

Young, A. D., et R. D. Titman. 1988. Intraspecific nest parasitism in red-breasted mergansers. Revue canadienne de zoologie 66: 2454-2458.

4.6.8 Impact de l'élévation du niveau de la mer et d'une onde de tempête sur l'habitat du Pluvier siffleur[23,24]

4.6.8.1 Introduction

Les zones côtières du Canada atlantique sont importantes en tant qu'habitat de reproduction et d'alimentation pour de nombreuses espèces d'oiseaux migrateurs. Plusieurs de ces espèces ont été désignées en voie de disparition, en péril ou préoccupantes par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC). Le Pluvier siffleur dépend des plages côtières sablonneuses du Canada atlantique pour sa reproduction. Cette espèce figurait sur la liste des espèces en voie de disparition du COSEPAC en 1985 (Goossen *et al*., 2002). On a procédé à un nouvel examen en mai 2001 et l'on a divisé les espèces en sous-espèces. Les deux sous-espèces de Pluvier siffleur, *Charadrius melodus, melodus* et *Charadrius melodus circumcinctus,* figurent maintenant séparément sur la liste des espèces en voie de disparition.

Le Pluvier siffleur arrive sur les plages du Nouveau-Brunswick entre la fin d'avril et le début de mai. Il commence alors immédiatement à se choisir un territoire de reproduction. Si la nidification réussit, c'est-à-dire si les œufs éclosent, l'oiseau reste sur la plage jusqu'à ce que les oisillons prennent leur premier envol. Si la première tentative de nidification échoue, le Pluvier siffleur peut faire une nouvelle tentative. Certaines années, les pluviers siffleurs qui ont fait une nouvelle tentative restent sur la plage jusqu'à la fin d'août. Cette espèce est surtout menacée par la déprédation, l'activité humaine (personnes qui fréquentent les plages, véhicules hors route) et la perte ou la dégradation de l'habitat (Haig, 1992; Goossen *et al*., 2002; Melvin *et al*., 1994).

Au Nouveau-Brunswick, il existe des réglementations provinciales et fédérales qui protègent les espèces en péril, y compris le Pluvier siffleur (Goossen *et al*., 2002). Il existe également des programmes de surveillance du Pluvier siffleur, mis en œuvre par le Projet siffleur (Péninsule acadienne), l'Éco-centre Irving de la Dune de Bouctouche et le parc national Kouchibouguac (PNK). Ces programmes permettent d'observer l'activité de reproduction des pluviers siffleurs, de recueillir des données sur la productivité, de clôturer les nids ou de fermer les plages de reproduction, et d'informer les gens qui fréquentent les plages et le public en général sur la biologie et sur la préservation du Pluvier siffleur (SCF, 2004).

Bien qu'on fasse déjà beaucoup pour la gestion et la préservation du Pluvier siffleur au Nouveau-Brunswick, le changement climatique planétaire et la subsidence régionale de la croûte terrestre pourraient avoir des conséquences néfastes sur cet oiseau. On pense que l'élévation du niveau de la mer peut exercer un effet direct sur le nombre des habitats et sur l'habitat de reproduction du Pluvier siffleur (Austin et Rehfisch, 2003). Une

---

[23] Auteurs : Jennifer Stewart, Alan Hanson, Don Forbes et Jennifer Strang.

[24] Ce travail a été financé par la subvention n° 414 du Fonds interministériel pour le rétablissement. Nous remercions M[me] Diane Amirault et M. Andrew Boyne du Service canadien de la faune pour les renseignements fournis sur les populations de Pluvier siffleur, ainsi que M. Éric Tremblay, du parc national Kouchibouguac, pour les renseignements sur l'habitat.

perte d'habitats d'alimentation et de reproduction peut entraîner une réduction de la population, mais nous ne savons pas comment au juste l'élévation du niveau de la mer risque de nuire à cette population, car cet impact dépend en grande partie de l'aptitude de l'espèce à modifier ses habitudes quant à l'usage d'un habitat (Galbraith *et al*., 2002; Dolman et Sutherland, 1995). La présente étude concerne la quantité d'habitats de reproduction disponible pour le Pluvier siffleur du sud-est du Nouveau-Brunswick, en vue de déterminer si l'habitat est présentement limitatif sur l'augmentation de la population et jusqu'à quel point l'élévation du niveau de la mer en modifiera la quantité.

4.6.8.2 Méthodes

Nous avons consulté la base de données sur le Pluvier siffleur du Service canadien de la faune (CWS, 2004) en vue d'identifier toutes les plages situées entre le parc national Kouchibouguac et la réserve nationale de faune de Cap-Jourimain comme occupées, inoccupées ou potentiellement convenables pour la reproduction (tableau 18, figure 21).

On a considéré comme un site de reproduction occupé n'importe quelle plage où on a observé au moins un couple nicheur entre 2000 et 2005. Les sites inoccupés de reproduction du Pluvier siffleur ont été occupés par le passé, mais pas de 2000 à 2005. Les observations se poursuivent sur ces sites. Les sites potentiels de reproduction sont ceux où l'on retrouve des habitats qui conviennent à la reproduction du Pluvier siffleur. On recense ces sites tous les ans ou au moins pendant les années internationales de recensement du Pluvier siffleur. On n'y a pas encore vu de couples nicheurs (Goosen et Amirault, 2004)

Tableau 18. Liste des sites actuels, anciens et potentiels de reproduction du Pluvier siffleur le long de la côte du détroit de Northumberland, à partir du parc national Kouchibouguac jusqu'à la réserve nationale de faune de Cap-Jourimain au Nouveau-Brunswick.

Sites de reproduction actuels	Anciens sites de reproduction	Sites de reproduction potentiels
Barre de Bouctouche	Barre de Cocagne	Cap Bimet Ouest
Cap-Jourimain	Pointe de Cadman Corner	Cap-Brûlé Est
Chockpish	Pointe Johnston	Île Cocagne
Côte-Sainte-Anne	Petit-Cap	Pointe Grande-Digue
Dune nord de Kouchibouguac, PNK	Île Nord, PNK	Quai de Saint-Édouard-de-Kent
Dune de Richibucto Nord, PNK	Petit-Barachois	Île Shediac
Dune de Pointe-Sapin, PNK	Îles aux Sternes, PNK	
Dune de la rivière Portage, PNK		
Dune de Kouchibouguac Sud, PNK		
Richibucto Sud (Cap-Lumière)		
Richibucto Sud (île-barrière Nord)		

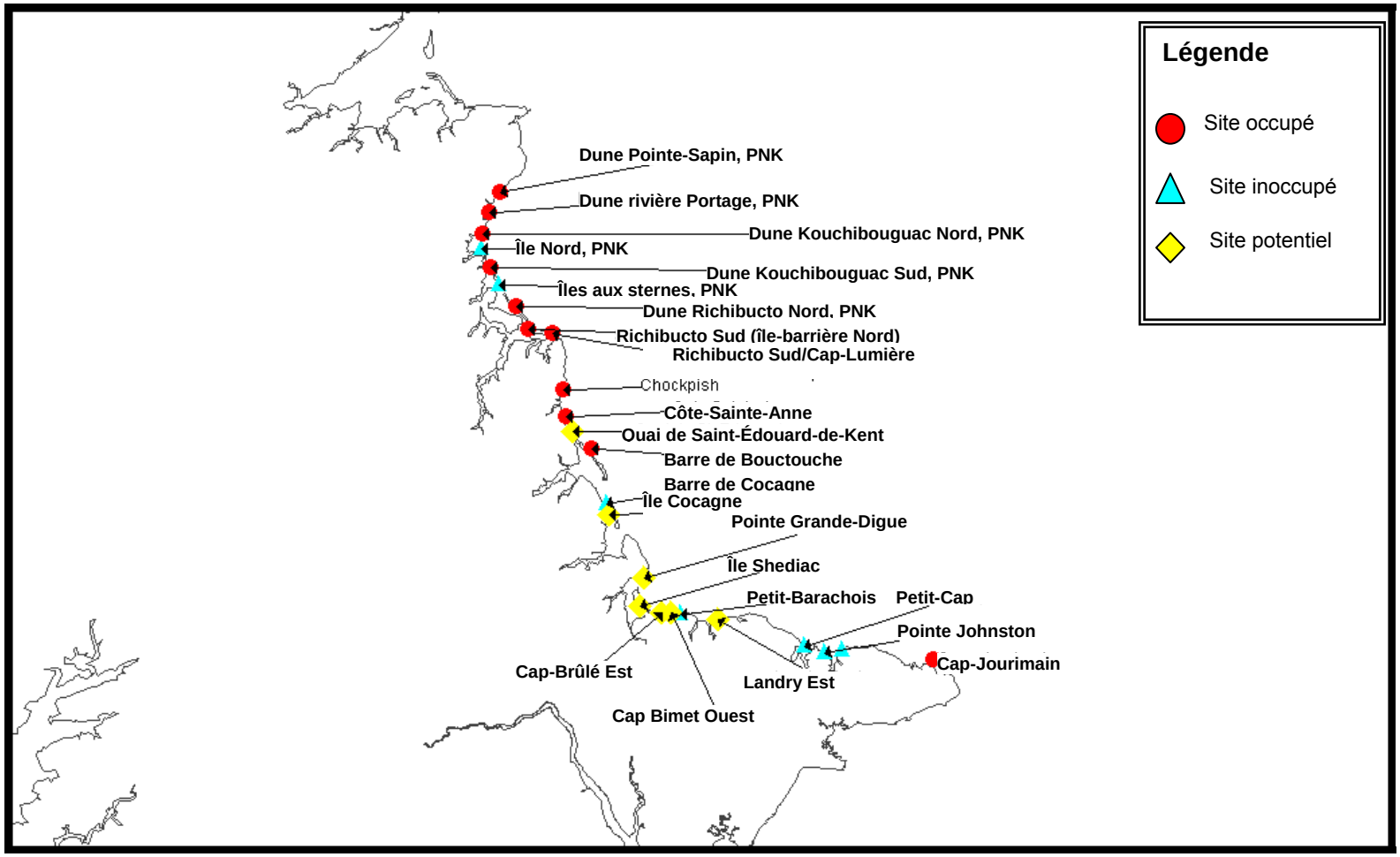


Figure 21. Distribution des habitats occupés, inoccupés et potentiels du Pluvier siffleur le long du littoral sud-est du Nouveau-Brunswick.

On trouvera plus de détails sur les techniques de cartographie par SIG dans Hanson 2006.

4.6.8.3 Résultats

4.6.8.3.1 Longueur des plages

Nous avons mesuré la longueur du rivage de 11 sites de reproduction du Pluvier siffleur occupés, 11 sites inoccupés et 11 sites potentiels. La longueur moyenne des plages occupées était beaucoup plus grande que celle des plages inoccupées ou potentielles (tableaux 19 et 20). Nous n'avons détecté aucune différence importante de longueur entre les plages inoccupées et potentielles.

4.6.8.3.2 Largeur des plages

Nous avons mesuré la largeur des plages à 50 m d'intervalle tout le long du littoral de chaque zone à l'étude. La plage était plus large aux sites occupés, soit en moyenne 43 m +/- 12 (figure 22). Nous avons noté une différence marginale de largeur des plages inoccupées (22 m +/- 34) et potentielles (16 m +/- 4). Au moyen d'un test t (seuil de signification de 95 %), nous avons comparé les moyennes des largeurs de plage entre les sites occupés, inoccupés et potentiels (tableau 19). Lorsque nous avons comparé la largeur des plages, nous avons constaté une importante différence entre la largeur des plages occupées et celle des plages potentielles.

Tableau 19. Comparaison de la longueur, de la largeur moyenne et de la superficie de sable des plages de reproduction occupées, inoccupées et potentielles.

Variable indépendante	Variable test	t	Degrés de liberté	Valeur p
Occupées *vs* inoccupées	Longueur de la plage	4,35	9,73	≤0,001
Occupées *vs* potentielles	Longueur de la plage	4,455	19	≤0,001
Inoccupées *vs* potentielles	Longueur de la plage	0,059	20	> 0,05
Occupées *vs* inoccupées	Largeur moyenne de la plage	1,955	12,542	> 0,05
Occupées *vs* potentieles	Largeur moyenne de la plage	7,133	12,35	≤0,001
Inoccupées *vs* potentielles	Largeur moyenne de la plage	0,586	10,298	> 0,05
Inoccupées *vs* potentielles	Superficie de sable	-1,271	14,480	> 0,05

Tableau 20. Longueur moyenne de la plage pour les sites de reproduction du Pluvier siffleur occupés, inoccupés et potentiels dans le sud-est du Nouveau-Brunswick.

Plage	Longueur moyenne de la plage (m)
Occupées (n=11)	5 033 +/- 2 910
Inoccupées (n=11)	913 +/- 662
Potentielles (n=11)	900 +/- 276

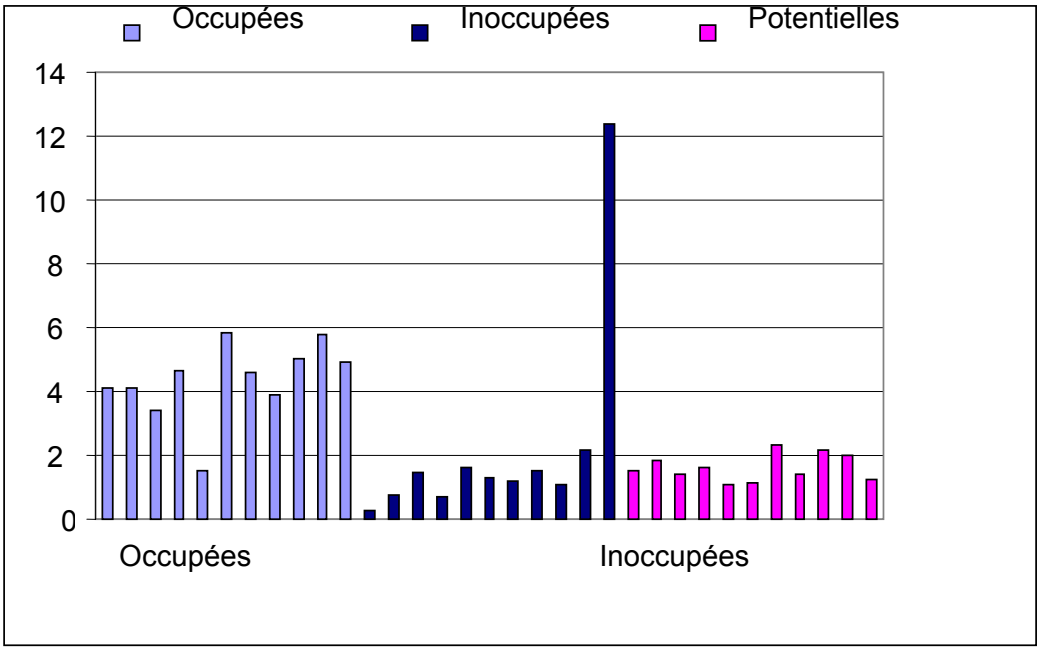


Figure 22. Largeur moyenne (en mètres) des plages de reproduction du Pluvier siffleur occupées (n=11), inoccupées (n=11) et potentielles (n=11).

4.6.8.3.3 Superficie de sable

Nous avons mesuré la superficie de sable à découvert à neuf sites de reproduction inoccupés et à 11 sites potentiels. Nous avons observé une différence importante entre la superficie d'habitat sablonneux des plages de reproduction inoccupées (10 987 m^2 +/- 8 321) par rapport à celle des plages potentielles (15 233 m^2 +/- 6 174) (tableau 19).

4.6.8.3.4 Pente de la plage

Les images de pentes créées par le modèle altimétrique numérique (tableau 21) ont permis d'obtenir les pentes minimales, maximales et moyennes. Les plages potentielles de reproduction avaient les pentes minimales et maximales les plus prononcées, tandis que les plages occupées avaient les plus faibles.

Tableau 21. Pentes minimales, maximales et moyennes des plages de reproduction du Pluvier siffleur occupées, potentielles et inoccupées.

Plage	Pente min.	Pente moy.	Pente max.
Occupées (n=2)	0	2,5	5
Potentielles (n=7)	0,57	3	7,72
Inoccupées (n=3)	0	5,8	6,33

4.6.8.3.5 Caractéristiques de la plage

Nous avons étudié les couches vectorielles ou les photographies aériennes de chaque site à l'étude et nous avons analysé les caractéristiques de la plage. Ce sont les plages occupées qui avaient la plus forte proportion de creux de déflation (0,45) de mares temporaires (0,45) et de fragments d'habitat forestier (0,64) (figure 23). Aucun site potentiel ne comprenait de creux de déflation ni de mares temporaires. Tous les sites inoccupés étaient adjacents à des arrière-baies ou des flèches de sable.

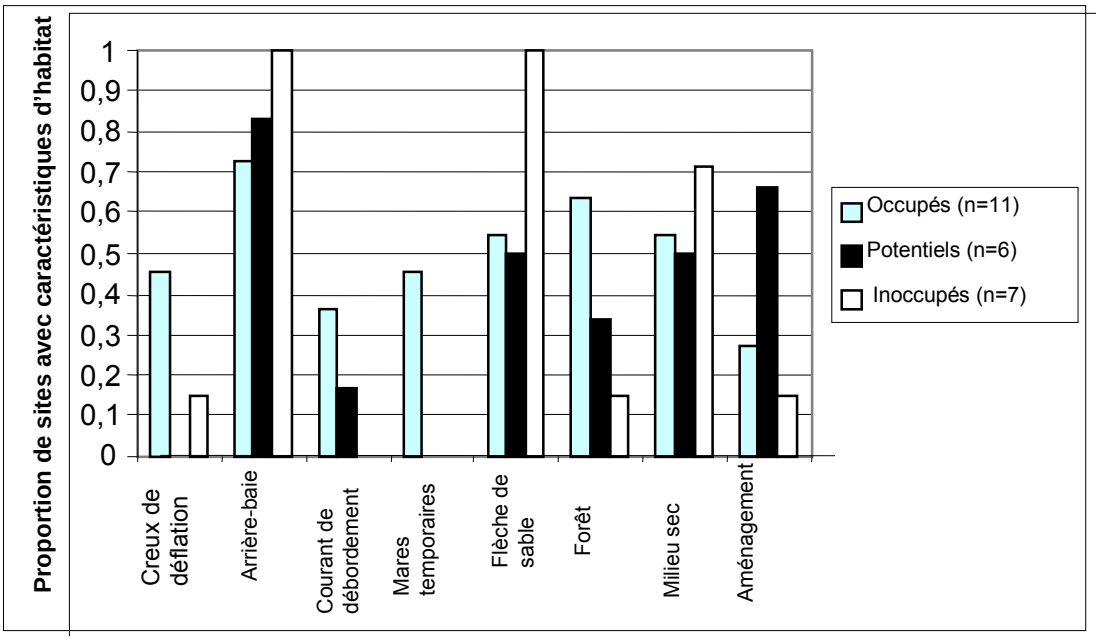


Figure 23. La proportion occupée (n=11), potentielle (n=6) et inoccupée (n=7) des plages de reproduction du Pluvier siffleur se caractérise par des creux de déflation, des arrière-plages, des courants de débordement, des mares temporaires, des flèches de sable, des segments de milieu forestier, des milieux secs et des constructions ou aménagements humains.

4.6.8.3.6 Tendance à Shemogue

Nous avons mesuré les attributs d'habitat à deux sites (Petit-Cap et Pointe Johnston) sur des images vectorielles représentant le littoral à ces endroits en 1944, 1953, 1963, 1971, 1982, 1996 et 2001. La longueur de la plage de Petit-Cap a diminué de 55 % de 1944 à 1953, puis augmenté de 30 % de 1953 à 2001 (figure 24). La longueur de la plage de la Pointe Johnston a diminué de 21 % de 1944 à 2001.

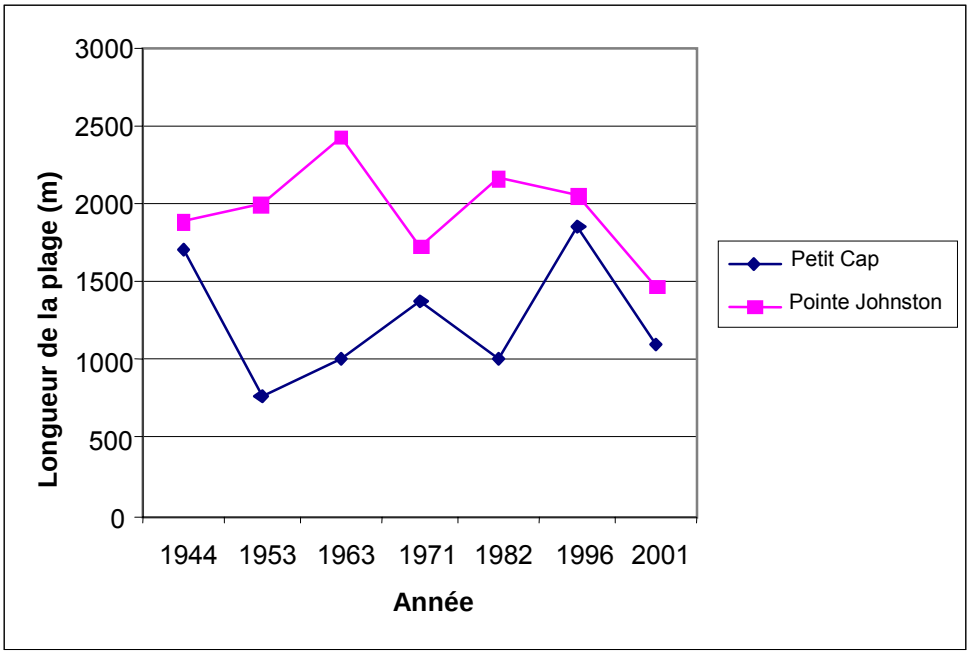


Figure 24. Longueur du littoral aux plages de Petit-Cap et Pointe Johnston de 1944 à 2001.

Nous avons quantifié la largeur des plages de Petit-Cap et de la Pointe Johnston en mesurant des transects à intervalles de 50 m le long du littoral. La largeur moyenne de la plage en 1971 avait augmenté par rapport à 1944 (Petit-Cap, 25 %; Pointe Johnston, 31 %). Toutefois, elle avait diminué aux deux endroits (de 48 % à Petit-Cap et de 34 % à la Pointe Johnston) en 2001 (figure 25).

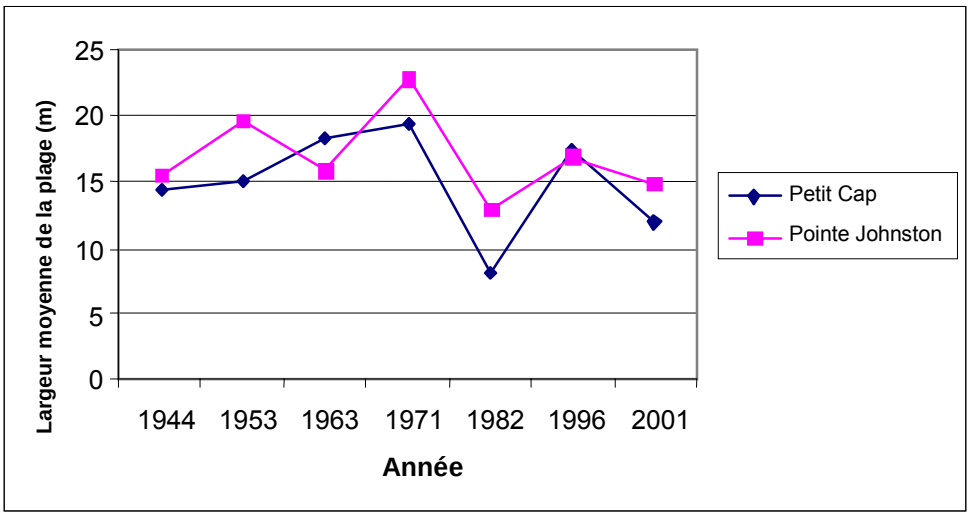


Figure 25. Largeur moyenne de la plage de Petit-Cap et de la Pointe Johnston de1944 à 2001.

Nous avons calculé la superficie de sable à Petit-Cap et à la Pointe Johnston de 1944 à 2001. La superficie de sable a augmenté aux deux sites de 1944 à 1971 (de 33 % et de

52 % respectivement). En 2001, toutefois, elle avait diminué aux deux sites, de 37 % (Petit-Cap) et de 63 % (Pointe Johnston) (figure 26).

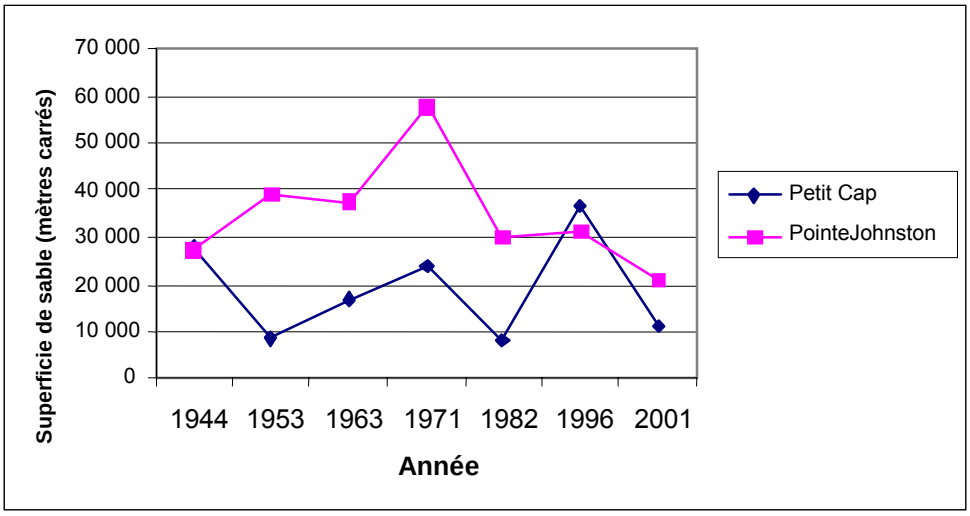


Figure 26. Superficie totale de sable à Petit-Cap et à la Pointe Johnston de 1944 à 2001.

4.6.8.4 Sommaire et conclusions

4.6.8.4.1 Conditions actuelles de l'habitat

Nous avons analysé et mesuré les caractéristiques de l'habitat sur les plages de reproduction occupées, inoccupées et potentielles au moyen des photographies aériennes, des couches vectorielles représentatives et de l'imagerie Quickbird. Nous avons observé de grandes différences d'attributs physiques de l'habitat entre les plages occupées, inoccupées et potentielles.

Les plages occupées étaient plus longues que les plages inoccupées et potentielles. Étant donné que les sites d'alimentation du Pluvier siffleur le long de la côte et dans la zone intertidale suivent le mouvement des marées (Cairns, 1977; Burger, 1984; Loegering et Fraser, 1995), la longueur des plages est une caractéristique très importante.

Plusieurs auteurs ont étayé l'importance de la largeur des plages (Prindiville Gaines et Ryan, 1988; Dundas, 1995; Boyne et Amirault, 1999; Stewart, 2004). On croit que, sur les plages plus larges, on peut trouver des nids au-delà de la laisse moyenne de haute mer et de la ligne de végétation, ce qui les protège davantage contre l'inondation et les prédateurs (Burger, 1987; Prindiville Gaines et Ryan, 1988; Espie *et al.*, 1996).

Nous avons mesuré la superficie de sable des sites inoccupés et potentiels. Nous n'avons pas calculé la variable très corrélée de la superficie des plages occupées, étant donné que celles-ci étaient beaucoup plus larges et plus longues que celles des sites inoccupés et potentiels. Nous n'avons observé aucune différence importante entre les sites inoccupés et potentiels quant à la quantité d'habitats de sable.

C'est sur les plages occupées qu'on retrouve les surfaces les moins inclinées et sur les sites potentiels que l'on retrouve les surfaces les plus inclinées. Cette constatation vient confirmer les observations antérieures de Boyne et Amirault (1999) selon lesquelles le Pluvier siffleur qui niche sur le golfe du Saint-Laurent occupe des sections de plage moins inclinées. Les plages moins inclinées, où on retrouve une avant-dune végétalisée, sont des habitats supérieurs pour la survie de la progéniture, car les oisillons s'y trouvent plus à l'abri du soleil, du vent, de la pluie et des prédateurs aviaires (Burger, 1987).

On trouve des creux de déflation sur plusieurs plages occupées. Ce sont de grandes surfaces peu végétalisées où s'est formée une brèche dans la dune. Des articles ont été publiés sur cette entité considérée comme un habitat important pour le Pluvier siffleur nicheur (Burger, 1987; Cairns, 1977, Boyne et Amirault, 1999; Stewart, 2004).

La plupart des sites à l'étude donnaient accès à une arrière-baie, ou étaient considérés comme une flèche de sable. On ne retrouve de courants de débordement et de mares temporaires que sur les plages occupées, à l'exception du quai de Saint-Édouard-de-Kent. Il s'agit d'une plage de reproduction potentielle avec un creux de déflation. Les plages qui sont une flèche de sable ou qui donnent accès à une arrière-baie sont considérées comme d'excellents habitats de reproduction pour le Pluvier siffleur. Stewart (2004) a observé que les plages occupées se caractérisent par une plus grande proportion de baies et de vasières.

Le Pluvier siffleur se nourrit sur le rivage ou dans la zone intertidale à marée basse, et il recule jusqu'à la ligne de varech, par exemple, pour se nourrir à marée haute (Cairns, 1977; Burger, 1984; Loegering et Fraser, 1995). Si la plage de reproduction donne accès à deux rivages, au lieu d'un seul, l'habitat d'alimentation s'en trouve doublé.

La plupart (63 %) des plages de reproduction du sud-est du Nouveau-Brunswick sont protégées et se trouvent dans des parcs. Très peu (15 %) de sites inoccupés ou potentiels sont des plages protégées. L'homme n'a pas modifié ces plages de reproduction protégées et il n'y a pas construit d'infrastructure tout près de la plage. Là où on retrouve beaucoup plus d'activités humaines de loisir, le taux de premier envol est plus bas, et les perturbations entraînent une diminution de la période d'alimentation et de la survie des adultes (Cairns et McLaren, 1980; Flemming, 1984; Flemming *et al*., 1988; Burger, 1991; Goldin et Regosin, 1998).

4.6.8.4.2 Tendances à Shemogue

Nous avons mesuré la longueur et la largeur moyennes des plages, ainsi que la superficie de sable à deux sites de la zone Shemogue, à partir d'images prises en 1944, 1953, 1963, 1971, 1982, 1996 et 2001. Bien que les plages changent beaucoup avec le temps, aucune tendance n'est associée à ces changements. Toutefois, l'analyse des résultats de l'ensemble de la zone Shemogue (O'Carroll *et al.*, 2006) a révélé que la quantité d'habitats de sable de la zone a diminué de 25 % entre 1944 et 2001. De même, la quantité de creux de déflation a diminué de 53 %, et le nombre d'infrastructures est passé de 0 % à 3% sur les habitats côtiers de cette zone (O'Carroll, 2004).

Ces observations indiquent que, alors que la quantité de plages de sable ou d'habitats du Pluvier siffleur diminue dans la zone, le nombre d'infrastructures augmente (et par conséquent les perturbations d'origine humaine). Il a été suggéré que c'est

l'augmentation des perturbations d'origine humaine plutôt que les modifications physiques de l'habitat qui explique l'abandon d'habitats de reproduction autrefois occupés.

Même si une plage donnée présente actuellement des caractéristiques d'habitat favorables à la reproduction du Pluvier siffleur, il ne faut pas oublier que les milieux côtiers sont très dynamiques, et qu'un site qui convient présentement risque de ne plus convenir plus tard, et vice-versa. Jusqu'à quel point la morphodynamique côtière aura-t-elle un impact sur la faune? Cela dépend de l'aptitude des espèces à exploiter d'autres habitats ou à se disperser (Dolman et Sutherland, 1995).

4.6.8.4.3 Gestion des habitats

Les résultats de cette étude et la littérature nous révèlent que les plages occupées se caractérisent par : une plus longue ligne de côte, de plus larges sections de plage et une plus grande superficie de sable; des plages et des dunes moins inclinées; la présence de creux de déflation ou de brèches dans la dune, et de flèches de sable; l'accès à une arrière-baie, à des courants de débordement ou à des mares temporaires; moins d'infrastructures adjacentes à la plage.

Avec l'élévation du niveau de la mer, on pourrait observer une perte d'habitats, et le Pluvier siffleur pourrait devoir nicher dans un habitat sous-optimal. C'est un sujet d'inquiétude puisqu'un habitat sous-optimal pourrait avoir des conséquences néfastes sur la productivité, bien que les recherches n'aient pas réussi à prédire le taux de la reproduction par l'analyse de l'habitat (Knetter *et al.,* 2002; Stewart, 2004). Les facteurs qui pourraient influer sur la productivité sont, entre autres, la nidification tout près d'un habitat de prédateur, en particulier si on n'enclôt pas les nids (Patterson *et al.,* 1991; Burger, 1991; Kruse *et al*., 2001; Knetter *et al.,* 2002), et la nidification sur des plages où la perturbation par l'homme est élevée (Cairns et McLaren, 1980; Flemming, 1984; Flemming *et al.,* 1988; Goldin et Regosin, 1998).

Par conséquent, pour bien gérer l'habitat du Pluvier siffleur à l'avenir, il est important de déterminer quelles régions subiraient le moins les conséquences d'une élévation du niveau de la mer. On croit que de telles régions ne seraient pas abandonnées par le Pluvier siffleur, car on sait qu'il abandonne en premier les territoires où l'habitat lui est moins favorable, pour en choisir qui soient de meilleure qualité (Boyne et Amirault, 1999). Le Pluvier siffleur est une espèce qui dépend de l'intervention humaine, pour laquelle il nous faut adopter des mesures de protection et de conservation afin qu'elle puisse survivre, étant donné le degré actuel d'aménagement des côtes et de perturbations humaines. C'est pourquoi il faut s'efforcer d'acquérir et de protéger les régions considérées comme étant de meilleure qualité pour la reproduction du Pluvier siffleur dans les années à venir, et de gérer les populations de prédateurs dans ces régions.

4.6.8.5 Références

Austin, G.E., et M.M. Rehfisch. 2003. The likely impact of sea level rise on waders (Charadrii) wintering on estuaries. Journal for Nature Conservation 11: 43-58.

Boyne, A.W., et D.L. Amirault. (1999). Habitat characteristics of Piping Plover nesting beaches in Nova Scotia, New Brunswick and Prince Edward Island. Pages 84-85 *in* K.F. Higgins, M.R. Brashier et C.D. Kruse (dir. de publ.). Proceedings, Piping

Plovers and Least Terns of the Great Plains and nearby. Brookings: South Dakota State University. p. 84-85

Burger, J. 1984. Abiotic factors affecting migrant shorebirds. *In* Burger, J., et B.L. Olla (dir. de publ.). *Shorebirds: Migration and Foraging Behaviour* (Vol. 6). New York: Plenum, p. 1-72.

Burger, J. 1987. Physical and social determinants of nest-site selection in Piping Plover in New Jersey. The Condor **89**: 811-818.

Burger, J. 1991. Foraging behaviour and the effect of human disturbance on the Piping Plover (*Charadrius melodus)*. Journal of Coastal Research, **7**: 39-52.

Cairns, W.E. 1977. Breeding biology and behavior of the Piping Plover (*Charadrius melodus)* in southern Nova Scotia. Mémoire de maîtrise. Université Dalhousie, Halifax, Nouvelle-Écosse.

Cairns, W.E., et I.A. McLaren. 1980. Status of the Piping Plover on the east coast of North America. Am. Birds **34**: 206-208.

Canadian Wildlife Service (CWS). 2004. New Brunswick Atlas of Piping Plover Beaches, 2nd Edition. Unpublished document. Canadian Wildlife Service, Atlantic Region, Sackville, NB.

Dolman, P.M., et Sutherland W.J. 1995. The response of bird populations to habitat loss. Ibis **137**: S38-S46.

Dundas, H.A. 1995. Breeding habitat selection by Piping Plovers (*Charadrius melodus*) in Southern Saskatchewan. Mémoire de maîtrise, Département de biologie, Université de la Saskatchewan, Saskatoon, 90 p.

Espie, R.H.M., M. Brigham et P.C. James. 1996. Habitat selection and clutch fate of Piping Plover (*Charadrius melodus)* breeding at Lake Diefenbaker, Saskatchewan. Revue canadienne de zoologie, **74**, 1069-1075.

Flemming, S.P. 1984. The status and responses of Piping Plovers to recreational activity in Nova Scotia. Mémoire de spécialisation, Université Acadia, Wolfville, Nouvelle-Écosse, 150 p.

Flemming, S.P., R.D. Chiasson, P.C. Smith, P.J. Austin-Smith et R.P. Bancroft. 1988. Piping Plover status in Nova Scotia related to its reproductive and behavioural responses to human disturbance. Journal of Field Ornithology, **59**: 321-330.

Galbraith, H., R. Jones, R. Park, J. Clough, S. Herrod-Julius, B. Harrington et G. Page. 2002. Global climate change and sea level rise: potential losses of intertidal habitat for shorebirds. Waterbirds **25**(2): 173-183.

Goldin, M.R., et J.V. Regosin. 1998. Chick behaviour, habitat use, and reproductive success of Piping Plovers at Goosewing Beach, Rhode Island. Journal of Field Ornithology, **69**: 228-234.

Goosen, J.P., et D.L. Amirault (dir. de publ.). 2004. The 1996 International Piping Plover census in Canada. Technical Report Series No 416. Service canadien de la faune, Edmonton, Alberta, et Sackville, Nouveau-Brunswick. 164 p.

Haig, S.M. 1992. Piping Plover. *In* A. Poole, P. Stettenheim et F. Gill (dir. de publ.). The birds of North America, No 2. The Academy of Natural Sciences and the American Ornithologists Union. Philadelphia, Penn, et Washington, D.C.

Knetter, J.M., R.S. Lutz, J.R. Cary et R.K. Murphy. 2002. A multi-scale investigation of Piping Plover productivity on Great Plains alkali lakes, 1994-2000. Wildlife Society Bulletin,**30**: 683-694.

Loegering, J.P., et J.D. Fraser. 1995. Factors affecting Piping Plover chick survival in different brood-rearing habitats. Journal of Wildlife Management, **59**: 646-655.

Melvin, S.M., A. Hecht et C.R. Griffin. 1994. Piping Plover mortalities caused by off-road vehicles on Atlantic Coast beaches. Wildlife Society Bulletin, **22**, 409-414.
O'Carroll, S. 2004. Rapport final de la cartographie multidate de la zone littorale du secteur à l'étude de Shemogue, sud-est du Nouveau-Brunswick. Rapport produit dans le cadre du projet : Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick, sous-projet Érosion des côtes. Remis à D. BÉRUBÉ (MRNN-B), D. FORBES (CGC) et A. HANSON (EC). 108 pages + carte géomorphologique.
Patterson, M.E., J.D. Fraser et J.W. Roggenbuck. 1991. Factors affecting Piping Plover productivity on Assateague Island. Journal of Wildlife Management, **55**: 525-531.
Prindiville Gaines, E., et M. Ryan. 1988. Piping Plover habitat use and reproductive success in North Dakota. Journal of Wildlife Management, **52**, 266-273.
Stewart, J. 2004. A multi-scale habitat suitability assessment for Piping Plover (*Charadrius melodus melodus)* in Prince Edward Island. Mémoire de maîtrise. Études sur les ressources et l'environnement, Université Dalhousie, Halifax, Nouvelle-Écosse. 168 p.

4.6.9 Impact des ondes de tempête sur la reproduction du Pluvier siffleur au parc national Kouchibouguac[25]

4.6.9.1 Introduction

Le Pluvier siffleur (*Charadrius melodus*) est un oiseau de rivage classé parmi les espèces en voie de disparition par le Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (COSEPAC). Cet oiseau ne se reproduit que dans trois parcs nationaux du Canada. Le parc Kouchibouguac, devenu parc national en 1979, se targue d'offrir plus de 23 km de plages sablonneuses et certains des meilleurs habitats potentiels de nidification du Pluvier siffleur dans les Maritimes (voir section 4.6.8.1).

De 1985 à 2005, on a enregistré une moyenne annuelle de 14,7 couples nicheurs dans le parc national Kouchibouguac. On a installé des exclos anti-prédation où il est possible de les surveiller régulièrement. On a augmenté les communications avec le public, y compris les programmes d'interprétation.

La plupart des interventions visent à réduire l'impact de la prédation et des perturbations dues à l'activité humaine sur le succès de la nidification du Pluvier siffleur. Toutefois, les inondations peuvent elles aussi avoir un impact négatif sur ce succès. Une étude (Corbett, 1997) a révélé que, au parc national de l'Île-du-Prince-Édouard, la proportion de nids détruits par les inondations varie de 4 % à 40 % (tableau 22).

Notre étude avait pour objectif de quantifier l'impact des tempêtes sur le succès de la nidification du Pluvier siffleur dans le parc national Kouchibouguac, et les changements qui pourraient survenir à ce chapitre avec l'élévation du niveau de la mer et le changement climatique.

[25] Auteurs : Éric Tremblay, Alan Hanson et George Parkes.

Tableau 22. Nids détruits par les inondations; parc national de l'Île-du-Prince-Édouard de 1983 à 1992; nids de pluviers siffleurs (Corbett, 1997)

Année	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	Total
Nids	31	34	34	28	42	59	245	23	54	32	382
Nids inondés	2	8	13	6	1	15		1	19	5	72
Perte en pourcentage	6,4	23,5	38,2	21,4	2,4	25,4	4,4	4,3	32,2	15,6	18,8

4.6.9.2 Méthodes

Pour une description complète des méthodes, voir Hanson, 2006.

4.6.9.2.1 Site à l'étude

Le parc national Kouchibouguac comprend des segments de milieu forestier, des marais salés, des bogs, des marécages et 23 km de dunes et de plages de sable retirées le long du détroit de Northumberland, au Nouveau-Brunswick. Le détroit est très peu profond près du rivage et le littoral est protégé de la houle du golfe du Saint-Laurent par l'Île-du-Prince-Édouard, qui longe le détroit, et les barres de sable au large.

4.6.9.2.2 Relevés de la nidification du Pluvier siffleur

On a recours à une technique normalisée depuis 1980 pour étudier le Pluvier siffleur dans les parcs nationaux. Ces études consistent à déterminer le nombre de couples nicheurs, à localiser les nids, à consigner le nombre d'œufs couvés, le nombre d'œufs éclos et, dans la plupart des cas, le nombre d'oisillons qui ont réussi à prendre leur premier envol.

4.6.9.2.3 Ondes de tempête à Pointe-Sapin et à Escuminac de 1964 à 2005

Nous avons utilisé les données sur le niveau de l'eau à Pointe-Sapin (de 1964 à 1972) et à Escuminac (de 1973 à 2005) pour recenser les ondes de tempête de plus de 60 cm pendant la saison de nidification du Pluvier siffleur (du 15 mai au 22 juillet). C'est à cette période de l'année que les tempêtes sont les moins fréquentes et, en moyenne, seulement 2 % de toutes les ondes de tempête enregistrées à Escuminac sont survenues en mai, seulement 1,5 % en juin et seulement 0,5 % en juillet (Parks *et al.*, 2006). La figure 1 illustre les données du niveau de l'eau pour 1995, une bonne année de reproduction du Pluvier siffleur à Kouchibouguac. Il s'agit d'un profil typique du niveau de l'eau pour cette période de l'année. On n'y détecte aucune tempête et très peu d'influences atmosphériques.

Lorsque des données sur le niveau de l'eau à Pointe-Sapin ou à Escuminac manquaient, nous utilisions celles de Pointe-du-Chêne ou de Charlottetown. Nous n'avons ainsi détecté qu'un seul épisode (le 15 juillet 1981), et nous l'avons reconstruit (approximativement) en ajoutant l'onde de tempête de Pointe-du-Chêne à la marée prévue à Escuminac.

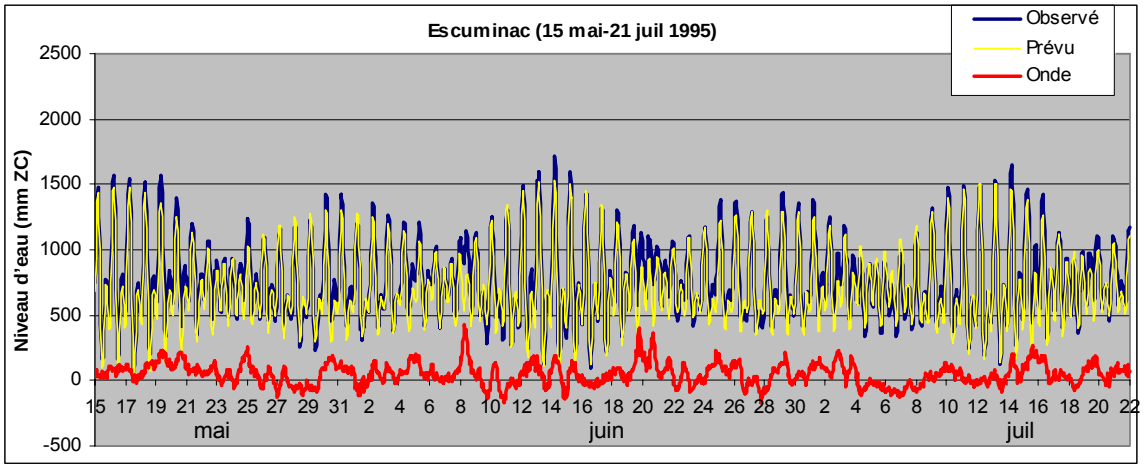


Figure 27. Données typiques du niveau de l'eau à Escuminac durant la saison de nidification du Pluvier siffleur.

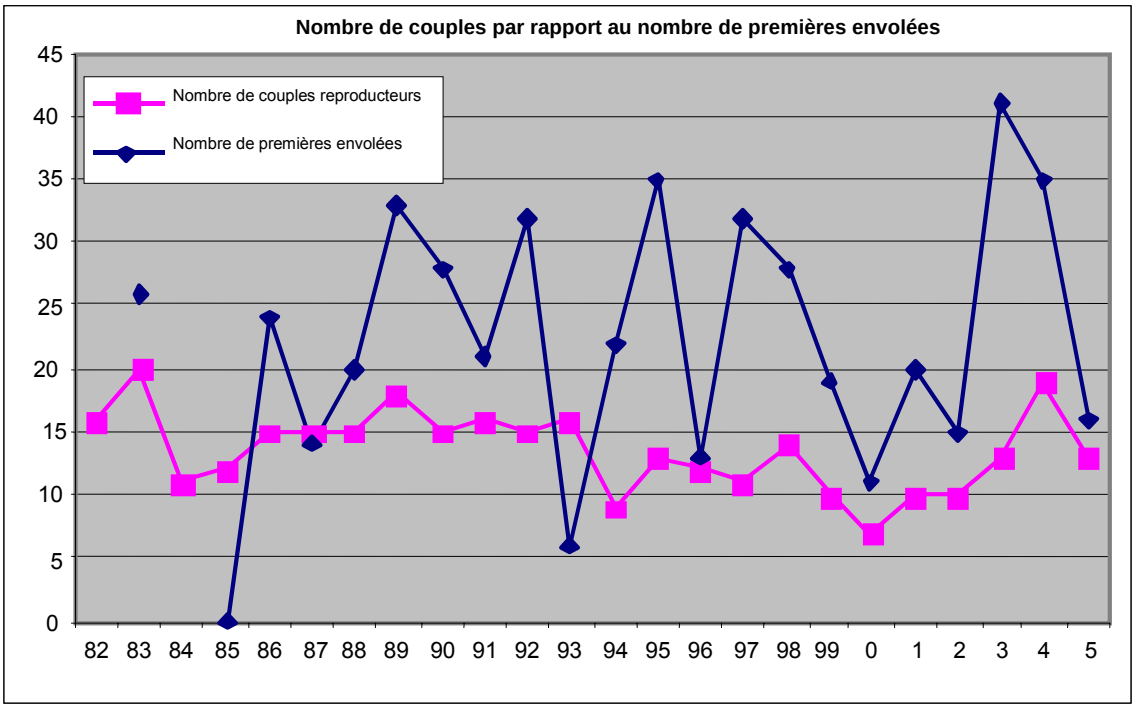


Figure 28. Nombre total de couples reproducteurs et nombre de premières envolées sur les plages du parc national Kouchibouguac de 1982 à 2005.

Tableau 23. Nombre de couples reproducteurs de pluviers siffleurs et de premières envolées observés au parc national Kouchibouguac de 1973 à 2005. NC signifie zone non couverte par le recensement.

Emplacement	Nombre de couples reproducteurs à chaque saison de reproduction																									
	73	79	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05
Plage de Pointe-Sapin	0	NC	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
Plage de Rivière-au-Portage	1	NC	0	1	0	0	2	0	3	3	3	3	3	3	2	1	2	2	2	1	1	4	3	1	6	0
Dune de Kouchibouguac Nord	2	NC	11	12	7	6	7	8	3	5	5	5	5	7	4	5	3	4	3	3	1	2	3	7	4	7
Île Kellys	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	SO	SO	SO	SO	SO	3
Dune de Kouchibouguac Sud	3	3	2	4	2	3	7	5	6	5	5	6	6	5	3	6	6	4	7	4	3	2	3	4	6	2
Île aux sternes	1	NC	1	1	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dune Richibucto Nord	3	NC	0	1	NC	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Île du Nord	1	NC	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	NI
Nombre total de couples	11	3	16	21	11	12	16	15	13	16	15	16	15	17	9	13	12	11	14	10	6	9	10	13	18	13
Nombre total de premières envolées	—	—	—	26	—	0	24	14	20	33	28	21	32	6	22	35	13	32	28	19	11	20	15	40	35	16
Nombre de jeunes par rapport au nombre de couples reproducteurs	—	—	—	1,2	—	0,0	1,5	0,9	1,5	2,1	1,9	1,3	2,1	0,4	2,4	2,7	1,1	2,9	2,0	1,9	1,8	2,2	1,5	3,1	1,9	1,2

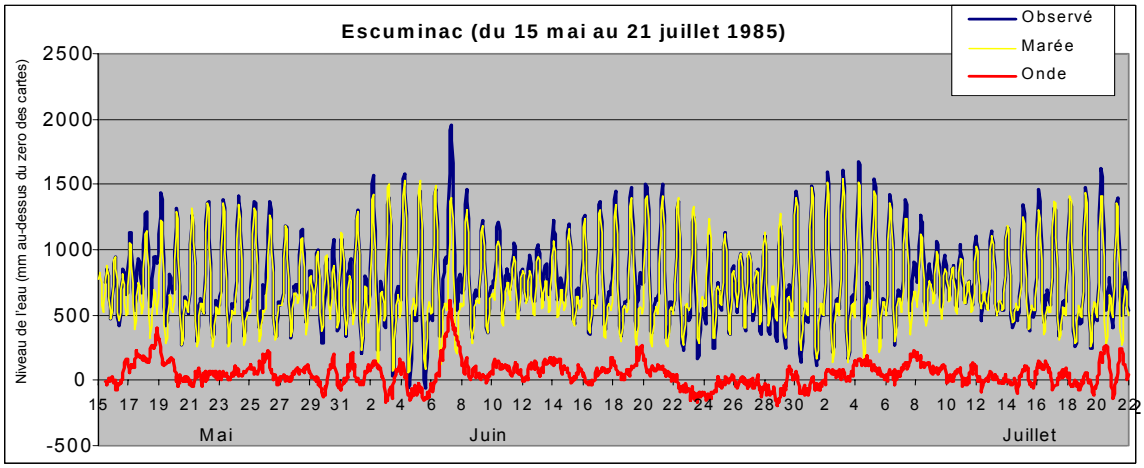


Figure 29. Niveau de l'eau (mm au-dessus du zéro des cartes) d'après le marégraphe de Pointe Escuminac du 15 mai au 21 juillet 1985.

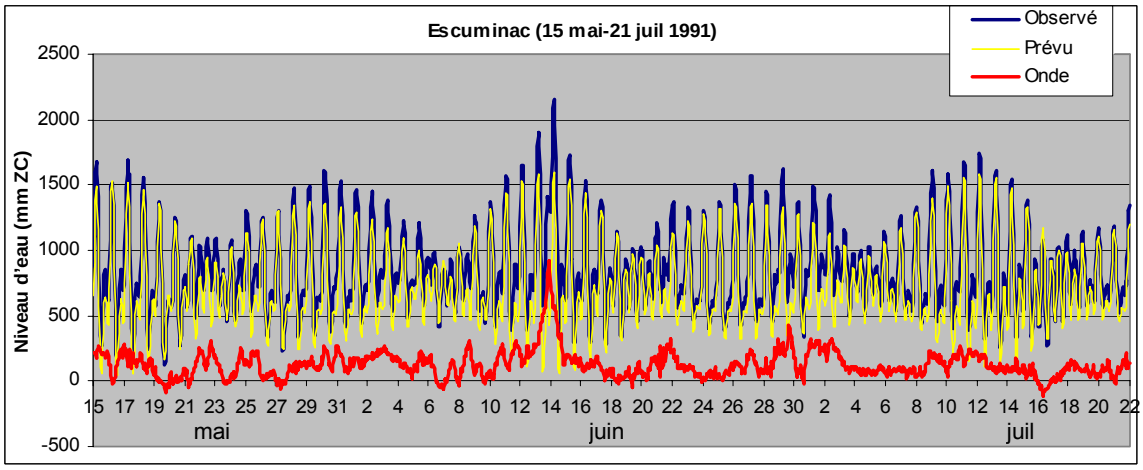


Figure 30. Niveau de l'eau (mm au-dessus du zéro des cartes) d'après le marégraphe de Pointe Escuminac du 15 mai au 21 juillet 1991.

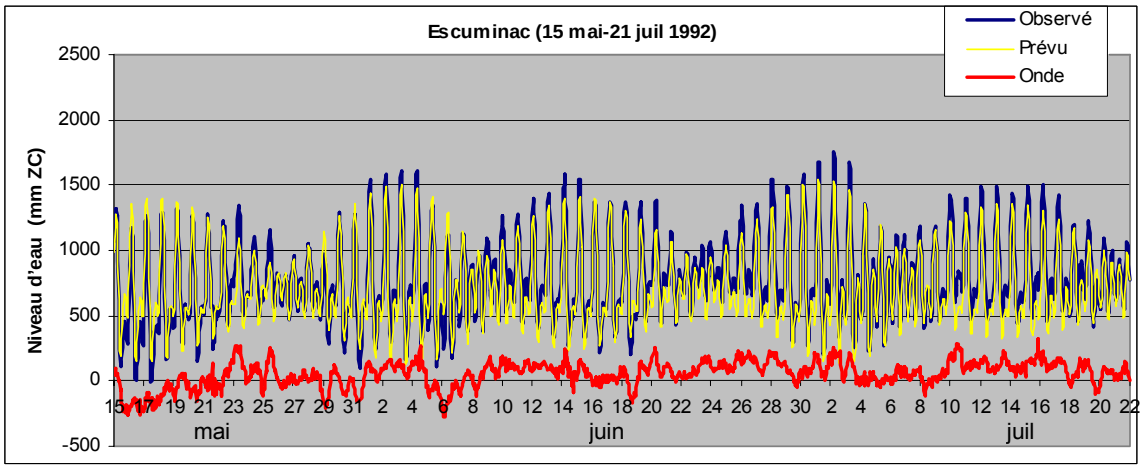


Figure 31. Niveau de l'eau (mm au-dessus du zéro des cartes) d'après le marégraphe de Pointe Escuminac du 15 mai au 21 juillet 1992.

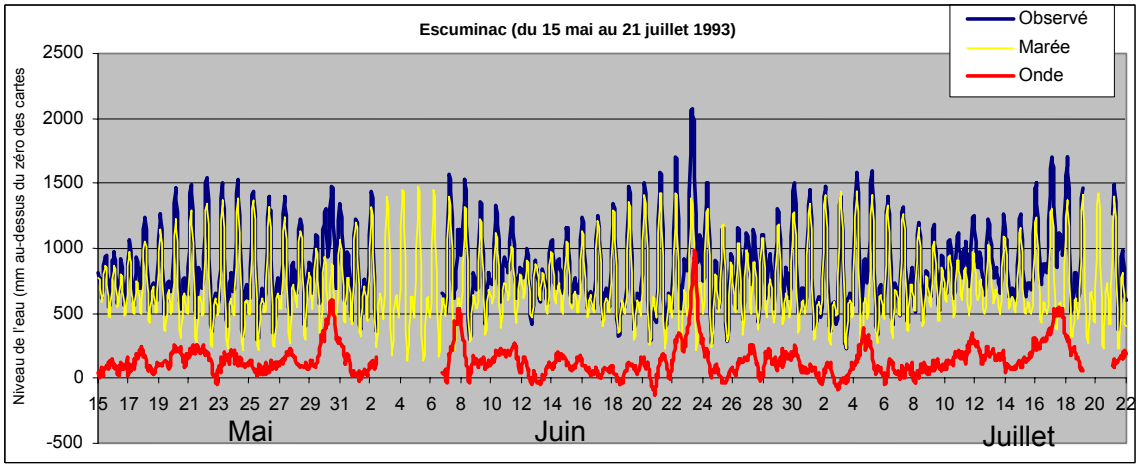


Figure 32. Niveau de l'eau (mm au-dessus du zéro des cartes) d'après le marégraphe de Pointe Escuminac du 15 mai au 21 juillet 1993.

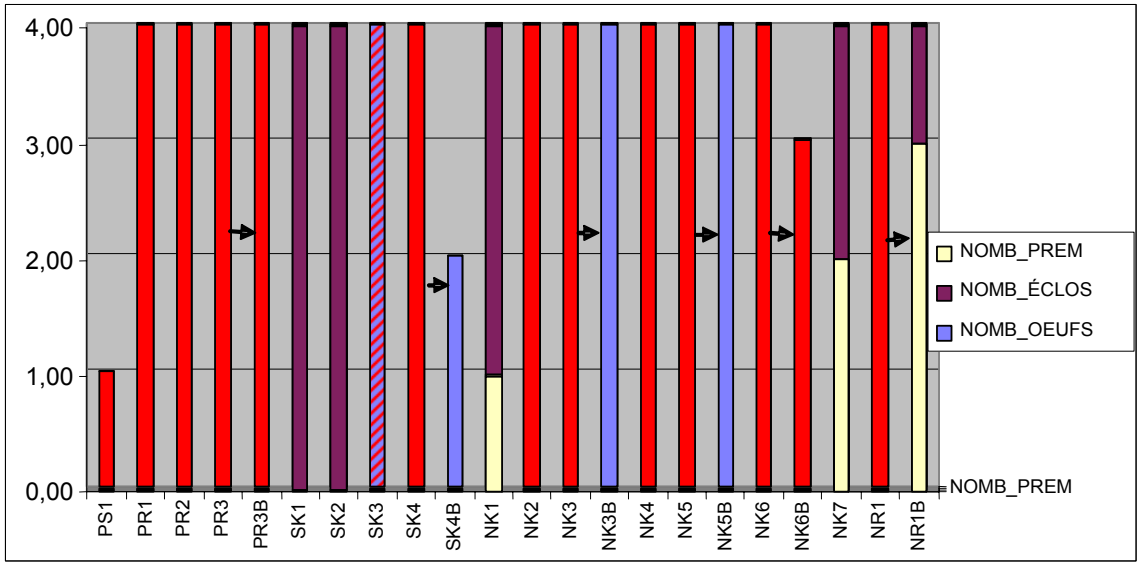


Figure 33. Nidifications réussies du Pluvier siffleur en 1993. Le rouge indique les nids inondés. Les flèches indiquent la deuxième tentative de nidification.

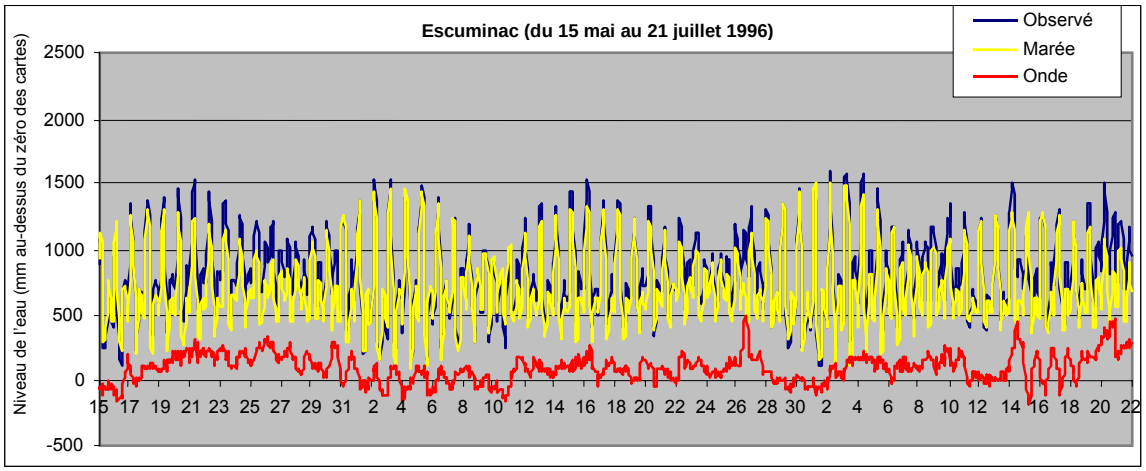


Figure 34. Niveau de l'eau (mm au-dessus du zéro des cartes) d'après le marégraphe de Pointe Escuminac du 15 mai au 21 juillet 1996.

4.6.9.3 Résultats

4.6.9.3.1 Couples reproducteurs et taux de reproduction du Pluvier siffleur

Le tableau 23 indique le nombre de couples territoriaux de pluviers siffleurs et de jeunes qui ont pris leur premier envol à divers sites de nidification du parc national Kouchibouguac. Le nombre d'adultes qui ont tenté de se reproduire et le taux de succès varient beaucoup d'une année à l'autre (figure 28). On n'a observé aucune première envolée en 1985 (figure 28). Les observations sur le terrain, en 1985, suggèrent que l'échec de la reproduction a été provoqué par une tempête estivale qui a inondé les nids. Les données d'Escuminac révèlent que, le 8 juin, une tempête associée à une marée haute de nouvelle lune et à une grosse onde de tempête (figure 29) a fait monter le niveau de l'eau à plus de 2 m au-dessus du zéro des cartes.

On a également observé un faible taux de succès en 1991, associé à une violente tempête survenue le 14 juin, alors qu'une marée de nouvelle lune a coïncidé à une onde de tempête de 0,575 m au-dessus du zéro des cartes, faisant monter le niveau de l'eau à 2,12 m au-dessus du zéro des cartes à Escuminac (figure 30). Les observations sur le terrain fournissent des preuves que l'échec est dû à l'inondation de huit nids. Par contre, il n'y a pas eu d'onde de tempête en 1992 et le taux de succès est plus élevé (figures 28, 31).

Le taux de reproduction a encore baissé en 1993 (figure 28). Les observations sur le terrain révèlent que trois nids ont été inondés vers le 1er juin, 13 vers le 24 juin, un vers le 10 juillet et un vers le 19 juillet (figure 33). Lors d'une tempête survenue le 23 juin, on a enregistré un niveau d'eau de 2,07 m au-dessus du zéro des cartes, et une onde de tempête de 0,73 m au-dessus du zéro des cartes, au plus fort de la saison de nidification (figure 32). Des niveaux d'eau de 1,5 m au-dessus du zéro des cartes le 1er juin, 1,6 m le 5 juillet et 1,7 m le 18 juillet sont probablement responsables de l'inondation des nids situés plus bas (figure 32). La violente tempête du 23 juin, en plein cœur de la saison de nidification, explique en grande partie la faible densité de population du Pluvier siffleur au parc national Kouchibouguac en 1993.

Le taux de reproduction a été faible également en 1996. La cause officielle de la perte de nids n'a pas été établie, les œufs de neuf nids n'ayant pas éclos. Les données d'Escuminac indiquent que le faible taux de reproduction n'est pas attribuable à l'inondation (niveaux de l'eau de 1,5 à 1,6 m les 2 et 3 juillet) (figure 34).

4.6.9.3.2 Ondes de tempête à Pointe-Sapin et à Escuminac de 1964 à 2005

Étant donné que les niveaux de l'eau ont des conséquences sur le taux de nidification du Pluvier siffleur, nous avons étudié les niveaux historiques de l'eau à Pointe Escuminac, en vue de déterminer la fréquence des tempêtes durant la saison de nidification du Pluvier siffleur. Nous avons détecté neuf ondes de tempête de 0,6 m ou plus (voir tableau 24), soit une seule de 1964 à 1969, de même qu'au cours des années 1970, trois au cours des années 1980 et quatre au cours des années 1990. Il n'y en a pas encore eu dans les années 2000. Cette période relativement courte ne permet pas de déterminer si cette variation décennale représente une tendance, mais elle indique qu'une série de tempêtes a pu contribuer au déclin de la population du Pluvier siffleur au cours des 20 dernières années.

Tableau 24. Ondes de tempête enregistrées à Pointe Escuminac. La « durée » est le nombre d'heures pendant lesquelles l'onde est restée à plus de 60 cm.

Onde	Date	Année	Durée (heures)	Élév. de l'onde (m > ZC)	Niveau max. de l'eau (m > ZC)
1	7 juillet	1969	2	0,64	1,13
2	12 juin	1976	7	0,83	2,30
3	10 juin	1981	13	0,71	1,66
4	15 juillet	1981	8	0,83	1,88
5	7 juin	1985	0	0,59	1,95
6	11 juillet	1989	2	0,61	1,48
7	13-14 juin	1991	10	0,89	2,16
8	23 juin	1993	9	0,96	2,07
9	26 mai	1997	5	0,65	1,57
10	5 juin	1998	2	0,61	1,44

Les données sur les vagues recueillies dans le cadre de cette étude confirment une corrélation étroite entre l'élévation de l'onde de tempête et la hauteur des vagues au large de la côte du sud-est du Nouveau-Brunswick, de telle sorte que l'élévation de l'onde peut servir, jusqu'à un certain point, à déduire la hauteur approximative des vagues. L'onde de tempête, toutefois, ne coïncide pas toujours avec la marée haute, et ne génère pas nécessairement un niveau d'eau moyen anormalement élevé, mais les vagues qui l'accompagnent viendront se briser relativement haut sur la plage. Les ondes de tempête à marée haute sont, comme toujours, la principale source d'inquiétude. Les marées astronomiques maximales (H.A.T.) d'Escuminac sont d'environ 1,7 m au-dessus du zéro des cartes. Des dix ondes de tempête du tableau ci-dessus, cinq sont survenues à marée basse ou presque (ondes 1, 3, 6, 9 et 10), et n'ont pas atteint la valeur des H.A.T. Les cinq autres (qui étaient généralement plus hautes et qui ont duré plus longtemps) ont dépassé, parfois de beaucoup, la valeur des H.A.T.

Il convient de noter que, avec les marées les plus hautes, de petites ondes de tempête pourraient entraîner des niveaux d'eau plus élevés, c'est-à-dire qu'une onde de 30 cm à

marée astronomique maximale atteindrait 2 m au-dessus du zéro des cartes, et qu'une onde de 40 cm atteindrait 2,1 m au-dessus du zéro des cartes. La hauteur des petites ondes de tempête, toutefois, exercerait un moindre impact, car les vagues maritimes qui les accompagneraient seraient beaucoup moins fortes. Nous avons recherché dans la base de données les niveaux de l'eau supérieurs à 1,8 m au cours de la saison de reproduction du Pluvier siffleur, et nous n'avons détecté que quatre ondes de tempête :

- 1,81 m au-dessus du zéro des cartes le 27 mai et le 23 juin 2005 avec des différentiels très faibles (16 cm et 10 cm) mais en combinaison avec la marée maximale;
- 1,8 m au-dessus du zéro des cartes le 15 juin 1984 avec une onde de tempête de 45 cm en combinaison avec la marée haute;
- 1,94 m au-dessus du zéro des cartes le 27 mai 1994 avec une onde de tempête de 56 cm en combinaison avec la marée haute.

L'onde du 27 mai 1994 est le seul autre épisode figurant dans la base de données qui aurait pu avoir des conséquences significatives sur le Pluvier siffleur. Mais on était encore tôt dans la saison de nidification et le personnel du parc national Kouchibouguac n'avait encore recensé qu'un seul couple nicheur, lequel semblait situé sur un site élevé bien protégé.

L'épisode numéro 2 du tableau 24, survenu le 12 juin 1976, était une tempête très significative. Elle figure au 10^{e} rang de la liste des tempêtes qui ont provoqué une élévation importante du niveau de l'eau au cours des 43 années et sont couvertes par la base de données annuelles de Pointe-Sapin et d'Escuminac (Parkes *et al.*, 2006a, section 4.2 du présent rapport). Le niveau de l'eau a atteint 2,3 m au-dessus du zéro des cartes (figure 35), soit tout juste 17 cm de moins que l'élévation record provoquée par l'ouragan Gladys le 21 octobre 1968. C'était avant qu'on commence à observer le Pluvier siffleur au parc national Kouchibouguac, mais le fait que cette tempête soit survenue au plus fort de la saison de nidification permet de supposer qu'elle a exercé un impact très dévastateur sur les oiseaux et leur habitat.

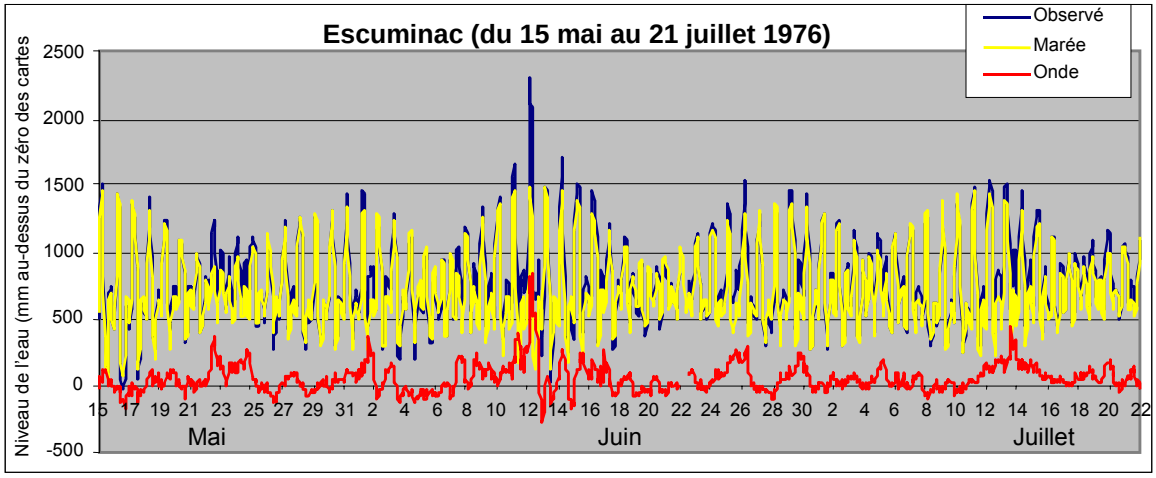


Figure 35. Données sur le niveau de l'eau durant la saison de nidification du Pluvier siffleur en 1976.

4.6.9.3.3 Ondes de tempête à Charlottetown de 1938 à 2005

Nous avons recherché les ondes de tempête de 60 cm durant la saison de nidification du Pluvier siffleur dans la base de données sur les ondes de tempête à Charlottetown de 1938 à 2005, préparée pour la section sur la climatologie des ondes de tempête du présent rapport (section 4.2.4). Nous avons étudié les tendances décennales, car cette base de données couvre une période plus longue que celle d'Escuminac. Nous n'avons détecté que quatre ondes de tempête, soit moins qu'à Pointe-Sapin et Escuminac (tableau 4). Il se peut que nous ayons détecté moins d'ondes de tempête à Charlottetown qu'à Escuminac parce que l'endroit est en quelque sorte mieux protégé. Il faut également noter que la plupart des pluviers siffleurs de l'Île-du-Prince-Édouard nichent sur la rive nord.

Tableau 25. Ondes de tempête de plus de 0,6 m au-dessus du zéro des cartes à Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard, de 1938 à 2005.

Onde	Date	Année	Durée (heures)	Élév. de l'onde (m > ZC)	Niv. max. de l'eau (m > ZC)
1	25 mai	1953	4	0,79	2,54
2	20 juin	1959	2	0,63	2,28
3	23 mai	1972	1	0,65	2,74
4	5 juillet	1979	1	0,66	--

Quatre des dix ondes observées à Pointe-Sapin et Escuminac ont atteint une hauteur de 50 à 60 cm à Charlottetown. Les six autres étaient des différentiels de l'ordre de 30 à 50 cm.

La tempête des 19 et 20 juin 1959 est le seul cyclone tropical parmi les 14 ondes de tempête survenues durant la saison de nidification du Pluvier siffleur. On appelle parfois cette tempête le « désastre d'Escuminac », car elle a surpris en mer les pêcheurs de saumon d'Escuminac, ce qui s'est soldé par des conséquences tragiques et des pertes de vie. L'onde de tempête de Charlottetown était décalée par rapport à la marée et s'est manifestée pendant des marées de printemps. Sur les côtes du Nouveau-Brunswick, il y

avait des vents de force tempête du nord-est (puisque la tempête était centrée au-dessus du détroit de Northumberland) et l'onde de tempête était presque certainement plus importante. On a enregistré de très hautes marées avec cette tempête (Saunders, 1960), les vagues ayant submergé les quais dans la région de Newcastle (Kindervater, 1984) avec des déferlements d'une violence inouïe sur le rivage.

4.6.9.4 Sommaire et conclusions

Plusieurs études ont déjà décrit l'impact négatif des perturbations anthropiques sur la reproduction du Pluvier siffleur. Une étude sur la reproduction d'une population de pluviers siffleurs (Strauss, 1990) à Cape Cod au Massachusetts, de 1982 à 1989, a révélé que cette population était plus ou moins exposée aux perturbations humaines, que ce soit le passage occasionnel d'un piéton ou la circulation intense de véhicules motorisés hors route. Strauss a constaté que le succès de la reproduction (premières envolées par couple par année) était supérieur chez les pluviers qui nichaient dans des régions moins perturbées (1,12) que dans des régions très perturbées (0,47) par l'homme. Le taux d'éclosion des œufs ne varie pas beaucoup d'un endroit à l'autre, mais la probabilité que l'oisillon prenne son premier envol est plus élevée dans les régions moins perturbées par l'activité humaine (54 % par rapport à 23 %). Une autre étude (McIvor, 1990) sur le Pluvier siffleur à Outer Cape Cod au Massachusetts, de 1985 à 1988, a révélé un taux d'éclosion de 14,5 % à 66,3 % à 9 sites à l'étude. Le taux de première envolée variait de 41,5 % à 78,3 % et le nombre de jeunes qui ont pris leur premier envol par couple a été de 0,3 à 1,33 durant cette période.

Une analyse de Parcs Canada sur le Pluvier siffleur dans les trois parcs nationaux canadiens, de 1985 à 1997, a révélé que le taux de reproduction était assez élevé (1.61 premières envolées par couple par année) par rapport aux populations étudiées par Strauss ou McIvor en 1990, et que la probabilité que l'oisillon prenne son premier envol était supérieure (68 %) à celle de la population la moins perturbée de l'étude de Strauss (Corbett, 1997). Ces résultats suggèrent que les mesures de conservation appliquées par Parcs Canada ont réellement permis de réduire l'impact des perturbations humaines et des prédateurs sur le taux de la reproduction. Par contre, le rapport des premières envolées par couple au parc national Kouchibouguac, de 1985 à 2005, indique que le résultat de la reproduction, certaines années, était inférieur à 1 (tableau 1).

Nos analyses des niveaux d'eau et des ondes de tempête durant les saisons de reproduction de 1985, 1991 et 1993, dont le taux de première envolée par adulte était de zéro, de 1,3 et de 0,4 respectivement, révèlent que les tempêtes peuvent avoir un impact catastrophique sur le succès de la reproduction. L'impact des tempêtes sur le résultat global de la reproduction du Pluvier siffleur au parc national Kouchibouguac dépend de l'élévation relative des sites de nidification en plus du nombre de nids actifs au moment de la tempête. Les tempêtes associées à des niveaux d'eau d'environ 1,5 m au marégraphe d'Escuminac n'ont inondé qu'une petite proportion de nids, alors que le niveau d'eau de 2 m associé aux tempêtes de 1985, 1991 et 1993 a apparemment inondé la plupart des nids. L'autre facteur qui influe sur la gravité de l'impact des tempêtes est le moment où elles surviennent par rapport au stade de la reproduction. Après la tempête du 14 juin 1991, on a observé des tentatives de nidification et de renidification. La tempête du 24 juin 1993 a eu un impact dévastateur sur la reproduction parce qu'elle est survenue tard durant la période de couvaison et que de nouvelles tentatives n'étaient plus possibles. Par contre, la tempête du 8 juin 1985 a complètement

anéanti les efforts de reproduction. Il se peut que l'absence d'une deuxième nidification s'explique par l'intense activité humaine qui a commencé à perturber les plages de reproduction à compter du milieu du mois de juin. On a adopté dans les années 1990 des mesures de gestion destinées à diminuer les perturbations dues à l'activité humaine.

L'impact des tempêtes sur la reproduction du Pluvier siffleur s'ajoute, en fait, à celui de la prédation et de l'activité humaine. Réduire l'activité humaine augmenterait la probabilité d'une nouvelle tentative de reproduction du Pluvier siffleur si les nids sont détruits par une tempête au début de juin. Les tempêtes sont considérées par les gestionnaires de la faune comme des processus aléatoires sur lesquels on ne peut intervenir. Par contre, on pourrait en atténuer l'impact sur la reproduction du Pluvier siffleur en prenant des mesures pour que son habitat de reproduction sur la plage soit relativement plus élevé. Étant donné que les modèles d'onde de tempête permettent de prédire (voir Thompson *et al.*, 2006) les tempêtes, il peut être possible d'effectuer des interventions musclées, telles que l'usage de sacs de sable, par exemple, pour empêcher l'inondation, ou le retrait des œufs des nids pour les placer en incubateurs le temps que passe une onde de tempête d'au moins 1,8 m prédite par les modèles.

Nous ne disposons d'aucune statistique concluante sur les niveaux d'eau historiques qui puisse prouver que la fréquence des tempêtes de juin est en hausse dans le sud du golfe du Saint-Laurent. Il n'y a pas non plus de consensus sur le fait que les changements climatiques augmentent la fréquence des tempêtes. Les efforts de conservation du Pluvier siffleur doivent continuer de viser surtout à réduire la prédation et l'activité humaine, qui ont des conséquences néfastes sur le succès des nidifications et des deuxièmes tentatives de nidification.

4.6.9.5 Références

Corbett G.N., 1997. Conservation of the Endangered Piping Plover (*Charadrius melodus*) in Canada's National Parks. Service canadien des parcs, Bureau régional de l'Atlantique, Halifax, Nouvelle-Écosse.

Hanson, A.R. (dir. de publ.). 2006. Ecosystem impacts of sea-level rise and climate change on the coastal zone of south-eastern New Brunswick. Rapport technique n° 463. Service canadien de la faune, Région de l'Atlantique, Sackville, Nouveau-Brunswick, Canada. 223 p.

Kindervater, A.D. 1984. Flooding events in New Brunswick an historical perspective. Direction de la planification et de la gestion des eaux, Direction générale des eaux intérieures. Région de l'Atlantique. Environnement Canada. Rapport IWD-AR-WPMB-84-65.

MacIvor, L.H., 1990. Population dynamics, breeding ecology and management of Piping Plovers on outer Cape Cod, Massachusetts. Mémoire de maîtrise, Université du Massachusetts, Boston.

Saunders, Roy. 1960. The Escuminac Disaster. Oldbourne Book Co Ltd, London

Strauss, E. 1990. Reproductive success, life history patterns, and behavioral variation in a population of Piping Plovers subjected to human disturbance. Thèse de doctorat, Université Tufts, MA.

4.6.10 Impact de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et du changement climatique sur les populations de Pluviers siffleurs[26,27]

4.6.10.1 Introduction

Le Pluvier siffleur (*Charadrius melodus*) se reproduit à plusieurs endroits en Amérique du Nord, et la population de la côte atlantique (C*. m. melodus*) figure présentement sur la liste des espèces en voie de disparition du Comité sur la situation des espèces en péril au Canada (voir Section 4.6.8.1).

Il pèse de nombreuses menaces potentielles sur ses habitats de migration et d'hivernage, dont nous ne connaissons pas les conséquences sur sa survie. Le climat et les changements climatiques peuvent avoir des conséquences sur l'habitat de reproduction du Pluvier siffleur (Stewart *et al.*, 2006) et sa reproduction (Tremblay *et al.*, ce rapport). Toutefois, l'importance relative de ces facteurs ne peut être déterminée que dans le cadre d'un cycle annuel complet. Cette section vise à fournir des renseignements sur la dynamique actuelle de la population; une évaluation des conséquences possibles de futurs impacts et changements subis par l'habitat en raison des changements climatiques; et des suggestions de mesures d'intervention en vue de conserver l'espèce.

4.6.10.2 Méthodes

4.6.10.2.1 Population étudiée

Au Canada atlantique, le Pluvier siffleur niche à des densités relativement faibles sur des plages dispersées dans les provinces de la Nouvelle-Écosse, du Nouveau- Brunswick, de l'Île-du-Prince-Édouard et de Terre-Neuve, et sur les Îles-de-la-Madeleine au Québec (figure 36). La population du golfe du Saint-Laurent est considérée comme une population séparée de celle du sud de la Nouvelle-Écosse.

Les données recueillies sur la reproduction comprennent un recensement annuel de la plage, des observations détaillées sur la reproduction et l'identification des adultes et des jeunes au moyen d'une bague de métal portant un code différent pour chaque oiseau (Amirault *et al.*, 2006). Le recensement suggère que les sous-populations ont augmenté d'une façon assez régulière ces dernières années, à un taux annuel de 2,8 % (dans le golfe) et de 5,7 % (dans le sud de la Nouvelle-Écosse), de 1998 à 2003 (en supposant une croissance exponentielle) (figure 36). Toutefois, les estimations de l'abondance indiquent que les deux sous-populations demeurent bien en deçà des cibles de rétablissement énoncées (Amirault, 2004).

4.6.10.2.2 Structure du modèle de population

Les oiseaux bagués (Amirault *et al.*, 2006) ont permis d'élaborer un modèle de population du Pluvier siffleur de l'est du Canada (Calvert *et al.*, 2006). Au moyen des modèles de

---

[26] Auteurs : Alan Hanson, Diane Amirault et Anna Calvert.

[27] Le financement des modèles de population du Pluvier siffleur a été fourni par la subvention n° 180 du Fonds interministériel pour le rétablissement, remise à M. Donald Forbes, que nous remercions pour nous avoir permis de collaborer avec lui au projet sur l'élévation du niveau de la mer. Nous aimerions également remercier nos collègues F. Shaffer, K. Baker, A. Boyne, J. McKnight, J. Stewart, R. Elliot et P. Taylor pour leur collaboration à des travaux publiés antérieurement, essentiels au présent exposé.

capture-recapture du programme MARK (White et Burnham, 1999), nous avons estimé les probabilités annuelles de survie à l'aide des oiseaux bagués sur les sites de reproduction, puis observés ou capturés aux saisons de reproduction suivantes (on trouvera plus de détails dans Amirault *et al.*, 2005, 2006).

4.6.10.2.3 Perturbations et rétablissement de la population

Nous avons étudié l'impact de différents scénarios de perturbation sur la population du Pluvier siffleur :

- Scénario 1. Augmentation de la fréquence des tempêtes ou élévation du niveau de la mer
- Scénario 2. Développements, perturbations et destructions par l'homme
- Scénario 3. Efforts de conservation

4.6.10.3 Résultats

Les modèles de population élaborés par Calvert (Calvert *et al.*, présenté) suggèrent que le nombre de pluviers siffleurs du golfe du Saint-Laurent diminue à raison d'environ 3,6 % par année (λ=0,9651), et que la population du sud de la Nouvelle-Écosse est stable (λ=1,0043; tableau 26). En outre, les deux résultats (sud de la Nouvelle-Écosse et golfe du Saint-Laurent) suggèrent que, de tous les indices vitaux de la population, la survie des adultes exerce, en proportion, un impact plus grand sur la croissance de la population que celle des jeunes ou tout autre paramètre de la reproduction, et que c'est le succès de la reproduction en fonction de l'âge qui a le moins d'impact sur la croissance de la population.

On estime que le taux de survie des jeunes serait plus élevé dans le sud de la Nouvelle-Écosse, comparativement au golfe, ce qui devrait entraîner une croissance plus rapide de la population dans le sud de la Nouvelle-Écosse Par conséquent, si la population du golfe diminue, et que la population du sud de la Nouvelle-Écosse reste stable, la différence du taux de survie des jeunes pourrait en grande partie expliquer cet écart (figure 36). Toutefois, cela suggère également que toute erreur systématique d'estimation du taux de survie des jeunes de l'une ou l'autre sous-population risquerait de donner une mauvaise idée de la différence de dynamique entre les sous-populations.

Tableau 26. Paramètres démographiques du modèle de population du Pluvier siffleur.

Paramètre	*Note*	*Définition*	*Sud de la Nouvelle-Écosse.*	*Golfe*
Survie des adultes	Φ_A	Probabilité de survie de l'adulte (SY^+) 12 mois après le recensement	0,7324	0,7331
Survie des jeunes (après l'éclosion)	Φ_J	Probabilité de survie du jeune (HY) 12 mois après le recensement	0,3279	0,2395
Succès relatif au premier envol	*f*	Probabilité que l'oisillon survive après son premier envol	0,6171	0,7014
Survie des jeunes (après le premier	Φ_J^w =	Probabilité que le jeune (HY) survive après son premier	0,5314	0,3415

Paramètre	*Note*	*Définition*	*Sud de la Nouvelle-Écosse.*	*Golfe*
envol)	Φ_J/f	envol		
Recrutement la deuxième année	y_S	Probabilité que l'oiseau niche la deuxième année (SY)	0,8095	0,8504
Recrutement la troisième année	y_T	Probabilité que l'oiseau niche la troisième année (TY)	0,9910	0,9823
Nombre d'œufs pondus	*E*	Nombre moyen d'œufs par nid	3,8065	3,9389
Succès relatif à l'éclosion	*h*	Probabilité qu'un œuf éclose	0,4603	0,5120

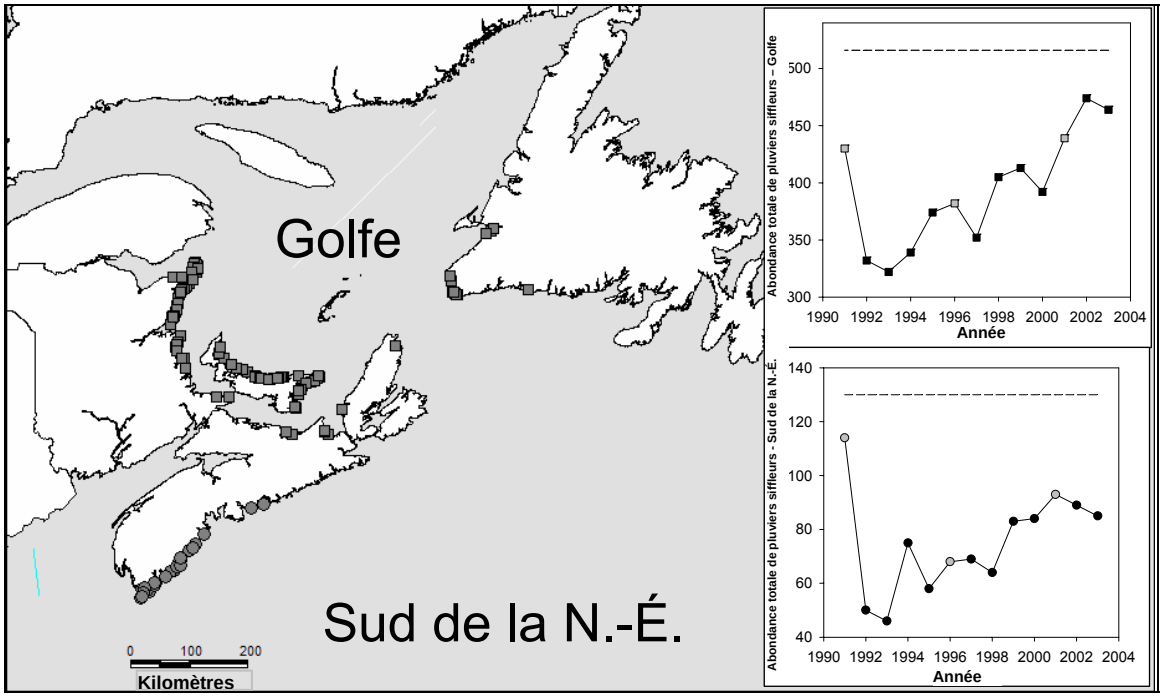


Figure 36. Emplacement des plages du Canada atlantique où se reproduit le Pluvier siffleur dans le golfe du Saint-Laurent et le sud de la Nouvelle-Écosse

4.6.10.3.1 Objectifs de rétablissement et perturbation des paramètres

Pour atteindre les objectifs de rétablissement énoncés pour le sud de la Nouvelle-Écosse, il faudrait que l'abondance augmente d'environ 35,4 % par rapport à 2003, ce qui correspond à un taux de croissance de λ=1,0625 pour y parvenir en cinq ans, de λ=1,0308 en dix ans ou de λ=1,0204 en 15 ans (en supposant que le taux de reproduction commence à changer dès maintenant). Pour ce qui est du golfe, il faudrait que la population augmente d'environ 24,6 %, soit un taux de croissance de la population de λ=1,0450 en cinq ans, de λ=1,0223 en dix ans ou de λ=1,0148 en 15 ans (en supposant que le taux de croissance commence à changer dès maintenant). En raison

de l'élasticité élevée de Φ_A, le changement des paramètres de reproduction requis pour atteindre ces taux de croissance serait environ trois fois supérieur au changement de la survie des adultes. Étant donné qu'on estime présentement la croissance de la population du golfe à moins de un, nous avons utilisé le même type de calculs pour déterminer quelles perturbations individuelles seraient nécessaires pour atteindre la stabilité, c'est-à-dire un taux de croissance de λ=1. Nous constatons encore une fois que, pour atteindre la stabilité, le changement requis de la survie des adultes serait très inférieur à celui des paramètres de reproduction.

En vue de maintenir la sous-population du golfe à son abondance actuelle (c'est-à-dire λ=1), il faudrait que la productivité augmente de 15,5 % pour atteindre 1,63 premier envol par nid; et pour atteindre les objectifs de rétablissement d'ici 10 ans, il faudrait que la productivité passe à 1,77 premier envol par nid.

4.6.10.4 Sommaire et conclusions

4.6.10.4.1 Indices vitaux de la population

Les estimations de la probabilité de survie des adultes dans le golfe et dans le sud de la Nouvelle-Écosse (Calvert *et al.*, présenté) sont les mêmes que pour le Pluvier siffleur de la côte atlantique des États-Unis (0,738; Plissner et Haig, 2000). Par contre, le taux de survie des jeunes est très inférieur dans le golfe à celui de la côte atlantique des États-Unis et très proche de celui des pluviers siffleurs des Prairies ou des Grands Lacs. Étant donné que la plupart des pluviers siffleurs du Canada atlantique nichent dans la région du golfe, le faible taux de survie des jeunes peut expliquer la différence entre les dynamiques de population observée ces dernières années, alors que la population des États-Unis a beaucoup augmenté et celle du côté canadien n'a guère changé (Haig *et al.*, 2005).

Les estimations ponctuelles de la croissance de la population dans les deux sous-populations du Canada atlantique suggèrent que la population du Pluvier siffleur reste stable dans le sud de la Nouvelle-Écosse et diminue dans le golfe, mais nous devons faire preuve de prudence dans l'interprétation de ces valeurs. La grande variance associée à chaque estimation de paramètre reflète la courte période sur laquelle les indices vitaux ont été calculés.

Pour les deux sous-populations, la survie des adultes est beaucoup plus importante que celle des jeunes ou que les paramètres de reproduction, comme c'est fréquemment le cas pour de nombreux oiseaux migrateurs (Saether et Bakke, 2000) et pour d'autres populations de pluviers siffleurs (Ryan *et al.*, 1993; Plissner et Haig, 2000; Wemmer *et al.*, 2001). Cela signifie que l'amélioration du taux de survie des adultes pourrait influer grandement sur la trajectoire de la population. La fidélité du Pluvier siffleur aux sites d'hivernage, potentiellement élevée (Drake *et al.*, 2001; Amirault *et al.*, 2005; Haig *et al.*, 2005), suggère qu'il pourrait devenir de toute première importance pour les gestionnaires de la faune de surveiller le Pluvier siffleur en dehors de la saison de reproduction.

L'analyse des perturbations vient appuyer la conclusion que c'est la survie de l'adulte qui exerce le plus d'impact sur le taux de croissance de la population. Ce taux de croissance a été modifié trois fois plus par un changement du taux de survie de l'adulte que par un changement équivalent du taux de survie du jeune ou des paramètres de reproduction (Calvert, 2004). On pourrait en conclure que les efforts de conservation devraient viser

l'augmentation du taux de survie de l'adulte, mais il faut encore une fois faire preuve de prudence dans l'interprétation de ces résultats. Notre estimation des taux de survie de l'adulte semble se situer à l'extrémité maximale de la plage des estimations obtenues dans d'autres études. D'un autre côté, les taux de survie des jeunes pluviers du golfe sont généralement inférieurs à ceux d'autres études.

Les scénarios de perturbation montrent que la destruction de l'habitat, et d'autres changements qui perturbent la survie de l'adulte, pourraient avoir des conséquences beaucoup plus graves sur la persistance de la population que des changements équivalents d'autres paramètres. Par exemple, si la survie de l'adulte dépend beaucoup des habitats d'hivernage, toute destruction ou perturbation des aires d'hivernage pourrait nuire considérablement à la population, même si les efforts de conservation sur les sites de reproduction parviennent à maintenir des taux de succès de la reproduction élevés, de même que des taux de survie élevés durant l'été.

Compte tenu des nombreuses menaces potentielles auxquelles les perturbations d'origine humaine soumettent l'habitat du Pluvier siffleur sur la côte atlantique (Patterson *et al.* 1991; Haig 1992; Melvin et Hecht. 1994), il est de toute première importance pour sa protection de rechercher le lien qui existe entre son habitat et les indices vitaux de sa population.

Le modèle de population fait ressortir le besoin (1) de mieux comprendre les menaces à la survie de l'adulte et du jeune en dehors de la saison de reproduction; (2) d'estimer avec plus de précision les taux de dispersion hors de l'aire natale chez le Pluvier siffleur dans le Canada atlantique; (3) de quantifier l'efficacité des mesures de conservation spécifiques pour faire croître les indices vitaux de la population.

Notre analyse, basée sur la population de pluviers siffleurs du golfe du Saint-Laurent et effectuée de 1998 à 2003, révèle que le succès de la reproduction et les problèmes découlant des tempêtes et des conditions de l'habitat ne régissaient pas la dynamique de la population durant cette période. Pour mieux quantifier l'impact de l'élévation du niveau de la mer et des changements climatiques à venir sur les populations de pluviers siffleurs, il faut continuer à quantifier le succès de la reproduction, les changements subis par l'habitat et les tempêtes.

4.6.10.5 Références

Amirault, D. L. 2004. Draft recovery strategy for the Piping Plover, *melodus* subspecies (*Charadrius melodus melodus)*. Service canadien de la faune, Sackville, N.-B. 13 p.

Amirault, D. L., F. Shaffer, K. Baker, A. Boyne, A. M. Calvert, J. McKnight et P. Thomas. 2005. Preliminary results of a five year banding study in Eastern Canada – support for expanding conservation efforts to non-breeding sites? Document présenté au First Regional Workshop on Dredging, Beach Nourishment, and Birds on the South Atlantic Coast and Symposium on the Wintering Ecology and Conservation of Piping Plovers. Jekyll Island, Georgia, février 2005.

Amirault, D.L., F. Shaffer et J. Stewart. 2006. Eastern Canada Piping Plover Banding Research Protocol. Rapport technique n^{o} 458. Service canadien de la faune, Régions de l'Atlantique et du Québec. 22 p.

Calvert, A M., D.L. Amirault, F. Shaffer, R. Elliot, A. Hanson, J. McKnight et P.D. Taylor. 2006. Population assessment of an endangered shorebird: the Piping Plover (*Charadrius melodus melodus*) in eastern Canada.

Calvert, A M. 2004. Demographic modelling of populations of the Piping Plover (Charadrius melodus Demoin) in Atlantic Canada and implications for conservation planning. Rapport non publié préparé sous contrat pour le Service canadien de la faune, Sackville, Nouveau-Brunswick. 42 p.

Drake, K. R., J. E. Thompson, K. L. Drake et C. Zonick. 2001. Movements, habitat use and survival of nonbreeding Piping Plovers. Condor **103**:259-267.

Haig, Susan M. and Elliott-Smith, E. 2004. Piping Plover. The Birds of North America Online. (A. Poole, Ed.) Ithaca: Cornell Laboratory of Ornithology; Retrieved from The Birds of North American Online database: http://bna.birds.cornell.edu/BNA/account/Piping_Plover/

Haig, S. M., C. L. Ferland, F. J. Cuthbert, J. Dingledine, J. P. Goossen, A. Hecht et N. McPhillips. 2005. A complete species census and evidence for regional declines in Piping Plovers. Journal of Wildlife Management **69**: 160-173.

Melvin, S. M., et A. G. C. R. Hecht. 1994. Piping Plover mortalities caused by off-road vehicles on Atlantic coast beaches. Wildlife Society Bulletin **22**:409-414.

Patterson, M. E., J. D. Fraser et J. W. Roggenbuck. 1991. Factors affecting Piping Plover productivity on Assateague Island. Journal of Wildlife Management **55**:525-531.

Plissner, J. H., et S. M. Haig. 2000. Viability of Piping Plover *Charadrius melodus* metapopulations. Biological Conservation **92**:163-173.

Ryan, M. R., B. G. Root et P. M. Mayer. 1993. Status of Piping Plovers in the Great Plains of North America: a demographic simulation model. Conservation Biology 7:581-585.

Saether, B. E., et O. Bakke. 2000. Avian life history variation and contribution of demographic traits to the population growth rate. Ecology **81**:642-653.

Wemmer, L. C., U. Ozesmi et F. J. Cuthbert. 2001. A habitat-based population model for the Great Lakes population of the Piping Plover (*Charadrius melodus*). Biological Conservation **99**:169-181.

White, G. C., et K. P. Burnham. 1999. Program MARK: Survival estimation from populations of marked animals. Bird Study **46**:S120-S138.

4.6.11 Résumé des impacts de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et du changement climatique sur l'écosystème côtier

Les recherches sur les impacts de l'élévation du niveau de la mer et des changements climatiques mettaient l'accent sur l'habitat côtier et les espèces sauvages qui y sont associées. En raison de la courte durée des travaux, il a fallu consulter des sources d'information existantes sur les ressources fauniques et leur habitat. Il est à espérer que cette étude donnera lieu à d'autres recherches connexes qui incluront une analyse des impacts de l'élévation du niveau de la mer et des changements climatiques.

D'après les résultats de l'étude, un niveau d'inondation de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN (approximativement le présent niveau moyen de la mer), comme cela a été le cas, le 21 janvier 2000, aurait pour effet d'inonder 1 397 ha de zones sèches, 1 634 ha de marais côtiers, 388 ha de dunes, 159 ha de marécages et 226 ha de plages. Suivant ce scénario, le niveau de l'eau serait de 0,84 m dans les marécages, de 1,13 m sur les dunes, de 1,58 m sur les plages et de 1,64 m dans les marais côtiers. Ces analyses

révèlent que la hausse future du niveau de l'eau causée par des ondes de tempête et par l'élévation du niveau de la mer aura des incidences sur la plupart des secteurs de l'habitat côtier.

En l'absence de données suffisantes sur les taux d'accrétion verticale dans les marais salés et la dynamique des sédiments sur les plages et les dunes du détroit de Northumberland, les auteurs ont procédé à une analyse rétrospective de photos aériennes dans cinq parcelles d'étude. Ces analyses ont fourni des indications sur la réaction passée des marais, des dunes et des plages à des tempêtes et à des changements du niveau de la mer. Elles serviront de point de départ pour l'étude des réactions possibles de ces habitats à des phénomènes semblables à l'avenir.

À Cap-Jourimain, le marais salé couvert de végétation a perdu 28 % (88 ha) de sa superficie entre 1944 et 2001. Ce changement était principalement attribuable à la construction, en 1966, d'une route qui a physiquement détruit une partie du marais et en a modifié le régime hydrologique. À Shemogue, la perte de superficie du marais salé s'élevait à 5 % (15 ha) de 1944 à 2001 et les eaux libres occupaient 9 ha de plus (18 %). Ces changements viennent corroborer l'hypothèse selon laquelle l'accrétion verticale et la migration horizontale du marais ne suffiraient pas à compenser l'élévation du niveau de la mer. Dans la parcelle à l'étude du parc de l'Aboiteau, la superficie du marais salé avait diminué de 27 % (23 ha) de 1944 à 2001 et les terres humides côtières présentaient des traces visibles de remplissage sur 24 ha. À Shediac, deux changements majeurs ont été apportés de 1944 à 2001 : l'aménagement d'éléments d'infrastructure sur 40 ha de terrain dans les terres humides côtières et la construction d'un ouvrage longitudinal de défense des côtes de 9 100 m, entraînant une perte de 21 % de la superficie du marais salé (19 ha). Dans la région de Cocagne, le marais salé a perdu 35 % de sa superficie (19 ha) et 19 ha de terres humides côtières ont été remplies entre 1944 et 2001.

Dans toutes les parcelles à l'étude, les plages et les dunes occupaient une superficie moins grande en 2001 qu'en 1944. Des deux types d'habitat, ce sont les plages qui ont perdu le plus de terrain. Dans le cas de Cap-Jourimain, les plages et les dunes avaient perdu 22 % de leur superficie; dans la parcelle à l'étude de Shemogue, la perte s'élevait à 8 %; dans celle du parc de l'Aboiteau, elle atteignait 12 %; dans le cas de Shediac, la superficie des plages et des dunes avait diminué de 32 % entre 1944 et 1971; seule une faible perte de superficie supplémentaire a été enregistrée de 1971 à 2001; et à Cocagne, la superficie de la plage avait diminué de 40 %. Les travaux d'extraction du sable pour la production d'agrégats de 1944 à 1971 ont probablement eu un impact sur la superficie de la plage de cette région, de même que l'expansion des structures de durcissement du littoral. Compte tenu des diminutions déjà observées dans les 60 dernières années, toute perte supplémentaire occasionnée par l'élévation du niveau de la mer aggraverait la situation aussi bien du point de vue de l'habitat faunique et que de celui des loisirs. La popularité croissante des plages comme aires de loisirs et la diminution de leur superficie sous l'effet de l'élévation du niveau de la mer et du réchauffement de la planète ne feraient qu'intensifier les pressions exercées par l'aménagement et les perturbations anthropiques sur l'habitat faunique côtier.

Dans les parcelles à l'étude du parc de l'Aboiteau, de Shediac et de Cocagne, les auteurs ont constaté une augmentation substantielle de la superficie du littoral durci en 2001 comparativement à des périodes antérieures. En 2001, la surface durcie des plages

mesurait 8 324 m dans le parc de l'Aboiteau, 9 408 m à Shediac et 13 287 m à Cocagne. Le durcissement du terrain a des incidences sur la superficie du littoral qui peut servir aux loisirs et à la faune. Ce phénomène diminue également la quantité de sédiments, ce qui pourrait entraîner une diminution supplémentaire de la superficie des plages à l'avenir.

Dans l'ensemble, les résultats de cette analyse rétrospective indiquent que, pour bien comprendre et gérer les impacts des changements climatiques sur les écosystèmes côtiers, il faut tenir compte des effets de l'activité humaine. En outre, ils révèlent que l'élévation du niveau de la mer risque de réduire encore davantage la superficie des marais salés, des plages et des dunes dans des secteurs où l'activité humaine a déjà causé des pertes substantielles à cet égard.

Les auteurs de l'étude ont établi des liens entre la zonation des espèces de plantes vasculaires et l'altitude du terrain dans les marais salés qui longent le détroit de Northumberland, et ils ont comparé ces données avec celles enregistrées pour la baie de Fundy. Les résultats indiquent que l'altitude du terrain peut servir à prédire les impacts de l'élévation du niveau de la mer sur les communautés végétales des terres humides côtières.

Pour évaluer les impacts possibles de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête sur les colonies nicheuses de laridés et de sternes, les auteurs ont déterminé quelles colonies seraient inondées selon différents scénarios d'élévation du niveau de la mer. Parmi les lieux de nidification connus de la zone à l'étude, seule la plage Bar-de-Cocagne serait inondée au niveau moyen de la mer avec une élévation du niveau de la mer de 0,60 m. Cependant, 11 lieux de nidification sur 14 seraient touchés par une onde de tempête de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN. La plus grande colonie de sternes pierregarins de la zone à l'étude (les îles aux Sternes, dans le parc national Kouchibouguac), qui comptait plus de 6 020 nids en 2005, serait inondée à un niveau d'eau de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN**.** Une tempête estivale de l'ampleur de celle du 21 janvier 2000 aurait donc un effet dévastateur sur le taux de reproduction de la population de sternes pierregarins dans la partie néo-brunswickoise du golfe du Saint-Laurent. D'autre part, une élévation accélérée du niveau de la mer conduirait à une probabilité accrue pour que de tels niveaux d'eau se produisent.

L'étude a permis de déterminer les impacts possibles de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête sur les populations de harles huppés qui nichent sur quatre îles-barrières extracôtières du parc national Kouchibouguac. La plupart des nids se trouvaient au-dessus du niveau de 0,60 m mais beaucoup plus bas que le niveau d'inondation maximum observé de 2,55 m au-dessus du zéro du MAN. Les impacts des ondes de tempête sur les harles huppés pendant la période de nidification ne sont pas entièrement hypothétiques : la tempête qui s'est abattue sur la région en 1993 a inondé de nombreux nids et a réduit à 22 % le succès de reproduction pour l'année. L'élévation du niveau de la mer, conjuguée à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes estivales, aurait des répercussions sur le taux de reproduction de cette espèce.

L'effectif de la population de pluviers siffleurs qui nichent dans la région de l'Atlantique n'était estimé qu'à 255 couples en 2003. Les auteurs ont étudié la superficie et la qualité de l'habitat de nidification de cette espèce en voie de disparition, afin de prédire les impacts de l'élévation prévue du niveau de la mer. Leurs analyses révèlent que les

plages actuellement occupées par l'espèce sont plus longues et plus larges que les autres plages et qu'elles ont une plus grande surface de sable. De plus, elles ont un plus grand nombre de brèches dans leurs dunes, sont moins aménagées et donnent accès à des baies, à des émissaires ou à des étangs éphémères. Les changements survenus au fil des ans ont été cartographiés et mesurés sur deux plages de la région de Shemogue. Aucune tendance évidente n'a été détectée. Les analyses ont plutôt révélé des variations temporelles qui étaient probablement liées aux tempêtes. On sait que le Pluvier siffleur préfère les habitats de stade pionnier créés par les brèches des dunes et que les tempêtes qui transforment les flèches en îles améliorent l'habitat de l'espèce. L'hypothèse voulant que l'élévation du niveau de la mer et les changements climatiques vont contribuer à une réduction de la superficie de l'habitat de prédilection du Pluvier siffleur, doit être examinée plus à fond et quantifiée. Le fait que l'espèce occupe surtout des plages abritées souligne l'importance de gérer les impacts humains aujourd'hui et à l'avenir, à l'heure même où la société réagit à l'élévation du niveau de la mer. Pour être en mesure de bien gérer l'habitat du Pluvier siffleur, il faut savoir quelles plages risquent d'être touchées par l'élévation du niveau de la mer.

De 1985 à 2005, les tempêtes estivales ont exercé une grande influence sur le nombre de tentatives de nidification et sur le taux de reproduction des pluviers siffleurs adultes dans le parc national Kouchibouguac. En 1985, un grand nombre de nids ont été inondés et aucun oisillon n'a atteint l'âge du premier envol. Le 8 juin 1985, jour de tempête, le marégraphe d'Escuminac avait indiqué des niveaux d'eau dépassant de 2 m au-dessus du zéro des cartes. En 1991, le taux de reproduction était inférieur à la moyenne, et cette baisse a été attribuée à une grosse tempête qui a traversé la région le 14 juin 1991, journée où le marégraphe d'Escuminac indiquait des niveaux d'eau de 2,12 m. Le même phénomène s'est produit en 1993. Après une tempête où le niveau d'eau enregistré à Escuminac était de 2,07 m, l'inondation de nombreux nids a été signalée sur le terrain. L'examen des niveaux d'eau historiques à la pointe Escuminac révèle que neuf ondes de tempête d'au moins 0,6 m sont survenues pendant la saison de nidification du Pluvier siffleur entre 1964 et 2004. Une de ces tempêtes a eu lieu de 1964 à 1969, une autre dans les années 1970, trois autres dans les années 1980 et les quatre dernières dans les années 1990. Aucune onde de tempête n'a encore été enregistrée depuis le début des années 2000. Assumant une coïncidence avec les marées hautes, quelques-unes, ou possiblement plusieurs de ces tempêtes auraient eu un impact sur le taux de reproduction dans les 20 dernières années et peut-être également sur la dynamique des populations. À l'heure actuelle, il n'existe aucune preuve statistique attestant que la fréquence des tempêtes du mois de juin augmente dans la partie sud du golfe du Saint-Laurent. La réduction de l'intervalle des tempêtes estivales aurait des effets néfastes sur les populations de pluviers siffleurs et pourrait nécessiter la mise en place de mesures pour protéger les nids et les œufs contre les inondations.

Les auteurs ont procédé à une analyse de la dynamique des populations de pluviers siffleurs afin de comprendre les effets des changements climatiques et de la modification de l'habitat sur l'espèce. Ces analyses donnent à penser que, de 1998 à 2003, la population du sud de la Nouvelle-Écosse était stable (+0,4 % par an) et que celle du golfe du Saint-Laurent était en baisse (-3,5 % par an). La baisse démographique prévue pour le golfe était essentiellement due à un faible taux de survie des juvéniles au-delà du premier envol. Il importe donc de quantifier les menaces qui guettent ces oiseaux après qu'ils ont quitté le lieu de nidification. De même, la croissance démographique des deux

sous-populations était en grande partie fonction des changements dans le taux de survie des adultes. On connaît très peu les facteurs qui menacent la survie des Pluviers siffleurs pendant la migration et l'hivernage. Il semblerait que les efforts déployés pour protéger l'espèce contre les prédateurs et les perturbations humaines sur les plages qui servent à la nidification ont produit de bons résultats et que les variations annuelles du taux de reproduction ou de la qualité de l'habitat qui sont engendrées par le climat ne limitent pas la croissance démographique à l'heure actuelle. Les auteurs suggèrent que les futurs programmes de rétablissement du Pluvier siffleur prévoient des mesures pour quantifier et gérer les facteurs essentiellement inconnus qui causent la mortalité des adultes et des juvéniles après la saison de la nidification, tout en maintenant le niveau actuel de protection de l'habitat de nidification.

Dans l'ensemble, les analyses révèlent que les écosystèmes côtiers sont naturellement capables de s'adapter à la variabilité du climat et des niveaux d'eau. De tout temps, les modifications et les perturbations d'origine humaine ont un plus grand impact sur l'habitat et les populations fauniques des zones côtières que l'élévation du niveau de la mer et le réchauffement de la planète. Les impacts futurs de ces deux phénomènes pourraient être exacerbés par l'aménagement ou les projets de protection des infrastructures. Il faut continuer de surveiller les profils climatologiques, les niveaux d'eau, les populations fauniques et l'habitat pour être en mesure d'élaborer des stratégies d'adaptation qui protégeront l'infrastructure humaine et l'habitat faunique contre la hausse des niveaux d'eau et les ondes de tempête.

4.7 Impacts socioéconomiques

Lisa DeBaie(co-responsable)[1]*, Kelly Murphy(co-responsable)[1], Gilles Martin[2] et Omer Chouinard[2]

[1] Environnement Canada, Direction des affaires communautaires et ministérielles, 45, promenade Alderney, 16e étage, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada B2J 2K5
[2] Université de Moncton, Programme de maîtrise en études de l'environnement, 165, avenue Massey, Pav. P.-A. Landry, Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada E1A 3E9

* contact avec l'auteur [courriel : Lisa.DeBaie@ec.gc.ca].

4.7.1 Introduction

L'*Étude pancanadienne* (Environnement Canada, 1997) a dégagé une série d'impacts éventuels préoccupants dans la zone côtière du Canada atlantique. Parmi ces impacts figurent l'accélération de l'erosion des côtes et du changement du littoral, les risques d'inondation, les dommages causés par les tempêtes et les pertes matérielles connexes. Ce sont les communautés vulnérables à l'erosion des côtes et aux inondations ou aux ondes liées aux tempêtes qui seraient exposées au plus grand risque.

Ce projet fait appel à l'analyse socioéconomique et aux sciences biophysiques pour tenter de comprendre le processus et l'impact du changement climatique dans la région. Il examine d'un point de vue économique l'impact éventuel de l'élévation du niveau de la mer, de l'augmentation de fréquence et d'intensité des ondes de tempête, ainsi que de l'accélération du changement du littoral.

Compte tenu des différents changements biophysiques que pourra entraîner le changement climatique et du manque d'analyses socioéconomiques sur ces mêmes changements, la présente recherche tente d'utiliser une approche par études de cas pour évaluer les impacts plus en détail. Les auteurs cherchent aussi à appliquer différentes techniques analytiques pour évaluer et comprendre les dimensions sociales et économiques du changement climatique.

L'analyse socioéconomique repose en grande partie sur les résultats scientifiques fournis par les autres collaborateurs qui participent à cette étude et qui ont examiné les impacts physiques et biophysiques complexes attendus en conséquence du changement climatique. Cette intégration des sciences de l'environnement et des sciences sociales fournit une base complète plus éclairée pour examiner les stratégies d'adaptation potentielles.

4.7.1.1 Objectifs de la recherche

Les objectifs de la composante socioéconomique visaient :

- à identifier les connaissances locales sur les impacts du climat (passés et présents);
- à aider les communautés concernées par les études de cas à mieux comprendre les conséquences économiques du changement climatique ainsi que l'adaptation dans la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick;
- à fournir un modèle permettant d'appliquer différentes techniques économiques à

l'analyse de l'impact du changement climatique;
- à évaluer la capacité de la communauté à prendre des mesures face au changement climatique et à trouver des moyens d'améliorer la capacité d'adaptation dans la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick.

4.7.1.2 Composantes de la recherche

4.7.1.2.1 Engagement des intervenants ou des communautés

Un élément clé de ce projet est l'engagement de la communauté et le renforcement des connaissances et de la compréhension, à l'échelle locale, du processus de changement du littoral et de l'adaptation à celui-ci. L'engagement et la participation de la communauté permettent aux chercheurs de déterminer et de comprendre le niveau de connaissances locales sur les impacts du changement climatique et sur l'adaptation à celui-ci. De plus, ils facilitent le dialogue entre les scientifiques et les citoyens afin d'intégrer les connaissances, les expériences et les observations locales à l'analyse des changements passés et éventuels dans la zone côtière.

Ce dialogue contribue également de façon importante à étayer le processus de détermination des stratégies d'adaptation possiblement viables. Il permet aussi de mieux comprendre le coût de leur mise en œuvre. En dernier lieu, ce sont les résidents de la communauté, les divers ordres de gouvernement et autres intervenants qui devront assimiler tous les résultats de ce projet, les interpréter dans le contexte de leur communauté, et commencer à agir en fonction des informations pour améliorer la résilience de la communauté face aux impacts du changement climatique. Le transfert de connaissances est plus efficace si le bénéficiaire se sent engagé et concerné dès les débuts.

Pour faciliter l'intégration des connaissances scientifiques et locales, une série de rencontres et de consultations communautaires a été organisée dans toute la région à l'étude. Plus particulièrement, le processus d'implication de la communauté a fourni l'occasion :

- de l'aider à mieux comprendre les impacts du changement climatique;
- d'évaluer sa perception des risques comme les phénomènes extrêmes, les inondations, l'érosion et les changements climatiques à venir, sa résilience aux impacts du changement climatique et ses capacités d'adaptation;
- d'incorporer ses connaissances dans l'analyse socioéconomique;
- de lui transmettre les résultats des recherches.

4.7.1.2.2 Impacts sur les secteurs économiques

Les effets du changement climatique sont de plus en plus préoccupants pour les exploitants d'entreprises touristiques du sud-est du Nouveau-Brunswick, car i) les secteurs de l'écotourisme et du tourisme culturel se sont développés rapidement dans les dix dernières années, et ii) les activités touristiques sont perturbées par l'élévation du niveau de la mer, l'érosion et les ondes de tempête. De nombreux exploitants d'entreprises touristiques ont subi des dommages considérables à la suite de violentes tempêtes survenues dans la région côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick. On évalue que la tempête d'octobre 2000 a causé près de 500 000 dollars en dommages à la passerelle de bois de l'Éco-centre Irving à Bouctouche (G. Arsenault, Éco-centre Irving,

comm. pers.) et près de 785 000 dollars en dommages au parc national Kouchibouguac (É. Tremblay, Parc national Kouchibouguac, comm. pers.).

Cette recherche a évalué l'impact économique potentiel du changement climatique sur les secteurs du tourisme culturel et de l'écotourisme. L'analyse a intégré les connaissances et les compétences locales des exploitants d'entreprises touristiques participant à l'évaluation des impacts sur l'économie.

4.7.1.2.3 Impacts sur les caractéristiques de la communauté

Par le passé, la côte sud-est du Nouveau-Brunswick a été touchée par des phénomènes extrêmes qui ont représenté de graves menaces pour la santé et la sécurité des populations et entraîné des dommages considérables à l'infrastructure côtière. À la suite de l'onde de tempête du 21 janvier 2000, déclarée catastrophe par le gouvernement fédéral, 198 réclamations pour dommages ont été déposées devant l'Organisation des mesures d'urgence du Nouveau-Brunswick (OMU), et 43 étaient admissibles à un financement, pour un total de près de 1,5 million de dollars (K. Wilmot, comm. pers., OMU, Nouveau-Brunswick). Le 29 octobre 2000, une autre violente onde de tempête a touché la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, donnant lieu à la présentation de 459 réclamations pour dommages à l'OMU du Nouveau-Brunswick, dont 159 étaient admissibles à un financement totalisant près de 1,3 million de dollars (K. Wilmot, comm. pers., OMU, Nouveau-Brunswick).

La zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick, qui continue de se développer, est vulnérable aux impacts côtiers, comme on l'a constaté ces dernières années. La compréhension des impacts du changement climatique et des futurs régimes de développement de ces communautés est un élément important du choix et de l'évaluation de stratégies d'adaptation. Cette composante de l'analyse socioéconomique permettra d'estimer certains coûts des dommages infligés aux caractéristiques de la communauté par l'élévation du niveau de la mer et par les ondes de tempête, afin d'appuyer la gestion durable, la résilience des communautés et l'élaboration de stratégies d'adaptation.

4.7.1.2.4 Coûts et avantages de l'adaptation

L'évaluation des impacts du changement climatique et des stratégies d'adaptation d'un point de vue socioéconomique n'en est encore qu'à ses premiers balbutiements. Il reste encore de nombreuses questions empiriques et méthodologiques à surmonter. À vrai dire, il n'existe aucune approche acceptée par tous pour évaluer les impacts ou les stratégies d'adaptation. Il faut donc évaluer de multiples options pour être en mesure de déterminer la stratégie la plus appropriée.

Dans le but de faciliter les discussions sur l'adaptation, nous avons évalué, dans le cadre de cette composante, certains des coûts et avantages de quelques options d'adaptation visant à réduire les impacts économiques sur le secteur du tourisme ainsi que les coûts des dommages subis par les propriétés côtières.

4.7.1.3 Justification pour chaque composante et étude de cas

Nous avons utilisé une approche par études de cas pour évaluer les impacts économiques sous deux angles distincts : les impacts sur un secteur économique en particulier et les impacts sur la propriété. Ce sont les communautés de Bouctouche et de

la baie de Shediac qui ont été choisies pour participer aux études de cas, car elles offraient l'occasion d'examiner l'importance de différents types d'impacts économiques à l'aide de différentes démarches d'analyse économique.

4.7.1.3.1 Bouctouche : Évaluation des effets intégrés sur l'industrie du tourisme

Il y avait plusieurs raisons de mener une étude de cas dans la région de Bouctouche. En effet, cette communauté a considérablement investi ces dernières années dans l'expansion de ses ressources d'éco-tourisme et de tourisme culturel, particulièrement en ce qui a trait aux destinations côtières. En outre, elle avait déjà ressenti les effets de tempêtes violentes (inondation et erosion des côtes) :

- l'Éco-centre Irving La Dune de Bouctouche a été endommagé au cours de la tempête du 29 octobre 2000; et
- le site touristique et historique Le Pays de la Sagouine a été inondé le 21 janvier et le 29 octobre 2000.

En outre, cette communauté a été à l'avant-plan d'initiatives de planification en vue d'un développement régional durable et a connu une croissance rapide de la prestation de services d'éco-tourisme et de tourisme culturel dans les dernières années. Plus récemment, cette communauté s'est dotée d'un Plan vert, le premier au Nouveau-Brunswick.

4.7.1.3.2 Baie de Shediac : Coûts possibles des dommages causés par les ondes de tempête et les inondations côtières

Les littoraux des baies de Cocagne et de Shediac sont de plus en plus bâtis et donc vulnérables aux impacts côtiers, le littoral étant en pente douce et le substrat érodable. En tant que « banlieue-dortoir » de Moncton, Shediac constitue le centre de l'expansion résidentielle et commerciale le long de cette partie de la côte et possède une importante infrastructure municipale et résidentielle dans la zone côtière, ce qui la rend particulièrement vulnérable aux dommages causés par les ondes de tempête. La baie de Shediac est un bassin versant côtier complexe extrêmement vulnérable aux inondations côtières. Située non loin de là, la plage Parlee est également un des fleurons de la province et une attraction touristique très valorisée. Il faut donc tenir compte des effets économiques à long terme du changement climatique quand on planifie l'utilisation des terres et quand on réglemente l'expansion et l'urbanisation.

4.7.2 Processus d'engagement des communautés

4.7.2.1 Motifs et justification

Les problèmes liés à la zone côtière sont nombreux et rendus plus complexes par la présence de différents usagers de l'espace côtier et d'activités et de facteurs divers tels que le développement résidentiel côtier, industriel et touristique et les contraintes environnementales qui les accompagnent, l'exploitation des ressources marines, la présence de bénéficiaires de ces ressources qui résident à l'intérieur et à l'extérieur du milieu, la nécessité de protéger le littoral, l'accès du public à la zone, etc. C'est pourquoi la gestion intégrée et concertée du littoral exige la coopération de tous les utilisateurs afin de mieux définir les conditions de compatibilité entre les différents usages de l'espace côtier. La réduction des impacts du changement climatique, qu'ils soient d'ordre

environnemental ou socioéconomique, constitue un nouvel enjeu dans la zone côtière, et beaucoup pensent qu'elle requiert une approche intégrée (van den Hove, 2000).

La composante *engagement des communautés* du projet visait à accroître les capacités locales en matière d'adaptation aux impacts de la hausse du niveau de la mer et du changement climatique sur les zones côtières du sud-est du Nouveau-Brunswick. Cette approche de gestion intégrée s'inscrit dans un mouvement de gouvernance locale inclusive et participative, c'est-à-dire où tous les intervenants des communautés (citoyens, État et intermédiaires) sont engagés et prennent part au processus décisionnel (Macdonald, 2005). Par gouvernance on entend tout mécanisme de coordination par une pluralité d'acteurs (gouvernementaux et non gouvernementaux) démocratiquement élus afin de gérer les problèmes locaux (Marsden et Murdock, 1998; van den Hove, 1999). Avec cette contribution, le projet, en plus de recueillir des informations pour faciliter la prise de décision, vise à stimuler la participation de tous les intervenants du milieu côtier en vue d'une meilleure préparation aux conditions climatiques actuelles et futures.

4.7.2.2 Approche générale

Pour favoriser le développement des capacités des communautés à s'adapter, il devenait important de réunir les connaissances traditionnelles et les savoirs locaux des divers groupes socioéconomiques et culturels du territoire et de les mettre en relation avec les connaissances scientifiques sur les impacts de la hausse du niveau de la mer et des changements climatiques dans les régions concernées. La première étape consistait donc à recueillir les connaissances locales et les perceptions des individus des communautés à l'aide d'entrevues et de groupes de discussion rejoignant le plus large éventail possible de la population de la zone.

Deuxièmement, afin d'encourager la prise en charge locale ou la gérance du territoire, il fallait travailler à sensibiliser la population aux risques découlant du changement climatique et de la montée du niveau de la mer, ce qui nécessite des stratégies d'information et d'éducation. Pour ce faire, différentes présentations publiques ont eu lieu dans différentes communautés de 2003 à 2005, et un atelier communautaire pancanadien a été tenu à Bouctouche à l'automne 2004. Lors des présentations et de l'atelier, les informations sur les impacts du changement climatique et de la montée du niveau de la mer recueillies par le projet ont été communiquées. Également, tout au long du projet, des entrevues à la radio et à la télévision ainsi que des articles de journaux ont été utilisés comme moyen de diffusion.

Tant pour les entrevues que pour les rencontres publiques, les chercheurs se sont assurés de la participation du plus grand nombre possible d'intervenants provenant des organisations non-gouvernementales et de représentants de différents ordres de gouvernement. Ainsi, des citoyens, membres d'organisations de bassin versant, urbanistes, conseillers et maires des municipalités, membres des comités de district de services locaux, fonctionnaires provinciaux et autres ont participé aux activités. Chaque présentation ou groupe de discussion tenu dans les différentes communautés a laissé une place à la discussion afin de permettre aux participants de faire part de leurs préoccupations et de leurs perceptions des problèmes, dans le contexte local.

4.7.2.3 Résultats du processus d'engagement

Les données recueillies dans les différentes communautés du sud-est du Nouveau-Brunswick ont fourni aux chercheurs un tableau détaillé des perceptions et des préoccupations locales.

Les résultats préliminaires obtenus lors de premières entrevues dans les communautés montrent que les attitudes face aux impacts des événements extrêmes ont été de nature réactive, c'est-à-dire que les tentatives pour mieux s'adapter à la réalité climatique sont surtout déclenchées lorsque des épisodes de tempêtes ont causé des dommages importants. Pourtant, les communautés ont tout à gagner à utiliser une approche plus proactive, où l'on planifie l'aménagement en tenant compte des risques liés à la vulnérabilité du climat. Ce type d'adaptation est en effet plus efficace et moins coûteux que l'adaptation forcée ou d'urgence (Burton, 1996, *in* Smit et Pilifosova, 2003). L'engagement des communautés devrait favoriser une telle approche; les actions de certaines communautés, présentées dans la section 4.8.3, vont d'ailleurs dans ce sens.

Le dialogue entrepris avec les communautés a fourni l'occasion de faire en sorte que les préoccupations et les difficultés rencontrées localement en relation avec les impacts du changement climatique et l'adaptation soient prises en compte par les chercheurs. En fait, de nombreux obstacles à l'adaptation perçus par les communautés ont été relevés, et ont fait l'objet de recommandations. Il était essentiel de les inclure pour permettre à la présente recherche de mieux répondre aux besoins des populations du milieu et de proposer des recommandations pertinentes en matière d'adaptation.

Les entrevues, rencontres de discussion et présentations publiques s'étant déroulées sur un certain temps, on a pu voir comment évoluaient dans les différentes communautés les perceptions et les connaissances face au changement climatique et à l'adaptation. De manière générale, les chercheurs ont constaté une augmentation de la sensibilisation au phénomène du changement climatique au cours de la période de l'étude.

Finalement, les communautés devront s'approprier les résultats des différentes composantes du présent projet et les interpréter dans leur contexte local, ce qui permettra d'entreprendre ou de poursuivre les actions visant la durabilité des communautés de la zone côtière face aux conséquences du changement climatique. Le processus d'engagement, avec ses nombreuses rencontres et présentations, a certes permis d'amorcer ce processus, mais les chercheurs sont d'avis que ce stade n'a pas été dépassé et qu'il reste beaucoup de travail à faire avec les intervenants des communautés et les différents ordres de gouvernement pour en arriver à une approche planifiée à l'adaptation.

4.7.3 Questions méthodologiques

L'approche globale de ce projet prend en compte les importantes interactions entre les besoins d'information des intervenants, l'état de la science de la prévision des incidences et les limites des actuels outils d'analyse économique. Les résultats provenant des autres composantes faisant partie de ce projet ont fourni des informations essentielles sur les impacts de l'élévation du niveau de la mer, des ondes de tempête et de l'erosion des côtes et ont été utilisés comme intrants dans le cadre de l'analyse économique; leur intégration a été soit quantitative soit qualitative. De la même façon, les résultats de

l'analyse socioéconomique ont également été incorporés dans les sous-composantes relatives aux « Stratégies de mesures d'adaptation » (section 4.8) et à « l'Établissement d'une capacité d'adaptation » (section 4.9).

4.7.3.1 Utilisation de canevas et de scénarios socioéconomiques

L'étude sur l'élévation du niveau de la mer au Nouveau-Brunswick extrapole les impacts du changement climatique sur un horizon de 50 à 100 ans. Il faut incorporer les conjonctures socioéconomiques futures dans l'analyse pour estimer les impacts économiques qui s'ensuivent. Intégrer des scénarios de changement climatique à ces conjonctures socioéconomiques futures permet en effet aux analystes de mieux comprendre les impacts possibles sur les sociétés de l'avenir.

L'utilisation de canevas et de scénarios pour créer un tableau des conjonctures socioéconomiques et biophysiques possibles dans un nouveau climat permet de régler la question des sources d'incertitude. Les canevas et les scénarios permettent à l'analyste de conceptualiser des changements quantitatifs qui peuvent être incorporés dans l'analyse économique et de présenter aux décideurs un éventail de futurs possibles.

Les scénarios ont été définis comme « *une description plausible de ce à quoi l'avenir* ***pourrait*** *ressembler en se fondant sur… un ensemble d'hypothèses quant aux relations et à l'élément moteur clé…»*. Toutefois, «…*il ne s'agit pas de prévisions...» (Nakicenovic* et Swart, 2000).

L'élaboration et l'utilisation de scénarios socioéconomiques dans l'évaluation des impacts du changement climatique représentent une amélioration considérable de la méthodologie. Il est rare dans la documentation que les chercheurs en socioéconomie définissent une « dimension future » de la communauté étudiée. Le plus souvent, l'évaluation des impacts futurs repose sur un développement de nos jours, maintenu constant dans l'avenir. Pourtant, certains aspects des communautés changent avec le temps, notamment la structure sociopolitique, les établissements, l'économie, la culture, la fonction, etc. Ainsi, pour améliorer la méthodologie servant à évaluer les coûts des dommages causés par les ondes de tempête (p. ex. la méthode employée dans le cadre de l'étude sur l'élévation du niveau de la mer dans l'Île-du-Prince-Édouard), la recherche a nécessité que soient élaborés des scénarios socioéconomiques futurs. Ces scénarios ont ensuite été associés aux changements biophysiques prévus pour obtenir une évaluation plus exhaustive et plus réaliste des dommages, des impacts et des coûts dans l'avenir.

Les canevas et scénarios qui ont été utilisés dans l'analyse socioéconomique des deux études de cas sont basés sur les résultats de l'analyse scientifique effectuée par des partenaires du projet : informations sur les changements physiques de l'environnement, les tempêtes, l'erosion des côtes et l'élévation du niveau de la mer; et connaissances générales du changement climatique à venir au Canada atlantique. L'élaboration des scénarios s'est également inspirée des consultations avec les membres des communautés faisant l'objet des études de cas.

Dans l'étude de cas de Bouctouche, on a utilisé un canevas pour orienter l'élaboration des scénarios d'adaptation et fournir un cadre dans lequel établir des liens entre les changements biophysiques et les réactions socioéconomiques. Le canevas de

Bouctouche décrivait les changements biophysiques prévus associés au changement climatique, plus particulièrement l'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête et l'erosion des côtes dans la région de Bouctouche. Les canevas ont été présentés à un certain nombre d'intervenants, puis deux scénarios d'adaptation ont été créés durant le processus d'engagement.

Les scénarios d'adaptation intègrent les réactions au changement climatique et les réactions socioéconomiques. Les changements biophysiques prévus à Bouctouche sont les mêmes dans les deux scénarios, mais les réactions socioéconomiques à ces changements diffèrent. Dans le scénario pessimiste, la communauté de Bouctouche ne tente pas de s'adapter aux impacts du changement climatique. En revanche, dans le scénario optimiste, elle met en œuvre des mesures d'adaptation. Ces scénarios comprennent des changements apportés aux principaux moteurs du tourisme, comme les impacts sur les plages, l'Éco-centre Irving, la disponibilité de mollusques et de crustacés locaux, le Pays de la Sagouine, les sentiers de randonnée locaux ainsi que l'hébergement, les restaurants et les magasins, qui sont tous très importants pour le secteur du tourisme de Bouctouche. Les deux scénarios sont détaillés au tableau 1.

Tableau 1. Scénarios de l'étude de cas de Bouctouche

Impacts & atténuation	Optimiste	Pessimiste
Mesures d'adaptation	Les gouvernements et intervenants réagissent au changement climatique en mettant en œuvre des mesures d'adaptation. L'industrie du tourisme connaîtra une croissance grâce à la protection des ressources naturelles de la communauté et l'élargissement en centres de recherche et d'information.	Les gouvernements et les intervenants continuent de réagir au changement climatique et à l'erosion des côtes comme ils le font aujourd'hui. L'industrie du tourisme a connu une croissance minime et la communauté dans son ensemble n'a pris aucune mesure pour atténuer les impacts du changement climatique et de l'erosion des côtes. Cet état futur peut être considéré comme un scénario du pire, tout en constituant une perspective raisonnable si les pratiques actuelles sont maintenues.
Impact sur les plages	Grâce à des mesures d'adaptation, la qualité et la quantité des plages offertes aux touristes ont été préservées.	À l'avenir, on peut s'attendre à voir une baisse de la disponibilité et de la qualité des plages à Bouctouche, à cause du transport des sédiments. Le sable continuera à être arraché des plages et le gravier et les roches à s'y déposer. Avec le temps, les plages vont disparaître.
Impact sur la Dune de Bouctouche	La dune va continuer de s'éroder. Dans ce scénario, sa pointe sud se détache et devient une île. Cette partie de la dune pourrait devenir un habitat de nidification. Elle serait alors désignée comme zone protégée, fermée aux activités humaines. Des excursions en	La dune continuera de s'éroder du côté de l'océan, du sable sera projeté par-dessus la crête et les habitats migreront vers la terre, se rapprochant des établissements humains. Avec la disparition de la plage, la population locale de pluviers siffleurs en péril sera perdue. De plus, avec l'augmentation de

Impacts & atténuation	Optimiste	Pessimiste
	bateau sont offertes aux touristes qui veulent découvrir davantage les espèces en péril et l'évolution de la côte.	fréquence et d'intensité des phénomènes extrêmes, l'Éco-centre Irving subit encore des dommages considérables. Les travaux de réparation de la passerelle devenant trop coûteux, cette portion de l'installation finit par être fermée.
Impact sur le Pays de la Sagouine	Grâce à la technologie, l'installation du Pays de la Sagouine a été mise à niveau pour minimiser les dommages des inondations et des phénomènes extrêmes. De plus, on a acquis une nouvelle installation utilisable en cas d'urgence s'il y a une inondation pendant la saison touristique.	Pendant les phénomènes extrêmes et pour une courte période par la suite, le Pays de la Sagouine pourrait rester fermé jusqu'à la fin des réparations du pont, des systèmes d'égout et d'autres sections de l'installation. On pourrait devoir annuler des spectacles si une tempête tropicale précoce frappe la région.
Disponibilité des fruits de mer locaux	Grâce à la technologie et à des pratiques de gestion durable, l'industrie coquillière locale peut fournir aux touristes un produit de grande qualité répondant à leurs demandes. La communauté a construit une installation de traitement des eaux usées pour desservir le nombre croissant d'entreprises et de secteurs résidentiels.	Comme les installations de traitement de l'eau et des eaux usées sont situées à bas niveau et très près de la côte, elles sont débordées par les phénomènes extrêmes, ce qui entraîne la contamination de l'eau de boisson et des zones coquillières. Les exploitants d'entreprises touristiques et autres pourraient ne pas être en mesure d'offrir des fruits de mer locaux dans leurs installations pendant un certain temps après la survenue du phénomène.
Impact sur les sentiers pédestres	L'augmentation de fréquence et d'intensité des phénomènes extrêmes entraîne la fermeture occasionnelle de certains sentiers de bord de rivière. Le pont de la rivière Black a cependant été modernisé et surélevé, et n'est plus inondé.	L'augmentation de fréquence et d'intensité des phénomènes extrêmes et des inondations entraîne la fermeture occasionnelle de certains sentiers de bord de rivière. En particulier, le pont de la rivière Black est souvent recouvert par l'eau.
Impact sur les petites exploitations	Grâce à la mise en œuvre de politiques, les installations ne courent qu'un risque minime de dommages pendant les phénomènes extrêmes. Les exploitants d'entreprises touristiques ont investi dans des pratiques durables, et la majorité des installations sont situées dans l'intérieur des terres.	À cause des phénomènes extrêmes et des inondations, certains exploitants d'entreprises touristiques, comme des boutiques, restaurants, installations d'hébergement et de camping, peuvent ne plus être en mesure d'absorber les coûts non assurés liés aux réparations. Cette situation risque de ne pas être financièrement soutenable pour certains d'entre eux, et peut entraîner la fermeture temporaire de leurs installations.

La structure des canevas de Shediac faisait appel à un format semblable à celui du United Kingdom Climate Impacts Program (ou programme d'étude des incidences du climat au Royaume-Uni [2001]). Les canevas donnaient un contexte dominant de la situation comme telle, ainsi que des détails supplémentaires, sur des thèmes pertinents : développement économique, population, logement, services publics et qualité de l'environnement. Plus particulièrement, ils décrivaient sous forme narrative les changements qui pourraient toucher la population des régions, le développement économique et la qualité de l'environnement de la baie, ainsi que la façon dont la population vit et qu'elle est desservie par l'infrastructure publique.

Le canevas optimiste envisageait un rythme modéré, mais relativement solide, quant au développement économique, à la croissance de la population, à la diversité, à l'amélioration de la qualité de l'environnement et à l'expansion des services publics. Le canevas pessimiste était axé sur les mêmes secteurs, mais envisageait un niveau de développement économique plus bas, un déclin de l'ensemble de la population et de la diversité des âges et une baisse de la qualité de l'environnement.

Les intervenants de la communauté ont joué un rôle important dans la conception d'un scénario socioéconomique orienté vers l'avenir. Pendant des ateliers, la communauté a fait ressortir de nouveaux édifices et de nouvelles infrastructures et zones vertes dans la région de la baie de Shediac. Avec le scénario optimiste, on a inclus les nouveaux aménagements et les espaces verts suivants (illustrés à la figure 1) :

- dix zones résidentielles peu peuplées et très peuplées, comprenant des maisons mobiles, des condominiums et des résidences pour aînés;
- trois grandes zones commerciales, avec installations et attractions touristiques;
- l'agrandissement de la marina de Pointe-du-Chêne, construction de boutiques à la marina de Shediac et projet de construction d'un centre communautaire et d'une piscine;
- neuf zones vertes le long de la côte.

Le scénario pessimiste prévoyait les nouveaux aménagements et les espaces verts suivants (illustrés à la figure 2) :

- cinq zones résidentielles peu peuplées et très peuplées, comprenant la construction de logements et de condominiums;
- un nouveau musée entouré d'un parc, l'agrandissement de la marina de Shediac et la fermeture de la marina de Pointe-du-Chêne et de certaines installations au bord de l'eau;
- un projet de centre communautaire;
- la fermeture du parc provincial Parlee Beach et la création d'un nouveau parc près de Barachois.

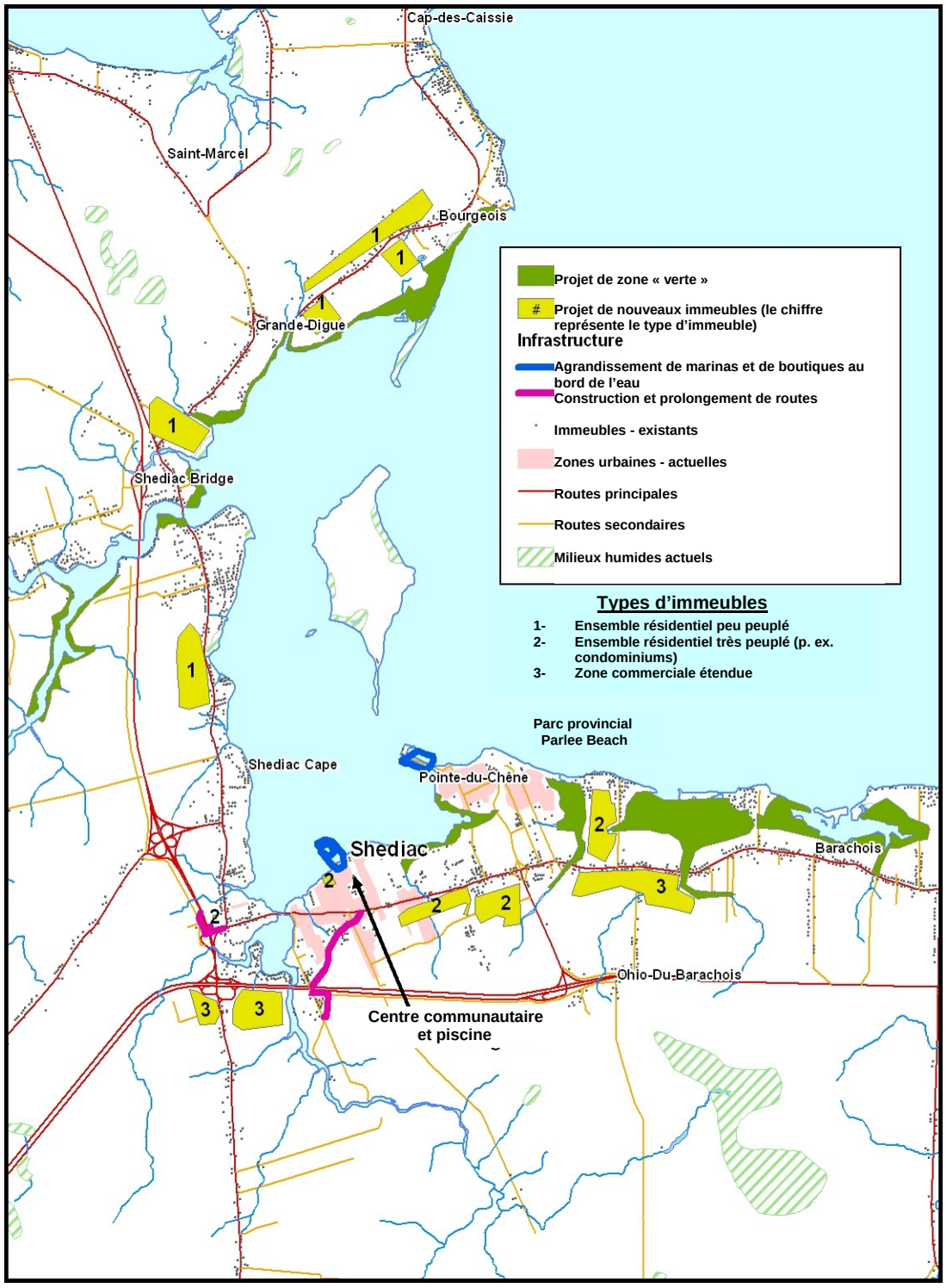


Figure 1. Aménagements futurs dans le scénario optimiste

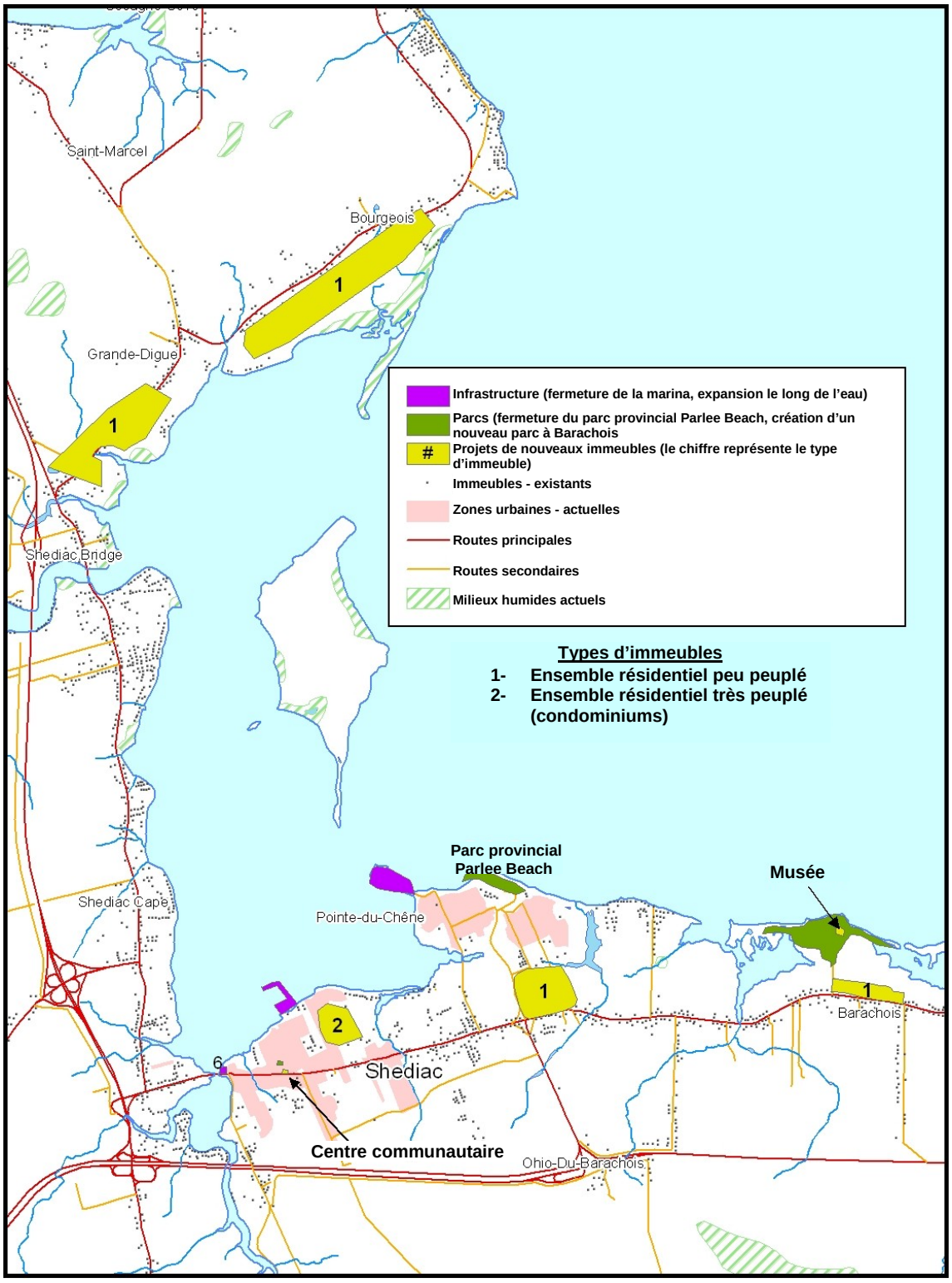


Figure 2 : Aménagements futurs dans le scénario pessimiste

4.7.3.2 Zone à l'étude et méthodologie

Dans chaque étude de cas, l'évaluation économique repose sur des impacts du changement climatique qui restent constants pendant une période économique plausible. Dans l'approche globale, on établit un lien entre les changements atmosphériques et les changements écologiques (réactions physiques et biophysiques). Les changements écologiques sont ensuite reliés aux impacts sociaux et économiques qui en découlent. Les scénarios, qui sont le fruit d'un processus d'engagement communautaire, sont utilisés dans chaque étude de cas pour lever l'incertitude associée aux futures conjonctures sociales et économiques.

Les impacts socioéconomiques ont été évalués sous deux angles : les impacts sur le secteur du tourisme et les coûts des dommages causés à l'infrastructure. Pour évaluer ces impacts, on a eu recours à deux approches d'analyse économique : on a effectué une analyse de l'impact économique afin d'examiner l'impact sur le secteur du tourisme à Bouctouche. On s'est servi des fonctions de la hauteur d'inondation par rapport au coût des dommages ainsi que de la valeur estimée des propriétés pour évaluer les coûts des dommages subis par les propriétés de Shediac.

4.7.3.2.1 Bouctouche : Évaluation des effets intégrés sur le secteur du tourisme

L'étendue géographique de l'étude de cas de Bouctouche est définie par les bassins versants des rivières Bouctouche et Chockpish. Cette région est délimitée au nord par Sainte-Anne-de-Kent, à l'ouest par Sainte-Marie-de-Kent et au sud par Saint-Thomas-de-Kent; Saint-Antoine, Cocagne, Rexton, le parc national Kouchibouguac et Cap-Lumière, entre autres, étaient exclus de l'étude.

La méthodologie utilisée dans le cadre de ce projet a été élaborée par Vanderlinden et Jacques (2004). Les effets du changement climatique et ses répercussions économiques sont reliés aux réactions de l'écologie au changement climatique et aux réactions de l'homme aux changements écologiques. Les réactions de l'écologie sont les changements imposés au milieu biophysique à la suite d'un changement climatique (p. ex. l'érosion des dunes), tandis que les réactions humaines sont la modification du comportement tant chez les exploitants d'entreprises touristiques que chez les touristes (p. ex. retrait, protection et accommodement).

On a utilisé les canevas, les scénarios et un sondage afin d'établir des liens entre les réactions écologiques et les réactions humaines. Les canevas et les scénarios élaborés reposent sur les résultats de l'analyse scientifique menée par les autres composantes de l'étude et ils s'inspirent des discussions avec les intervenants de la communauté. Le sondage a servi à déterminer les réactions des touristes à chaque scénario et à connaître les modifications apportées à leurs activités prévues et à la durée de leur séjour à Bouctouche. Ces changements ont déterminé l'ampleur de l'impact sur l'économie locale.

De plus, on a utilisé un modèle d'intrants/extrants (I/E) afin d'évaluer l'incidence économique de la modification du comportement des touristes au moyen d'un processus connu sous le nom de choc économique. Le choc peut être causé par tout changement apporté aux dépenses, y compris ceux entraînés par des phénomènes naturels. Les effets du choc sont ensuite reportés à l'ensemble de l'économie, laquelle est subdivisée en différents secteurs. Dans cette étude, les deux scénarios socioéconomiques représentent les chocs économiques.

4.7.3.2.2 Baie de Shediac : Coûts des dommages éventuels causés par les ondes de tempête et les inondations côtières

L'étendue géographique de cette étude de cas couvrait (tout en y étant limitée) trois sous-divisions de recensement : la paroisse de Shediac, la ville de Shediac et Beaubassin-est. La méthodologie générale utilisée dans le cadre de l'analyse socioéconomique consistait à identifier, à évaluer et à déterminer la valeur des propriétés et des infrastructures existantes et futures à risque dans des scénarios d'ondes de tempête. L'analyse et l'attribution de la hauteur d'inondation ont été effectuées pour la région couverte par l'étude à deux niveaux d'eau : le niveau d'eau maximum relevé le 21 janvier 2000 et un niveau maximum hypothétique correspondant au scénario du pire de phénomène extrême et d'élévation du niveau de la mer, pour des scénarios socioéconomiques optimiste et pessimiste.

Les scénarios socioéconomiques ont été élaborés par des membres de la communauté afin d'illustrer les modèles de développement futurs. Dans chaque scénario, on a affecté aux attributs de la communauté des hauteurs d'inondation pour les deux niveaux d'eau. L'évaluation des risques qui s'en est suivie a fourni une base de référence permettant d'estimer les coûts d'une inondation par une onde de tempête selon trois scénarios :

- ***Scénario 1*** : 2,5 m au-dessus du zéro des cartes du modèle altimétrique numérique (MAN), structures existantes (phénomène de référence). Ce niveau représente l'onde de tempête du 21 janvier 2000, avec laquelle le niveau d'eau maximum a atteint 2,5 m au-dessus du zéro du MAN. On a prévu que cet épisode se produirait une fois en 40 ans.

- ***Scénario 2*** : 3,0 m au-dessus du zéro du MAN, structures existantes et structures proposées pour le scénario optimiste (pire cas d'onde de tempête). Dans la situation du 21 janvier 2000, le niveau d'eau n'est pas considéré comme le pire des cas. Si cela avait été, le niveau d'eau maximum aurait été proche de 2,8 m au-dessus du zéro du MAN. Actuellement, on prévoit que cet épisode se produira une fois en 100 ans. Le niveau d'eau du pire des cas a été superposé à une élévation relative du niveau de la mer estimée à 0,2 m d'ici 2025, ce qui donne un niveau d'inondation de 3,0 m au-dessus du zéro du MAN.

- ***Scénario 3*** : 3,0 m au-dessus du niveau d'eau du zéro des cartes du MAN, structures existantes et projets de structures pour le scénario pessimiste (pire cas d'onde de tempête).

On a utilisé des fonctions de la hauteur d'inondation par rapport au coût des dommages pour établir un rapport entre les dommages d'une inondation causée par une onde de tempête en termes de hauteur d'inondation et de coût de réparation des dommages. On a tenté d'établir un lien entre la hauteur d'inondation et les coûts des dommages en se fondant sur les dommages subis lors de l'onde de tempête du 21 janvier 2000; toutefois, il n'y avait pas suffisamment de données simples pour établir un lien valide sur le plan statistique. Ainsi, on a utilisé les fonctions hauteur-dommages[28] de l'Army Corps of

[28] Ces fonctions sont fondées sur les dommages réels causés par des inondations qui se sont produites aux États-Unis entre 1996 et 2001.

Engineers (ACE, 2003) des États-Unis (dans le cadre de la recherche, on n'a pas pu trouver de fonctions hauteur-dommages pour le Canada).

Pour évaluer le coût total des dommages causés par les inondations dans la région de l'étude de cas, on a appliqué les fonctions hauteur-dommages aux propriétés qui risquent de subir une inondation de plus de 0,5 m dans les deux scénarios de niveau d'eau. Dans le cadre de cette analyse, on tenait pour acquis que la hauteur d'inondation devait être d'au moins 0,5 m pour que des dommages soient causés à la structure. Cette hypothèse sert à atténuer une partie de l'incertitude liée à l'exactitude verticale des données LiDAR (±30cm) et du fait que le MAN n'indique pas l'emplacement des structures sur chaque parcelle de terrain. Toutefois, comme certains coûts de dommages peuvent être engagés à des niveaux d'inondation inférieurs à 0,5 m, cette hypothèse pourrait entraîner une sous-estimation des coûts des dommages.

Dans le cadre de cette analyse, on a estimé certains des coûts possibles associés à des options d'adaptation générales : retrait, protection et accommodement. En ce qui concerne l'option de retrait, on a utilisé la valeur estimée des propriétés comme valeur substitutive de l'indemnisation minimum et comme base pour évaluer le manque à gagner en taxes et impôts provinciaux et municipaux. Pour l'option de protection, on a tiré parti des informations recueillies dans le cadre du processus d'engagement de la communauté pour estimer les coûts d'immobilisations associés aux mesures de protection et d'accommodement utilisées par le passé par la communauté. Dans le cadre de cette analyse, on n'a pas évalué l'ensemble des coûts associés à l'une ou à l'autre des options, non plus que les avantages spécifiques (dommages évités) d'aucune d'entre elles, donc les résultats sont pour fins de discussion seulement et des recommandations n'ont pas été faites dans cette étude.

4.7.3.3 Rôle de l'incertitude, limites de l'analyse, sources d'erreur

Pour bien se dérouler, l'analyse économique des impacts du changement climatique et de l'adaptation à celui-ci doit s'appuyer sur une base scientifique qui décrit les changements biophysiques éventuels dans la zone côtière à l'intérieur de plages d'incertitude acceptables.

Quand on couple des techniques économiques d'établissement de la valeur (qui comportent leurs propres sources d'incertitude inhérentes) avec des résultats scientifiques, il devient difficile de quantifier l'incertitude cumulative et de représenter cette incertitude dans des intervalles de confiance raisonnables. En général, une analyse économique qui part d'hypothèses dont on peut vérifier la sensibilité est plus facile à quantifier et représente l'incertitude ou les erreurs associées aux estimations finales.

Prévoir des changements socioéconomiques à horizon de 50 ou 100 ans ne permet pas de vérifier les hypothèses socioéconomiques (p. ex. la vitesse de développement, la nature des investissements continus dans l'infrastructure ou le changement de la perception du public quant à la valeur de l'habitat), lesquelles risquent toutes d'influer sur l'exactitude des résultats de l'analyse. En outre, il est très difficile de vérifier ces hypothèses pour comprendre à quel point le résultat final y est sensible.

Dans le cadre de cette étude, nous avons tenté, lorsque c'était possible, de quantifier et de qualifier l'incertitude associée à l'analyse. Nous avons utilisé des scénarios pour

tenter de représenter l'incertitude relative aux conjonctures socioéconomiques futures de même que les impacts du changement climatique. Les résultats de chaque analyse de cas sont des estimations fondées sur le jugement expert et sur les meilleurs outils, techniques et données disponibles. Pour mener cette étude, des hypothèses[29] clés ont été posées tout au long de l'analyse. Les sections suivantes incluent un examen général de certaines des limites et des sources d'erreur comprises dans l'étude.

4.7.3.3.1 Impacts du changement climatique

On ne peut prévoir avec précision les impacts du changement climatique sur les milieux naturels et socioéconomiques. C'est pourquoi certains des scénarios mis au point pour cette étude ne décrivaient les impacts que de manière assez vague. Il est donc possible que les scénarios aient été interprétés différemment par les divers participants.

4.7.3.3.2 Modèle altimétrique numérique

On a eu recours à de multiples scénarios d'onde de tempête afin de représenter deux événements possibles, l'un qui a déjà eu lieu, et l'autre qui constitue un scénario du pire cas superposé à une estimation de l'élévation du niveau de la mer. La hauteur d'eau estimative d'une inondation causée par une onde de tempête inclut une marge d'erreur. Le MAN utilisé pour affecter une hauteur d'eau à chaque parcelle de terrain a une précision verticale de ±30 cm (voir la section 4.4 et le modèle altimétrique numérique). Comme on ne connaît pas l'emplacement exact de chaque structure sur une parcelle de terre, on a calculé une moyenne pondérée de la hauteur d'inondation pour chaque parcelle. En raison de cette incertitude, l'analyse a exclu les propriétés auxquelles on a affecté une hauteur d'inondation de 0,5 m ou moins dans l'estimation des coûts des dommages.

4.7.3.3.3 Scénarios futurs de la conjoncture socioéconomique

Les canevas et les scénarios décrits dans cette analyse ne sont pas des prévisions, mais bien des situations futures plausibles reposant sur un certain nombre d'hypothèses. Pour élaborer ces scénarios, nous avons maintenu constantes de nombreuses variables, notamment la technologie, la sécurité, la macroéconomie (p. ex. le taux de change) et le prix des biens de consommation. Dans les deux études de cas, des scénarios optimistes et pessimistes ont été utilisés pour présenter un éventail de résultats futurs possibles dans lesquels les impacts économiques sont susceptibles de s'inscrire.

4.7.3.3.4 Horizon temporel

Il existe de multiples dimensions à l'incertitude associée au temps, comme le moment de survenue des impacts, le temps et l'évaluation ainsi que les périodes pour lesquelles les ensembles de données ont été recueillis.

L'horizon temporel des impacts du changement climatique ne peut être prévu avec précision; c'est pourquoi les impacts constants du changement climatique ont été évalués sur une période économique plausible. Toutefois, cette analyse n'a évalué les impacts que pour une année ou une occurrence. En réalité, les impacts se cumulent avec le temps. Nous avons ici tenu pour acquis que les impacts prévus des changements climatiques se produiraient d'ici 2025.

[29] Pour plus d'information sur l'incertitude et les hypothèses, voyez les rapports des études des cas de Bouctouche et de Shediac (Murphy et al., 2006a et 2006b).

Les scénarios élaborés dans les études de cas sont fondés sur des changements biophysiques, des réactions humaines et des régimes de développement futur à horizon temporel de 20 ans. Toutefois, les impacts économiques et les coûts des dommages reposent sur la valeur estimative des propriétés et sur les conditions économiques actuelles. Les impacts économiques n'étaient pas fondés sur le nombre d'employés et d'entreprises, ni sur les recettes, ni sur les dépenses caractérisant l'économie locale en 2025. L'analyse des coûts des dommages ne tentait pas non plus de prévoir l'état des valeurs estimées d'ici 2025. L'inflation et la croissance économique auraient été compensées, jusqu'à un certain point, par l'actualisation; cependant, on ignore dans quelle mesure ces estimations peuvent varier.

Les renseignements fournis par Services Nouveau-Brunswick et les commissions de planification sur les parcelles et les caractéristiques dans la région de Shediac reposaient sur des ensembles de données recueillies entre 2001 et 2004, tandis que les données l'ont été en 2003. En tenant compte du fait que l'expansion est rapide le long de cette côte, de nombreuses caractéristiques en place en 2005 ne sont pas rendues par les données LiDAR recueillies ni représentées avec exactitude par les données sur les propriétés fournies par Services Nouveau-Brunswick et les commissions de planification.

4.7.3.3.5 Analyse complète des coûts et avantages

L'analyse entreprise pour chaque étude de cas ne rend pas compte de toute l'étendue des coûts ou des avantages associés aux impacts du changement climatique ou à l'adaptation à celui-ci. Par exemple, alors que l'étude de cas de Bouctouche tente de rendre certains des avantages que tire le secteur touristique de l'adaptation au changement climatique, elle n'évalue pas les coûts des immobilisations ou les coûts de renonciation associés à la mise en œuvre des stratégies d'adaptation.

Dans l'étude de cas de la baie de Shediac, les coûts des dommages causés aux structures ont été estimés, mais d'autres coûts, tels que le remplacement des pertes de contenu, l'hébergement de remplacement, l'enlèvement des débris ou les améliorations paysagères n'ont pas été évalués, non plus que ceux des dommages causés aux routes, aux infrastructures municipales d'aqueduc et d'égout et à d'autres caractéristiques.

Comme l'analyse des coûts est incomplète, les résultats peuvent sous-estimer les coûts réels des dommages et de l'adaptation. En outre, les avantages (dommages évités) ou l'efficacité de ces options ont été exclus de l'analyse. On ne peut donc pas décider s'il y a un avantage d'adaptation net ou si une option en particulier constitue un moyen efficace d'atténuer les impacts de l'élévation du niveau de la mer, de l'érosion des côtes et des ondes de tempête.

4.7.3.3.6 Établissement de la valeur

Les dépenses liées au tourisme et les coûts des dommages utilisés dans les deux études de cas ne reflètent pas les dépenses ni les coûts réels; ils provenaient d'une analyse des tendances et de questionnaires, et reposent sur un certain nombre d'hypothèses.

Dans l'étude de cas de Bouctouche, les dépenses des touristes dans plusieurs secteurs ont été estimées d'après les informations obtenues dans une enquête et des données de sources externes. Elles ne représentent pas les dépenses réelles des touristes dans la région de l'étude de cas de Bouctouche. Comme l'analyse inclut uniquement les

principaux secteurs économiques associés au tourisme, il est possible que cette étude de cas sous-estime les dépenses totales des touristes.

Dans l'étude de cas de la baie de Shediac, les coûts des dommages ont été établis d'après la valeur estimative des propriétés. On a également utilisé cette valeur comme valeur substitutive de l'indemnisation dans l'option d'adaptation par retrait. La valeur estimative ne reflète pas nécessairement la valeur « réelle » d'une propriété; les prix du marché reflètent généralement mieux le véritable coût. Il est donc probable que les valeurs estimatives des propriétés dans cette analyse vont servir à sous-estimer les vrais coûts des dommages et des compensations.

Outre l'élévation du niveau de la mer, les inondations causées par des ondes de tempête et l'erosion des côtes, de nombreuses communautés qui vivent le long de la côte sud-est sont également touchées par les impacts du vent et de la glace durant les phénomènes extrêmes. Par le passé, la plupart des dommages subis durant des tempêtes ont été causés par la combinaison du vent, de la glace et des inondations. Les résultats de Shediac donnent les coûts des dommages d'une inondation causée par une onde de tempête, et cette étude de cas sous-estime probablement l'ensemble des dommages qui seraient causés par une onde de tempête comme celle du 21 janvier 2000.

4.7.3.3.7 Limites géographiques

Les impacts économiques estimés dans cette étude sont limités à certaines régions géographiques. L'étude de cas de la région de Bouctouche était définie par les bassins versants des rivières Bouctouche et Chockpish. Elle exclut donc les principales attractions touristiques le long de la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, comme le parc national Kouchibouguac et la plage Parlee. L'étude de cas de la baie de Shediac comprenait trois sous-divisions de recensement : la paroisse de Shediac, la ville de Shediac et Beaubassin-est. On compte des coûts de dommages dans d'autres sous-divisions de recensement situées hors de ces limites, mais la région couverte par l'étude ne les inclut pas.

4.7.3.3.8 Analyse économique

Les méthodologies et les cadres d'évaluation des impacts économiques du changement climatique évoluent continuellement. À chaque étape de l'analyse, des spécialistes de différents organismes et établissements d'enseignement les ont examinés et ont fourni des commentaires constructifs afin de favoriser la mise au point des méthodologies utilisées dans cette étude. Les méthodologies utilisées sont cependant assorties de sources d'erreur.

L'analyse de l'enquête pour l'étude de cas de Bouctouche a donné un écart type relativement important. Parmi les raisons expliquant cet écart type figurent la petite taille de l'échantillon, la dispersion des réponses à l'enquête et l'erreur cumulative. De plus, un certain nombre de limites et de biais systématiques sont associées à l'outil d'enquête, notamment la possibilité que l'échantillon ne soit pas représentatif, le biais dû à l'absence de réponse, un comportement déclaré différent du comportement réel et l'existence de questions fermées. Il est donc recommandé de ne pas interpréter au pied de la lettre les résultats de l'enquête; ils devraient plutôt constituer des indications d'orientation et d'ampleur.

Comme aucune fonction de la hauteur d'inondation par rapport au coût des dommages n'était disponible pour le Canada ni pour la région de l'étude de cas de la baie de Shediac, on s'est servi des fonctions des dommages passés causés par des inondations aux États-Unis. Ces fonctions ont été directement transposées à la région de l'étude de cas, sans aucun rajustement. De plus, ces fonctions sont fondées sur différents types d'inondations (fluviales et ondes de tempête) et reflètent les dommages causés à différents types de structures résidentielles. Il y a probablement de multiples sources d'erreur associées à ces hypothèses; cependant, on n'a pas pu effectuer d'évaluation quantitative de leur sensibilité. C'est pourquoi il est recommandé de ne pas interpréter au pied de la lettre ces résultats; ils devraient plutôt constituer des indicateurs d'orientation et d'ampleur.

4.7.4 Examen des résultats des études de cas

L'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête et l'érosion des côtes continuent d'avoir une incidence sur les communautés, l'économie et l'environnement dans le sud-est du Nouveau-Brunswick. Cette analyse évalue les impacts économiques du changement climatique sur la région côtière; toutefois, les résultats se limitent à des régions géographiques, des secteurs économiques et des types d'impacts spécifiques.

Les résultats des analyses d'études de cas ne devraient pas être interprétés au pied de la lettre, car ce sont des estimations reposant sur les meilleures informations disponibles. En revanche, ils peuvent indiquer l'orientation de l'impact économique et des coûts des dommages (c.-à-d. positive ou négative) et fournir une idée générale de leur ampleur. Ces informations peuvent être utilisées à des fins d'information et de sensibilisation et être incorporées dans des outils de planification et des processus de prise de décision afin d'améliorer le développement futur.

4.7.4.1 Interprétation des résultats de l'étude de cas de Bouctouche

L'industrie du tourisme dans les environs de Bouctouche contribue pour beaucoup à l'économie du comté de Kent[30]. Les tableaux 2 et 3 montrent les pertes et les gains économiques potentiels, comparés aux niveaux de référence estimés dans cette analyse, dans le comté de Kent selon les scénarios d'adaptation (optimiste et pessimiste).

Tableau 2 . Comté de Kent – comparaison des impacts économiques du changement climatique sur les secteurs culturel et écotouristique de Bouctouche (moyenne).

Scénario	Emplois (années-personnes)	PIB (millions de dollars)
Référence	408	11,3
Optimiste	482	13,5
Pessimiste	302	8,5
Changement dans le scénario optimiste	74	2,2
Changement dans le scénario pessimiste	-106	-2,8

Note : le nombre estimatif d'emplois est arrondi à l'unité la plus proche, et les estimations du PIB à la centaine de milliers la plus proche.

[30] Le comté de Kent est la division de recensement du Nouveau-Brunswick pour Bouctouche.

Tableau 3 . Comté de Kent – comparaison des impacts économiques du changement climatique sur les secteurs culturel et écotouristique de Bouctouche (moyenne plus un écart type).

Scénario	Emplois (années-personnes)	PIB (millions de dollars)
Référence	1 050	28,4
Optimiste	1 137	31,4
Pessimiste	733	20,6
Changement dans le scénario optimiste	87	3,0
Changement dans le scénario pessimiste	-317	-7,8

Note : le nombre estimatif d'emplois est arrondi à l'unité la plus proche, et les estimations du PIB à la centaine de milliers la plus proche.

Il existe une possibilité de gains économiques dans le comté de Kent; en effet, les personnes interrogées dans le cadre de l'enquête ont montré un net intérêt pour les attractions de la région de Bouctouche. Si les impacts du changement climatique dans la région de Bouctouche sont bien gérés au moyen de stratégies d'adaptation (scénario optimiste), l'emploi pourrait s'accroître de 74 à 87 années-personnes, ce qui représente une hausse de 8 % à 18 %. Dans le scénario optimiste, le produit intérieur brut (PIB) du comté de Kent pourrait aussi connaître une croissance de 2,2 M$ à 3,0 M$, soit de 11 % à 19 %.

À l'inverse, il y a un risque de pertes économiques dans le comté de Kent. Dans le scénario pessimiste, l'emploi pourrait baisser de 106 années-personnes pour ne plus en comporter que 317, une réduction de 26 % à 30 %. En outre, le PIB du comté de Kent pourrait diminuer de 2,8 M$ pour s'arrêter à 7,8 M$, une baisse de 25% à 27%.

Dans l'étude de cas de Bouctouche, le tourisme représente également un apport majeur à l'économie du Nouveau-Brunswick. Les tableaux 4 et 5 montrent les impacts possibles sur l'économie de cette province en se fondant sur les changements apportés à l'industrie du tourisme dans la région de Bouctouche.

Tableau 4 . Nouveau-Brunswick – comparaison des impacts économiques du changement climatique sur les secteurs culturel et écotouristique de Bouctouche (moyenne).

Scénario	Emplois (années-personnes)	PIB (millions de dollars)	Recettes fiscales (millions de dollars)	
			Province	Fédéral
Référence	473	15,6	1,8	2,1
Optimiste	560	18,6	2,0	2,5
Pessimiste	353	11,9	1,3	1,6
Changement dans le scénario optimiste	87	3,0	0,2	0,4
Changement dans le scénario pessimiste	-120	-3,7	-0,5	-0,5

Note : le nombre estimatif d'emplois est arrondi à l'unité la plus proche, et les estimations du PIB et des recettes fiscales à la centaine de milliers la plus proche.

Tableau 5 . Nouveau-Brunswick – comparaison des impacts économiques du changement climatique sur les secteurs culturel et écotouristique de Bouctouche (moyenne plus un écart type).

Scénario	Emplois (années-personnes)	PIB (millions de dollars)	Recettes fiscales (millions de dollars)	
			Province	Fédéral
Référence	1 214	39,2	4,4	5,4
Optimiste	1 324	43,8	4,9	5,9
Pessimiste	857	28,9	3,2	3,9
Changement dans le scénario optimiste	110	4,9	0,5	0,5
Changement dans le scénario pessimiste	-357	-10,3	-1,2	-1,5

Note : le nombre estimatif d'emplois est arrondi à l'unité la plus proche, et les estimations du PIB et des recettes fiscales à la centaine de milliers la plus proche.

Avec le scénario optimiste, l'emploi au Nouveau-Brunswick pourrait augmenter de 87 à 110 années-personnes, soit un accroissement de 9 % à 18 %. De plus, le PIB pourrait augmenter de 3,0 M$ à 4,9 M$, une hausse de 12 % à 19 %. En conséquence, les recettes fiscales pourraient aussi s'accroître de 0,2 M$ à 0,5 M$ à l'échelle provinciale et de 0,4 M$ à 0,5 M$ à l'échelle fédérale, soit une hausse de 11 % à 18 %.

Dans le scénario pessimiste, l'emploi au Nouveau-Brunswick pourrait diminuer de 120 à 357 années-personnes, une réduction de 25 % à 29 %. Par ailleurs, le PIB pourrait diminuer de 3,7 M$ à 10,3 M$, une baisse de 24 % à 26 %. Les recettes fiscales fédérales et provinciales pourraient également diminuer si l'industrie touristique de Bouctouche ne réussissait pas à s'adapter aux impacts du changement climatique. Les recettes fiscales provinciales pourraient chuter de 0,5 M$ à 1,2 M$, tandis que celles du fédéral pourraient diminuer de 0,5 M$ à 1,5 M$, une baisse de 24 % à 27 %.

En raison du faible nombre d'échantillons, la variation et l'erreur cumulée des réponses des touristes ainsi que l'écart type du nombre de visites estimé et des profils de dépenses monétaires sont importants. À mentionner qu'en théorie, un changement climatique radical pourrait faire diminuer l'emploi dans le comté de Kent et au Nouveau-Brunswick de beaucoup plus que les estimations des tableaux 2 à 5 pour le scénario pessimiste. Les moyennes estimatives dans le scénario pessimiste, moins un écart type, représentent une réduction à zéro des dépenses touristiques dans la région de Bouctouche. Il est donc concevable que des changements climatiques radicaux puissent avoir un tel impact défavorable sur le tourisme que le nombre de touristes et d'emplois descende à des niveaux beaucoup plus bas.

Dans une perspective plus optimiste, des gains économiques peuvent être réalisés grâce à une adaptation et à une atténuation plus créatives. Toutefois, les mesures d'atténuation doivent être sans danger pour l'environnement. L'asymétrie considérable observée dans cette analyse entre l'éventualité positive (scénario optimiste) et l'éventualité négative (scénario pessimiste) révèle que l'industrie du tourisme est très sensible à un déclin perçu de la qualité de l'environnement dans les zones côtières des environs de Bouctouche. Un taux aussi élevé d'élasticité de la qualité de l'environnement pourrait exacerber les conséquences économiques néfastes de mesures d'atténuation inadéquates le long de la côte.

4.7.4.2 Interprétation des résultats de l'étude de cas de la baie de Shediac

L'étude de cas de la baie de Shediac a déterminé lesquelles des propriétés actuelles et futures risquent de subir une inondation lors d'une onde de tempête avec des niveaux d'eau de 2,5 m et de 3,0 m et les a évaluées. On a également estimé les coûts des dommages causés par chaque onde de tempête aux résidences et à certaines propriétés de loisirs (uniquement des chalets). Enfin, cette analyse a estimé certains des coûts associés aux options générales d'adaptation.

4.7.4.2.1 Propriétés existantes à risque

À l'aide des outils d'application MAN et SIG, l'analyse a déterminé quelles propriétés risquent d'être inondées pendant un épisode d'onde de tempête et la hauteur d'inondation moyenne pondérée (en mètres) pouvant être prévue sur chaque propriété de la zone à l'étude pour des niveaux d'eau de 2,5 m et (pire scénario) de 3,0 m. Les hauteurs d'inondations estimatives étaient regroupées en catégories d'inondation, une échelle de 0 à 6 représentant des plages croissantes de hauteurs d'inondations :

Catégorie d'inondation	Plages de hauteurs d'inondations
0	0 m
1	> 0-0,5 m
2	> 0,5-1,0 m
3	> ,0-1,5 m
4	> 1,5-2,0 m
5	> 2,0-2,5 m
6	> 2,5 m

Les figures 3 et 4 montrent quelles parcelles de terrain risquent d'être inondées lors d'une onde de tempête avec les deux niveaux d'eau. Chaque parcelle de terrain est identifiée par une couleur représentant sa catégorie d'inondation. Par exemple, les parcelles ombrées en vert foncé sont dans la catégorie d'inondation 1, ce qui signifie qu'on s'attend à ce que la hauteur d'inondation moyenne sur cette parcelle pendant une onde de tempête soit inférieure à 0,5 m. Les parcelles ombrées en rouge foncé se situent quant à elles dans la catégorie d'inondation 6, ce qui signifie qu'on s'attend à ce que la hauteur d'inondation moyenne sur cette parcelle pendant une onde de tempête soit supérieure à 2,5 m.

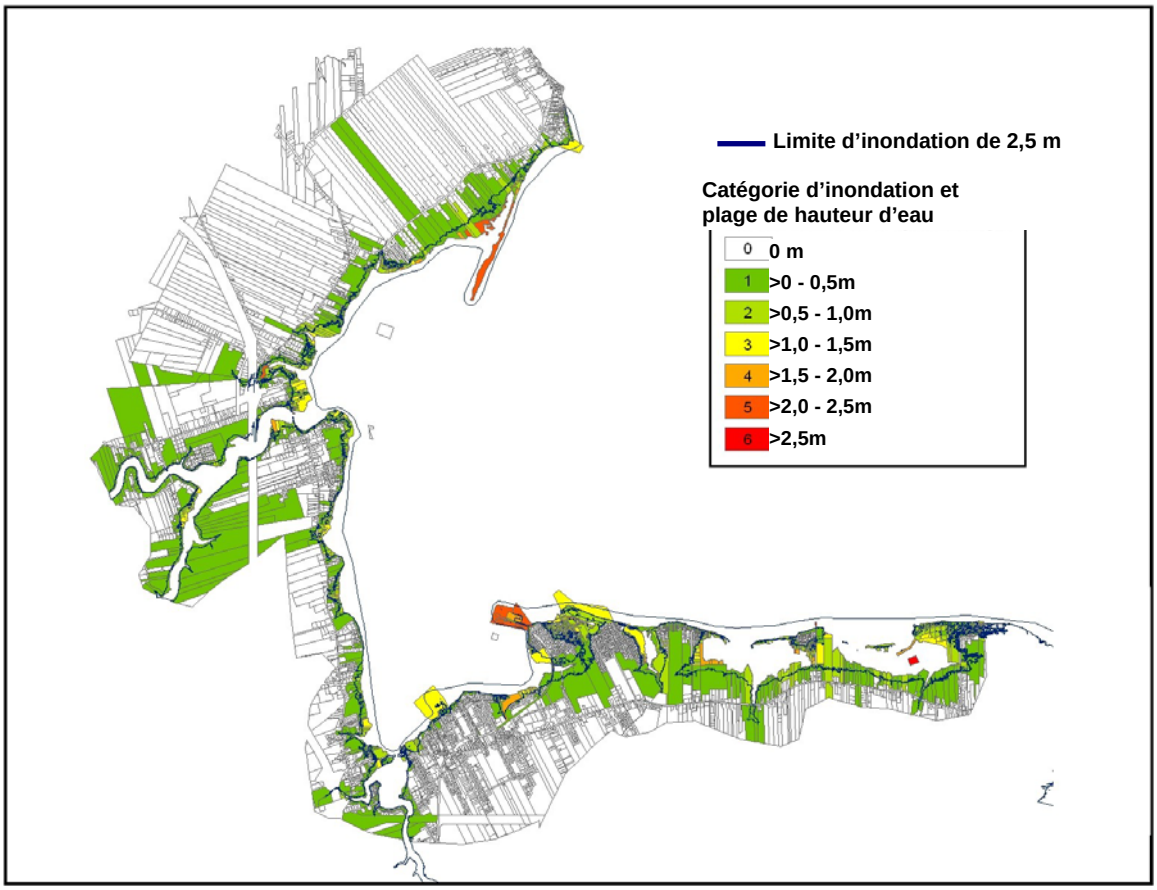


Figure 3. Risque d'inondation des propriétés, niveau d'eau à 2,5 m au-dessus du zéro des cartes du modèle altimétrique numérique (MAN), structures existantes (épisode de référence)

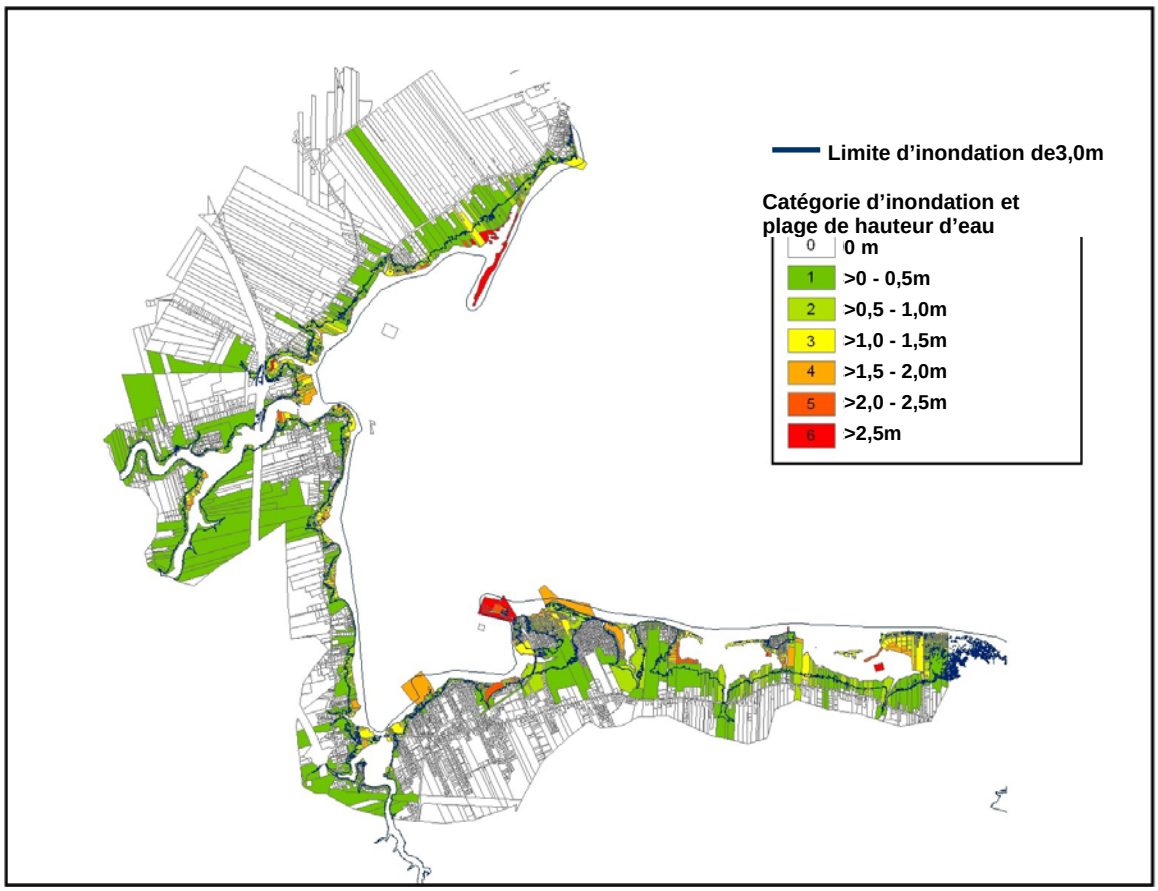


Figure 4. Risque d'inondations des propriétés, niveau d'eau à 3,0 m au-dessus du zéro du MAN, structures existantes

Avec un niveau d'eau de 2,5 m, on évalue que 1 639 propriétés existantes dans la région de l'étude de cas de la baie de Shediac risquent d'être inondées d'une quelconque manière (figures 3 et 5). Leur valeur estimative totalise 117,9 M$. Des 1 639 propriétés à risque, 1 219 sont des propriétés bâties évaluées à 112,0 M$, et 420 sont des propriétés non bâties évaluées à 6,0 M$.[31] Le tableau 6 met en évidence les propriétés par catégorie d'inondation et par type de propriété. Les types de propriétés sont les suivants :

- Résidentiel[32]
- Récréatif[33]

[31] Les propriétés étaient considérées comme « bâties » pour les fins de cette étude si un certain type de structure était indiqué dans le champ de la description de la propriété dans les fichiers de développement des applications-immobilier (DAI). Par ailleurs, les propriétés étaient considérées comme « non bâties » si aucune structure n'était indiquée dans le champ de la description de la propriété dans les fichiers DAI.

[32] Le type de propriété résidentielle inclut des propriétés comme les maisons mobiles, les duplex, les logements individuels et les condominiums. Pour de plus amples renseignements, consultez Services Nouveau-Brunswick (2000).

[33] Le type de propriétés récréatives inclut des propriétés comme les parcs, les terrains de golf, les clubs, les centres communautaires, les marinas et les chalets. Pour de plus amples renseignements, consultez Services Nouveau-Brunswick (2000).

- Commercial
- Industriel
- Institutionnel
- Fermes
- Zones boisées

Avec un niveau d'eau de 3,0 m, un nombre estimatif de 2 003 propriétés existantes dans le secteur de l'étude de cas risquent d'être inondées; leur valeur estimative totalise environ 139,3 M$ (figures 4 et 5 et tableau 7). Des propriétés à risque, 1 498 sont bâties et évaluées à 132,3 M$, et 505 sont non bâties et évaluées à 7,0 M$. Le tableau 7 classe ces propriétés par catégorie d'inondation et type de propriété.

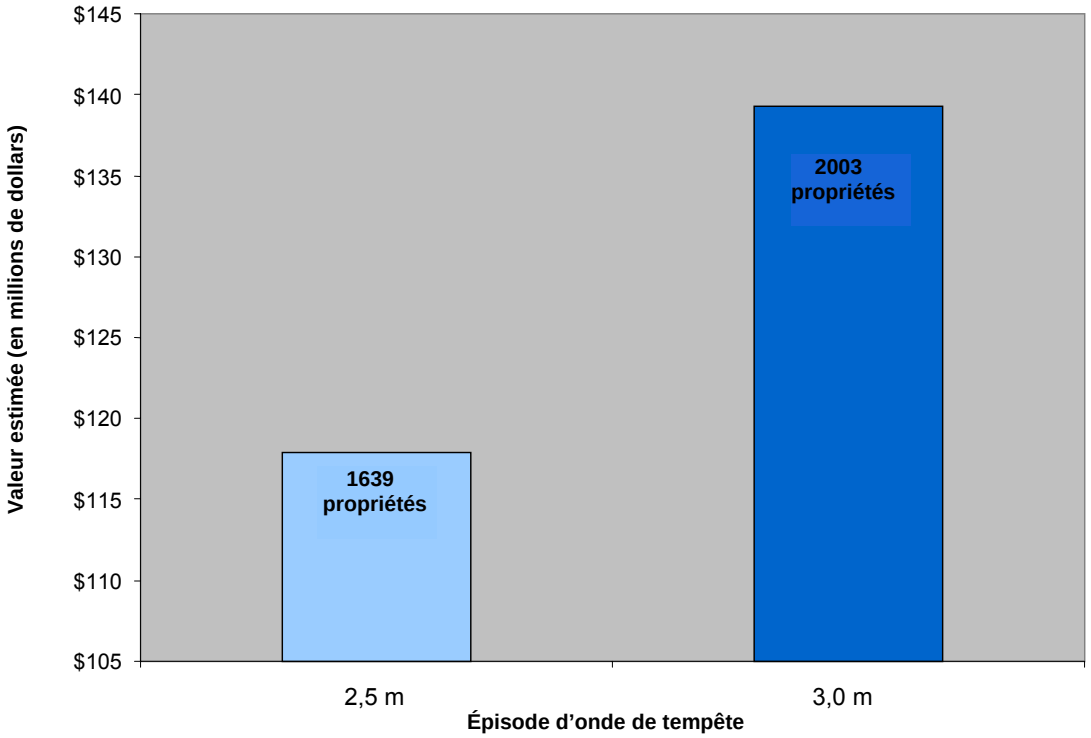


Figure 5. Total des propriétés actuelles à risque d'inondation – épisodes d'ondes de tempête de 2,5 m et 3,0 m

Tableau 6. Propriétés existantes à risque d'inondation – épisode d'onde de tempête de 2,5 m

Catégorie d'inondation	Résidentiel		Commercial & industriel		Institutionnel		Récréatif		Fermes & boisés	
	Nb	Évaluation	Nb	Évaluation	Nb	Évaluation	Nb	Évaluation	Nb	Évaluation
1	535	48 812 700 $	23	4 165 900 $	9	2 169 800 $	600	32 105 700 $	21	457 100 $
2	98	8 501 700 $	8	4 163 200 $	3	39 700 $	234	12 212 900 $	2	57 400 $
3	20	1 509 600 $	0	0 $	1	60 000 $	65	3 309 200 $	1	1 200 $
4	4	14 400 $	1	800 $	0	0 $	7	196 800 $	2	2 700 $
5	1	10 000 $	0	0 $	1	128 300 $	2	3 300 $	0	0 $
6	0	0 $	1	3 500 $	0	0 $	0	0 $	0	0 $
Total	658	58 848 400 $	33	8 333 400 $	14	2 397 800 $	908	47 827 900 $	26	518 400 $

Tableau 7. Propriétés existantes à risque d'inondation – épisode d'onde de tempête de 3,0 m

Catégorie d'inondation	Résidentiel		Commercial & industriel		Institutionnel		Récréatif		Fermes & boisés	
	Nb	Évaluation	Nb	Évaluation	Nb		Nb	Évaluation	Nb	Évaluation
1	530	45 145 200 $	20	4 736 200 $	10	1 646 700 $	467	25 235 000 $	23	416 000 $
2	206	17 951 700 $	13	1 857 900 $	2	740 500 $	336	15 706 600 $	4	123 000 $
3	69	6 072 600 $	8	4 163 200 $	4	99 700 $	213	10 820 800 $	0	0 $
4	16	1 072 000 $	0	800 $	0	0 $	62	3 192 800 $	1	1 200 $
5	4	14 400 $	1	3 500 $	0	0 $	7	196 800 $	2	2 700 $
6	1	10 000 $	1	0 $	1	128 300 $	2	3 300 $	0	0 $
Total	826	70 265 900 $	43	$10,761,600	17	2 615 200 $	1,087	55 155 300 $	30	542 900 $

4.7.4.2.2 Futurs développements à risque

Deux scénarios futurs de la conjoncture socioéconomique ont été élaborés durant le processus d'engagement communautaire. Ces scénarios prévoyaient les modèles de développement futurs dans des conditions de croissance économique optimiste et pessimiste (figures 4 et 5). On a assigné des catégories d'inondation aux futurs attributs identifiés dans les scénarios optimiste et pessimiste pour un niveau d'eau de 3,0 m (scénario de la pire éventualité). La valeur estimative et la valeur réelle des futurs attributs pour chaque scénario sont présentées au tableau 8.

Tableau 8. Valeur des entités dans les scénarios optimiste et pessimiste

Type de propriété	Évaluation (millions de $CAN de 2004)	
	Optimiste	Pessimiste
Résidentiel – faible densité (e)	45,6	18,9
Résidentiel – haute densité (e)	68,5	7,8
Commercial – expansion	Impossible à estimer	s.o.
Commercial – fermeture	s.o.	détails non disponibles
Centre communautaire	Impossible à estimer	Impossible à estimer
Musée	s.o.	Impossible à estimer
Marinas(av) Pointe-du-Chêne – expansion (optimiste) Pointe-du-Chêne – fermeture (pessimiste) Shediac – expansion (dans les deux scénarios)	0,54	0,54
Parc provincial de Parlee Beach (p)	s.o.	1,7

(e) Évaluation basée sur la valeur estimée de 2004 de propriétés similaires dans un rayon de 500 m ou de propriétés similaires dans l'étude de cas de la baie de Shediac.
(av) Valeur estimée de 2004.
(p) Partiel – valeur estimée de la plage Parlee et des bâtiments seulement.
s.o. – sans objet; autrement dit, l'entité n'a pas été mentionnée par les participants à l'atelier.

Dans le scénario optimiste, on avait un total de dix lotissements, dont cinq ne posent aucun risque d'inondation et cinq sont exposés à un risque d'inondation minime (inférieure à 0,5 m). Deux zones commerciales et le centre communautaire proposé dans ce scénario ne présentent pas de risque d'inondation; cependant, on a identifié une zone commerciale comme exposée à un risque d'inondation minime. On avait prévu l'agrandissement des marinas de Pointe-du-Chêne et de Shediac, et ces deux propriétés sont à risque d'inondation – la marina de Pointe-du-Chêne est à risque d'inondation dans la catégorie >1,0 – 2.0 m et la marina de Shediac est à risque d'inondation dans la catégorie >1,0 – 1,5 m. Chacune des neuf zones vertes identifiées pour ce scénario sont situées le long de la côte ou légèrement vers l'intérieur des terres, mais sur le litoral de la rivière Shediac. La proximité de l'eau place ces développements à risque de niveaux d'inondation élevés – toutes les zones vertes sont à risque d'au moins 0,5 m d'inondation.

Dans le scénario pessimiste, on avait un total de cinq lotissements résidentiels, dont deux ne présentaient aucun risque d'inondation et trois risquaient d'être légèrement inondés. La propriété commerciale prévue est située le long de la côte et classée dans la catégorie d'inondation 5. La fermeture de la marina de Pointe-du-Chêne et

l'agrandissement et l'amélioration de la marina de Shediac figuraient dans ce scénario; les deux marinas sont à risque d'inondation. La fermeture du parc provincial Parlee Beach et la mise en valeur d'un nouveau parc près de Barachois faisaient également partie de ce scénario; Parlee Beach se classe dans la catégorie d'inondation 2 (hauteur d'inondation moyenne entre 0,5 m et 1,0 m), et le parc près de Barachois dans la catégorie 3 (hauteur d'inondation moyenne entre 1,0 m et 1,5 m). Le centre communautaire proposé identifié dans ce scénario ne court aucun risque d'inondation.

Le tableau 8 regroupe les futurs attributs pour chaque scénario, par type de propriété. Dans certains cas, une valeur estimative a été établie à partir de la valeur estimative moyenne des propriétés avoisinantes.

4.7.4.2.3 Coûts des dommages estimés pour les maisons et les chalets

On a utilisé des fonctions de la hauteur d'inondation par rapport au coût des dommages pour estimer les coûts des dommages causés à la structure de maisons et de chalets existants associés à des inondations causées par des niveaux d'eau de 2,5 m et de 3,0 m dans la région étudiée de la baie de Shediac (tableau 9 et figure 6). On tenait pour acquis que la hauteur d'inondation doit être d'au moins 0,5 m pour que des dommages soient causés à la structure. Les propriétés susceptibles de connaître une inondation minimale (catégorie d'inondation 1, hauteur d'inondation inférieure à 0,5 m) étaient exclues de l'analyse. Il s'agit ici de toutes les futures propriétés résidentielles prévues dans les scénarios optimistes et pessimistes qui présentent un risque d'inondation; ces propriétés ne risquent de subir qu'une inondation minimale avec une onde de tempête et un niveau d'eau de 3,0 m.

On peut s'attendre à ce que 277 maisons et chalets subissent des dommages avec une onde de tempête donnant un niveau d'eau de 2,5 m (tableau 9). La valeur estimative totale de ces propriétés s'élève à 21,7 M$ et les coûts des dommages sont estimés à près de 7,1 M$, soit environ 33 % de la valeur estimative totale.

Avec un scénario d'onde de tempête donnant un niveau d'eau de 3,0 m, on s'attend à ce que 644 maisons et chalets subissent des dommages. La valeur estimative totale de ces propriétés s'élève à près de 48,9 M$, tandis que les coûts des dommages sont estimés à près de 17,6 M$, soit environ 36 % de la valeur estimative totale.

La figure 6 illustre les coûts des dommages estimés causés aux maisons et aux chalets pour chaque scénario de niveau d'eau, par catégorie d'inondation. Les nouvelles zones résidentielles identifiées, pour les scenarios optimistes et pessimistes, sont soit à aucun risque, ou à de faibles risques d'inondation (moins que 0,5 m de profondeur), donc les coûts des dommages ont été assumés nuls.

Tableau 9 . Coûts estimatifs ($CAN de 2004) des dommages aux maisons et chalets existants, dans des scénarios d'onde de tempête de 2,5 m et de 3,0 m

Catégorie d'inondation	Onde de tempête de 2,5 m			Onde de tempête de 3,0 m		
	Nb	Évaluation	Coûts des dommages	Nb	Évaluation	Coûts des dommages
2	230	18 415 600 $	5 793 694 $	408	31 319 700 $	9 908 503 $
3	47	3 310 600 $	1 336 620 $	194	14 780 600 $	6 319 199 $
4	0	0 $	0 $	42	2 799 000 $	1 411 735 $
5	0	0 $	0 $	0	0 $	0 $
6	0	0 $	0 $	0	0 $	0 $
Total	**277**	**21 726 200 $**	**7 130 314 $**	**644**	**48 899 300 $**	**17 639 437 $**

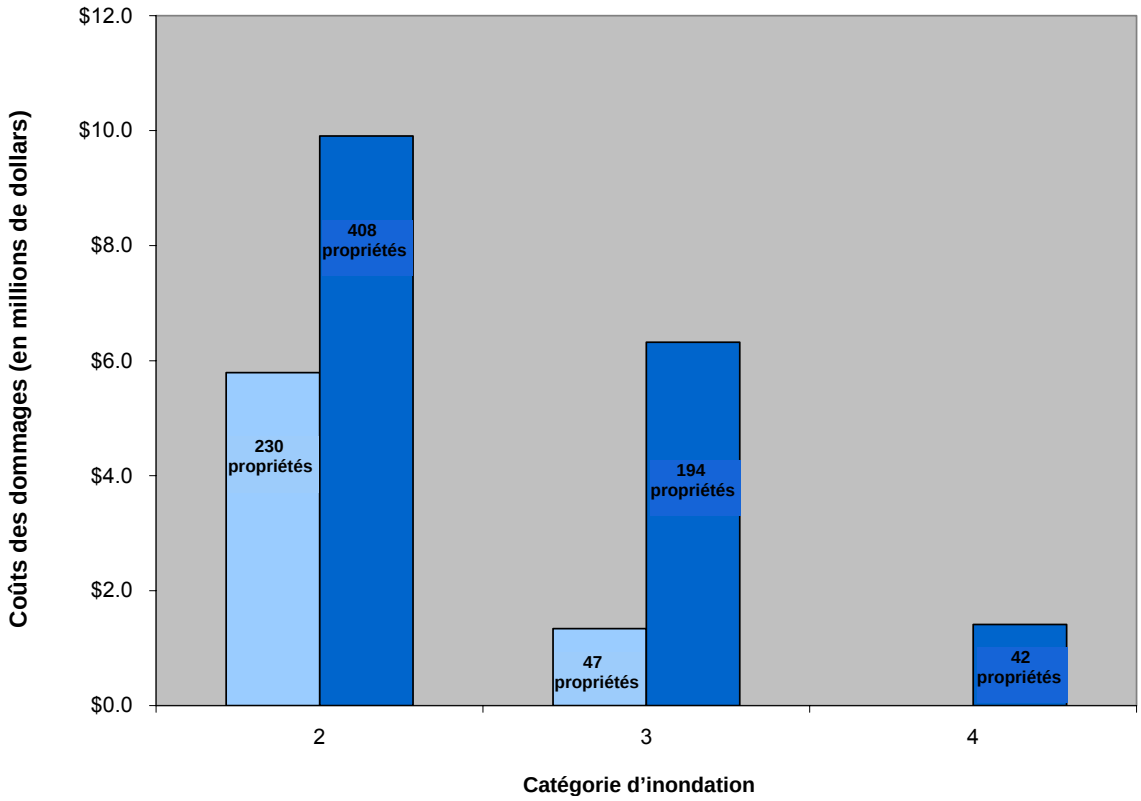


Figure 6. Coûts estimatifs ($CAN de 2004) des dommages aux maisons et chalets existants, dans des scénarios d'onde de tempête de 2,5 m et de 3,0 m.

4.7.4.2.4 Coûts d'adaptation

Retrait

En vue de réduire au minimum les impacts sur l'homme, de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête dans la zone côtière, l'option du retrait peut être envisagée, seule ou conjuguée à d'autres mesures d'adaptation. Dans cette analyse, on a estimé l'indemnisation minimum requise par les propriétaires et le manque à gagner en taxes et impôts provinciaux et municipaux. Dans cette option d'adaptation hypothétique, on tenait pour acquis que les propriétés dont la hauteur d'inondation moyenne est de 1,5 m ou plus (catégories d'inondation 4, 5 et 6) résultant d'une onde de tempête avec un niveau d'eau de 2,5 m devront être déménagées.

Le tableau 10 indique le nombre de propriétés bâties et non bâties (par type de propriété) et leur valeur estimative totale dans les catégories 4, 5 et 6. En tout, on compte 42 propriétés bâties et 52 propriétés non bâties de catégorie 4, 5 ou 6. Les coûts minimums d'indemnisation se chiffrent à 2,8 M$ pour les propriétés bâties et à près de 560 000 $ pour les propriétés non bâties.

Le tableau 11 montre le manque à gagner fiscal de la province et des municipalités entraîné par l'option de retrait. En tout, 92 propriétés résidentielles et deux propriétés non résidentielles tombent dans des catégories d'inondation 4, 5 et 6. Au total, on évalue le manque à gagner fiscal provincial pour les propriétés à 50 400 $ par année et le manque à gagner fiscal municipal pour les propriétés à 49 700 $ par année. Enfin, on évalue le manque à gagner fiscal total entraîné par l'option de retrait à 100 000 $ par année.

Tableau 10. Coûts estimatifs ($CAN de 2004) de dédommagement minimum, dans l'option d'adaptation par retrait.

Type de propriété	Bâtie		Non bâtie	
	Nombre de propriétés	Évaluation	Nombre de propriétés	Évaluation
Résidentiel	12	1 005 400 $	40	498 700 $
Commercial	0	0 $	2	4 300 $
Industriel	0	0 $	0	0 $
Institutionnel	0	0 $	0	0 $
Récréatif	30	1 793 600 $	39	461 800 $
Fermes	0	0 $	3	3 900 $
TOTAL	**42**	**2 799 000 $**	**84**	**968 700 $**

Note : Dans l'hypothèse où l'option du retrait concerne les propriétés des catégories d'inondation 4, 5 et 6.

Tableau 11. Manque à gagner fiscal ($CAN de 2004), dans l'option d'adaptation par retrait.

Type de propriété	Nombre de propriétés	Impôt provincial	Impôt municipal	Impôt total
Résidentiel	124	56 451 $	55 638 $	**112 089 $**
Non résidentiel	2	97 $	95 $	**192 $**
Total	**126**	**56 548 $**	**55 733 $**	**112 281 $**

Note : Dans l'hypothèse où l'option du retrait concerne les propriétés des catégories d'inondation 4, 5 et 6. Les impôts sont calculés sur la base des taux d'imposition de 2004 pour la ville de Shediac.

Options de protection et accommodement

En discutant avec les intervenants, nous avons observé qu'un certain nombre de membres de la communauté ont déjà pris des mesures de protection pour réduire les impacts de l'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête et l'erosion des côtes. Le long de la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, de nombreux propriétaires ont tenté de s'adapter aux impacts du changement climatique en adoptant des mesures de protection et d'accommodement. La liste suivante, établie d'après les commentaires des membres de la communauté, d'organismes et d'autres intervenants, énumère certaines des approches d'adaptation qui ont déjà été utilisées dans le sud-est du Nouveau-Brunswick, de même que certains coûts estimés :

- Protection : Pour protéger leurs propriétés des inondations, les propriétaires ont érigé des structures de protection rigides, comme des murs de soutènement, pour réduire le risque d'inondation. Des consultations avec les membres de la communauté ont permis d'estimer le coût de construction d'un mur de soutènement à 1 000 dollars par mètre carré de surface de base.

- Accommodement : Les autres mesures prises pour atténuer les impacts de l'élévation du niveau de la mer et des inondations causées par des ondes de tempête ont été de continuer à habiter le long de la côte tout en apportant des ajustements aux édifices et à l'infrastructure afin de s'adapter aux changements du niveau de la mer. Par exemple, de nombreux propriétaires ont surélevé des constructions sur pilotis pour réduire les risques d'inondation. Le coût de cette solution varie en fonction d'un certain nombre de variables, dont la taille de la construction, la hauteur à laquelle on souhaite la surélever, l'entrepreneur ainsi que les matériaux requis.

4.7.5 Sommaire et conclusions

L'élévation du niveau de la mer, l'erosion des côtes et l'augmentation d'intensité et de fréquence des ondes de tempête ont des impacts socioéconomiques importants sur les communautés côtières, les écosystèmes et différents secteurs économiques. Cette analyse a évalué certains des coûts et des avantages de l'adaptation à ces impacts par l'entremise d'un engagement des communautés ainsi qu'une approche par études de cas.

Un élément clé de ce projet est l'engagement de la communauté et le renforcement des connaissances et de la compréhension, à l'échelle locale, du processus de changement

du littoral et de l'adaptation à celui-ci. Des résultats clés de ce processus d'engagement des communautés incluent :

- Les premières entrevues avec les communautés ont montré que les attitudes face aux impacts des phénomènes extrêmes étaient principalement réactives; il est pourtant beaucoup plus de l'intérêt des communautés d'adopter une approche plus proactive.

- Le processus d'engagement des communautés a permis à cette recherche de répondre plus efficacement à leurs besoins et de proposer des recommandations d'adaptation pertinentes. Il a aussi fourni l'occasion de les sensibiliser davantage au changement climatique.

- Les communautés dans la zone à l'étude devront s'approprier les résultats et les interpréter dans leur contexte propre, et collaborer avec les divers intervenants de décideurs pour renforcer une capacité d'adaptation face aux conséquences du changement climatique.

On a choisi des études de cas afin de représenter les types d'impacts et de problèmes que peut entraîner le changement climatique et de faciliter une analyse détaillée. Les informations et les données utilisées pour estimer les impacts économiques se limitent à la région géographique de chaque étude de cas. Bien que la méthodologie et les approches utilisées dans cette analyse soient transférables, les résultats ne sont pas directement applicables à d'autres endroits.

Les effets du changement climatique sont de plus en plus préoccupants pour les exploitants d'entreprises touristiques du sud-est du Nouveau-Brunswick, car les secteurs de l'écotourisme et du tourisme culturel se sont développés rapidement dans les dix dernières années, et les activités touristiques sont perturbées par l'érosion et les ondes de tempête lors des tempêtes extrêmes. On a choisi la région de Bouctouche pour évaluer les impacts économiques des changements climatiques sur l'industrie touristique. Ce cas d'étude a estimé les avantages économiques après que l'industrie du tourisme a mis en œuvre des mesures d'adaptation À l'inverse, il a estimé les pertes économiques après que le secteur du tourisme a échoué dans sa tentative d'atténuer les impacts de l'élévation du niveau de la mer, de l'erosion des côtes et des ondes de tempête ou de s'en protéger. Des résultats clés de l'étude de cas de Bouctouche incluent :

- De nombreuses personnes qui visitent Bouctouche reconnaissent que le changement climatique a des répercussions sur toutes les communautés côtières de l'est de l'Amérique du Nord. Grâce à des stratégies d'adaptation et d'atténuation réfléchies, le secteur du tourisme de Bouctouche pourrait connaître une croissance économique. En revanche, ne pas réussir à s'adapter au changement climatique pourrait se traduire par des pertes dans l'industrie touristique. La prise de mesures d'adaptation appropriées sera un élément essentiel pour déterminer si les conséquences du changement climatique feront croître ou décliner l'industrie du tourisme dans la région de Bouctouche.

- Dans un scénario optimiste où le secteur du tourisme réussit à gérer les impacts du changement climatique au moyen de stratégies d'adaptation, on note dans le comté de Kent et au Nouveau-Brunswick une possibilité de gains économiques, comparé aux niveaux de référence. L'emploi dans le comté de Kent et au Nouveau-Brunswick pourrait augmenter de 8% à 18%, et l'accroissement du PIB dans le comté de Kent de l'ordre de 11% à 19%. Les recettes fiscales provinciales et fédérales pourraient éventuellement connaître une hausse de 11 % à 18 %.

- Dans un scénario pessimiste d'échec du secteur du tourisme à atténuer les impacts du changement climatique ou à s'y adapter, on note dans le comté de Kent et au Nouveau-Brunswick une possibilité de perte économique comparé aux niveaux de référence, de diminution de l'emploi de 25 % à 30 % et de chute du PIB dans le comté de Kent de 25 % à 27 %.

Les propriétés et les infrastructures qui se trouvent dans les communautés côtières sont également menacées par l'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête. À la suite de l'onde de tempête du 21 janvier 2000, déclarée catastrophe par le gouvernement fédéral, 198 réclamations pour dommages ont été déposées devant l'Organisation des mesures d'urgence du Nouveau-Brunswick (OMU), et 43 étaient admissibles à un financement, pour un total de près de 1,5 million de dollars (K. Wilmot, communication personnelle, OMU, Nouveau-Brunswick). Pour comprendre l'ampleur de ces impacts sur les communautés côtières, cette analyse a déterminé quelles propriétés risquent d'être inondées et a quantifié les coûts des dommages éventuels associés aux ondes de tempête. De plus, l'analyse a estimé certains des coûts associés aux options d'adaptation (retrait, protection et accommodement). Des résultats clés de ce cas d'étude incluent:

- Les scénarios futurs ont été élaborés par des intervenants de la communauté d'après des canevas qui décrivaient des changements aux principaux moteurs économiques. Dans le scénario optimiste, la communauté a prévu dix nouvelles zones résidentielles (valeur estimée : 114,1 M$), l'expansion de trois zones commerciales, l'agrandissement de deux marinas et l'ajout de neuf nouvelles zones vertes. Par ailleurs, dans le scénario pessimiste, la communauté a prévu cinq nouvelles zones résidentielles (valeur estimée : 26,7 M$), la fermeture de certaines entreprises commerciales, de nouveaux services publics ainsi qu'une nouvelle zone verte. Dans cette étude, les coûts des dommages aux propriétés résidentielles ont été estimés. Les nouvelles zones résidentielles identifiées, pour les scenarios optimistes et pessimistes, sont soit à aucun risque, ou à de faibles risques (moins que 0,5 m de profondeur) d'inondation, donc les coûts des dommages ont été assumés nuls.

- Les propriétés et l'infrastructure non résidentielles dans l'étude de cas de la baie de Shediac risquent d'être inondées par les ondes de tempête. Une onde de tempête avec un niveau d'eau de 2,5 m au-dessus du zéro du MAN (comme le 21 janvier 2000) place environ 1 639 propriétés existantes de la baie de Shediac à risque d'être inondées dans une certaine mesure. La valeur estimée totale de ces propriétés est évaluée à 117,9 M$. Avec une onde de tempête donnant un niveau d'eau de 3,0 m au-dessus du zéro du MAN, environ 2 003 propriétés existantes dans la région de

l'étude de cas risquent d'être inondées dans une certaine mesure. La valeur estimée totale de ces propriétés est évaluée à 139,3 M$.

- Pour une onde de tempête donnant un niveau d'eau de 2,5 m au-dessus du zéro du MAN dans la région de l'étude de cas de la baie de Shediac, on estime que 277 propriétés résidentielles (y compris les chalets) subiraient des dommages. La valeur estimative totale de ces propriétés est évaluée à 21,7 M$. Les coûts des dommages représentent à peu près le tiers de cette valeur. Pour une onde de tempête donnant un niveau d'eau de 3,0 m au-dessus du zéro du MAN dans la région de l'étude de cas, on estime que 644 résidences risquent de subir des dommages. La valeur estimative totale de ces propriétés est évaluée à près de 48,9 M$ et les coûts des dommages à près de 17,6 M$, soit environ 36 % du total des valeurs estimatives.

- On peut réduire au minimum les impacts de l'élévation du niveau de la mer et des inondations causées par les ondes de tempête en mettant en œuvre des stratégies d'adaptation. Lorsqu'on évalue différentes stratégies d'adaptation, l'ensemble des coûts et des avantages de chaque stratégie devrait être incorporé dans le processus de prise de décision. Même si, dans le cadre de cette analyse, on n'a pas évalué le total des coûts et des avantages d'options d'adaptation spécifiques, on a estimé certains des coûts possibles d'options d'adaptation générales. Si le retrait est une option envisagée, l'indemnisation minimum estimée requise pour 94 propriétés se classant dans les catégories d'inondation 4, 5 et 6 se chiffre à près de 3,4 M$ et le manque à gagner fiscal total sur les propriétés (province et municipalités) est évalué à 100 000 dollars par année. Quelques options de protection et d'aménagement ont également été évaluées à la lumière de consultations tenues avec différentes communautés et différents intervenants. Les coûts estimatifs d'immobilisations, d'après des gens de la communauté, s'élèvent à 1 000 dollars par mètre carré de surface de base pour construire un mur de protection.

Les résultats de cette analyse ne doivent pas être interprétés au pied de la lettre, car il s'agit d'estimations qui reposent sur les meilleures informations disponibles. Par ailleurs, ils peuvent servir d'indicateurs et d'estimations de l'ampleur à des fins d'information et de sensibilisation. De plus, on peut les appliquer à des processus décisionnels locaux relatifs à la gouvernance, à la gestion des zones côtières et à l'adaptation.

4.7.5.1 Recommandations pour les études subséquentes

L'évaluation des impacts du changement climatique et des stratégies d'adaptation d'un point de vue socioéconomique n'en est encore qu'à ses premiers balbutiements. Il reste encore de nombreuses questions empiriques et méthodologiques à surmonter. Cette analyse a fait appel à un certain nombre d'outils et de techniques économiques pour évaluer les impacts du changement climatique dans la zone côtière. Tout au long de l'étude, on a noté les possibilités et tout ce qui était matière à amélioration. Les points suivants sont des recommandations dont les études subséquentes devraient tenir compte afin d'améliorer et de renforcer les méthodologies, les approches, les outils et les techniques :

- Les limites en matière de données imposent des contraintes quant au type d'analyse et à la portée de l'étude. Faire en sorte que des structures de surveillance soient en place pour recueillir les données physiques et biophysiques contribuera à réduire l'incertitude et favorisera une évaluation des impacts sociaux et économiques.

- Continuer de recueillir des informations sur la façon dont le comportement des touristes pourrait changer dans différents scénarios de changement climatique permettra à l'industrie touristique d'élaborer et de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation afin de garantir sa viabilité et sa durabilité. À l'avenir, dans le cadre des études, on devrait faire en sorte que les informations soient recueillies à partir d'échantillons de taille appropriée et les outils d'enquêtes efficaces.

- Il serait désirable d'étendre la portée de ces types d'études à des régions géographiques plus étendues et à d'autres secteurs, communautés et écosystèmes. Par exemple, on pourrait évaluer les impacts économiques du secteur touristique pour toute la route du littoral acadien, étant donné que les touristes visitent un grand nombre d'attractions situées sur la côte sud-est du Nouveau-Brunswick (du parc national Kouchibouguac jusqu'à la plage Parlee).

- Pour des raisons de temps, on n'a pas pu évaluer les valeurs non marchandes associées au changement de disponibilité des types d'habitat (en raison de l'élévation du niveau de la mer, de l'erosion des côtes et des ondes de tempête). Les résultats et les données de la sous-composante sur l'écosystème pourraient être utilisés pour étoffer une évaluation de l'écosystème.

- Il faudrait s'informer une fois de plus auprès des bureaux des mesures d'urgence, de Sécurité publique et Protection civile Canada ainsi que du secteur de l'assurance afin d'étudier la possibilité d'établir des courbes de hauteur-dommages pour les inondations au Canada ou au Canada atlantique.

- L'élaboration et l'application d'un cadre d'établissement des coûts pour les stratégies d'adaptation orienteraient les gouvernements, les agences de développement économique, les commissions de planification ainsi que les communautés sur la façon d'évaluer les coûts associés à différentes stratégies d'adaptation et leur permettraient d'incorporer ce genre d'approche dans leur processus de prise de décisions.

- Les résultats de cette étude faciliteront les consultations et permettront à terme de mettre en lumière de multiples stratégies d'adaptation pour la province ainsi que divers secteurs et communautés. On devrait effectuer l'analyse du total des coûts et des avantages de chaque stratégie d'adaptation et l'intégrer dans un processus décisionnel.

4.7.6 Remerciements

Nous tenons à remercier le Programme sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques, Sécurité publique et Protection civile Canada, le Fonds en fiducie pour l'environnement du ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick et le Secteur des sciences de la terre de Ressources naturelles Canada pour l'appui financier qu'ils ont fourni aux présents travaux. Nous voulons aussi souligner l'appui du

Service hydrographique du Canada (Charles O'Reilly et Fred Carmichael), d'Environnement Canada (Jim Abraham) pour ce qui est des installations marégraphiques; de la Division de l'analyse stratégique et de la recherche d'Environnement Canada pour l'évaluation des dimensions socioéconomiques reliées aux impacts des changements climatiques. Les éléments marée de WebTide ont été généreusement fournis par Charles Hannah, de l'Institut océanographique de Bedford. Merci également à Tim Webster, qui nous a donné accès au MAN et prodigué des conseils précieux.

Des contributions importantes ont été fournies par plusieurs organisations et par certaines personnes, comme suit : la Commission d'aménagement Beaubassin, particulièrement Sylvain Losier, Sébastien Doiron et Marc Ouellette; les résidents de la baie de Shediac; Jean Goguen (Commission d'aménagement Kent); Géraldine Arsenault (Éco-Centre Irving de la Dune de Bouctouche); Paul LeBlanc (Le Pays de la Sagouine); Guy Léger (Entreprises Kent); l'Université de Moncton, particulièrement Louis-Samuel Jacques, Omer Chouinard, Jean-Paul Vanderlinden, Kénel Délusca et Murielle Tremblay; Guy Bérubé (Services Nouveau-Brunswick); Conrad LeBlanc (Consultant privé); Karl Wilmot (Organisation des mesures d'urgence du Nouveau-Brunswick); Marcel LeBreton (EcoTec Consultants); Anne Monette, Emily Austin, Natalie Fitzgerald, Matt Mahoney, Lesley Carter, Tiffany Chase, Susan Corning, Lynda Danquah, Tim Folkins, Ian Hickey, Peter Johnson, John Keefe, David Kelly, Danielle Laprise et Gary Lines (Environnement Canada); Paul Jordan (Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick); Aining Zhang (Ressources naturelles Canada).

4.7.7 Références

Environnement Canada (1997). *Impact et adaptation à la variabilité et au changement du climat à l'Atlantique : volume VI de l'Étude pancanadienne.*

Macdonald, R. 2005. *BOOK REVIEW: The Tools of Government: A Guide to the New Governance by Lester M. Salamon, ed.,* (Oxford: Oxford University Press, 2002), xii, 669 pages.*Connecting Research to Policy - Book Review* http://policyresearch.gc.ca/page.asp?pagenm=v6n1_art_12

Marsden, T. et Murdoch, J., 1998. Editorial:The Shifting Nature of Rural Governance and Community Participation. *Journal of Rural Studies,*Vol.**14**,(1),pp.1-4.

Murphy, K., DeBaie, L. ; Austen, E ; Fitzgerald, N. et Daigle, R. (Environnement Canada), Jacques, L.; Vanderlinden, J. (Université de Moncton), LaBreton, M. (EcoTec Consultants). (2005) *Bouctouche Case Study:* Evaluating Integrated Effects upon Tourism in Bouctouche. Environnement Canada-Région de l'Atlantique.

Murphy, K., DeBaie, L., Monette, A., Mahoney, M., Daigle, R. (2006b) *Shediac Bay Case Study: Potential Damage Costs from Sea Level Rise and Storm Surge Events.* Environnement Canada-Région de l'Atlantique.

Nakicenovic, N., and Swart, R. (editeurs) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Netherlands.

Service Nouveau-Brunswick 2000. *User Guide for Real Property Attribute Data Version 2.0*. SNB, Moncton.

Smit B. et Pilifosova, O. 2003. From adaptation to adaptive capacity and vulnerability reduction. *In* Climate change adaptive capacity and development. Sith, J.B., R.J.T. Klein et S. Huq, Eds. Imperial College Press.

UK Climate Impacts Programme, (2001), *Socio-economic scenarios for climate change impact assessment: a guide to their use in the UK Climate Impacts Programme.* UKCIP, Oxford.

USACE (U.S. Army Corps of Engineers). 2003. *Generic depth–damage relationships for residential structures with basements*. Economic Guidance Memorandum 04-01, Directorate of Civil Works Planning and Policy, U.S. Army Corps of Engineers, 10 octobre.

Van den Hove, Sybille, 2000. Participatory approaches to environmental policy-making: the European Commission Climate Policy Process as a case study. Ecological Economics **33** (2000)457–472.

Vanderlinden, J.-P. et Jacques, L.-S. (2004). *Methodology for assessing the economic impacts of climate change on the ecotourism and cultural tourism sectors: Bouctouche case study*. Rapport présenté à Environnement Canada, Contract KW20330462

4.8 Stratégies de mesures d'adaptation

Susan Nichols[1]*, Omer Chounaird[2], Hazel Onsrud[1], Michael Sutherland[3] et Gilles Martin[4]

[1] Université du Nouveau-Brunswick, Département de géodésie et de géomatique, Head Hall, 12, prom. Dineen, C.P. 4400, Fredericton, Nouveau-Brunswick, Canada E3B 9K2
[2] Directeur du Programme de la maîtrise en environnement, Pav. P.-A. Landry # 137, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada E1A 3E9
[3]École de gestion, Université d'Ottawa, 136, Jean-Jacques Lussier Privée, Ottawa, Ontario, Canada K1N 6N5
[4]Professionnel de recherche, Pav. P.-A. Landry # 137, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada E1A 3E9

*contact de l'auteur [courriel: nichols@unb.ca].

4.8.1 Introduction

Par adaptation, nous entendons le processus qui consiste à s'ajuster à un ensemble de circonstances qui ont modifié l'environnement naturel ou construit. Ce processus comprend l'élaboration de stratégies, soit pour contrer une menace pesant sur l'environnement existant, soit pour mettre à profit un changement positif. Comme l'adaptation est un processus, elle est intimement associée à l'analyse des impacts et aux stratégies d'atténuation, qu'il s'agisse de réduire le dioxyde de carbone ou de construire des ouvrages de protection le long du littoral. Par conséquent, les recherches sur l'adaptation présentées dans cette partie sont directement liées aux sections précédentes, particulièrement la section 4.7 sur l'évaluation des impacts, laquelle en définitive fait partie intégrante du cadre d'adaptation, qui est plus vaste.

4.8.1.1 Objectifs de la composante adaptation et méthodologie/justification générales

Les objectifs de la composante adaptation étaient les suivants :

1. Construire un site Web pour établir des liens avec d'autres recherches et présenter les résultats obtenus, afin de les soumettre à la critique.
2. Construire une base de données accessible par le site Web, présentant les stratégies d'adaptation utilisées au Canada et à l'étranger, ainsi qu'une évaluation de leurs succès et de leurs limites, quand cette information sera disponible.
3. Élaborer un cadre multidimensionnel permettant d'identifier, de classifier et de créer une gamme de stratégies d'adaptation.
4. Présenter un atelier dans les zones pilotes afin d'obtenir les commentaires des intervenants et de communiquer les résultats.
5. Élaborer un ensemble de lignes directrices et de pratiques exemplaires pour la participation de la communauté aux stratégies d'adaptation.
6. Tester le cadre dans les zones pilotes et les stratégies recommandées.

Les deux premiers objectifs ont été réalisés au cours de la première phase de recherche. Le site Web est hébergé par l'Université du Nouveau-Brunswick :

http://gge.unb.ca/Research/OceanGov/adaptation/

Un rapport, préparé pour le Bureau de la protection des infrastructures essentielles et de la protection civile (BPIEPC) en 2004, résume les résultats de l'objectif (2) ci-dessus, c.-à-d. les recherches sur les stratégies nationales et internationales (Sutherland et Nichols, 2004).

Le travail a ensuite porté sur l'établissement d'un cadre multidimensionnel. Il a été réalisé de concert avec le Groupe des études environnementales à l'Université de Moncton (UdeM), financé par le Fonds en fiducie pour l'environnement du Nouveau-Brunswick et d'autres sources. Il s'agissait d'effectuer des recherches sur le terrain, notamment tenir des réunions avec les intervenants et les communautés. Pour tirer profit des résultats des recherches de l'Université de Moncton, il a été décidé au cours de l'année 2 d'orienter la recherche sur les stratégies d'adaptation selon deux grands axes :

1. Recourir à une *approche communautaire* (c.-à-d. depuis la base), plutôt qu'à une approche théorique (c.-à-d. que les solutions sont proposées aux communautés, acceptées par celles-ci, puis testées). Les communautés seraient ainsi entièrement propriétaires du processus et de ses résultats éventuels.
2. Établir un *processus de participation des communautés* (d'après une analyse de la littérature et les commentaires des communautés), utilisable par d'autres instances si possible.

Les objectifs 3 et 4 ont été réalisés, mais différemment de ce qui avait été prévu au départ. Plutôt que de communiquer les résultats et les stratégies aux communautés, on a cherché à obtenir de celles-ci des réponses aux questions suivantes :

- comment les gens se sont adaptés par le passé à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête;
- quelle a été leur expérience au cours des épisodes récents;
- quelles menaces perçoivent-ils pour l'avenir;
- quelles mesures a-t-on prises (le cas échéant);
- quelles pratiques exemplaires peut-on déduire des efforts communautaires.

Quatre études de cas, entreprises pour cette recherche, sont décrites ci-dessous. Chacune a testé le cadre du processus d'adaptation conçu pendant les recherches, afin d'illustrer comment ce cadre fonctionne et d'en tirer des leçons. Ainsi, les travaux réalisés pour atteindre les objectifs 3, 4, 5 et 6 ci-dessus se sont chevauchés, à mesure que l'information était obtenue lors de réunions publiques bilingues, de séances dans les communautés et d'entrevues avec les intervenants locaux. Un important atelier régional a eu lieu en octobre 2005 pour consolider certains constats et mieux faire connaître le projet et ses résultats.

4.8.1.2 Présentation de la section

Nous présentons ici les résultats de la recherche sur l'adaptation, en mettant l'accent sur la façon dont la recherche a permis de mieux comprendre, dans la zone à l'étude, les impacts potentiels de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête. De plus, nous basant sur ces résultats et sur les connaissances locales existantes, nous avons commencé à élaborer des mesures d'adaptation appropriées. Bien que ces mesures n'aient pas été mises en œuvre pendant le projet lui-même (bon nombre vont au-delà du mandat du projet, et la plupart auraient requis une aide additionnelle du gouvernement

provincial), la recherche a néanmoins démontré la nécessité d'inclure un large éventail de mesures, allant des grandes décisions politiques aux détails techniques sur le terrain.

La section est donc organisée comme suit :

- résultats de l'analyse de la littérature et recherche internationale sur les stratégies d'adaptation;
- résultats de la recherche sur les stratégies traditionnelles d'adaptation dans la zone à l'étude;
- description du cadre conceptuel pour l'élaboration de stratégies d'adaptation par les communautés;
- exploration du cadre à l'aide de quatre études de cas menées dans la zone à l'étude;
- lignes directrices et pratiques exemplaires pour les stratégies communautaires d'adaptation.

4.8.2 Stratégies d'adaptation – Analyse de la documentation

4.8.2.1 Qu'entend-on par adaptation?

En réponse aux impacts négatifs du changement climatique et aussi pour tirer profit des possibilités offertes par les impacts positifs, les communautés devront peut-être ajuster leurs activités sociales, économiques, politiques et environnementales. Selon l'objectif de ces activités d'amélioration, cet ajustement est en général appelé « adaptation au changement climatique » ou « atténuation des effets négatifs du changement climatique ». Les mesures d'atténuation visent à limiter les effets globaux du changement climatique, tandis que l'adaptation compose avec les effets inévitables des phénomènes découlant du changement climatique (DEFRA, 2004). À l'échelle internationale, on a encouragé davantage les mesures d'atténuation que les mesures d'adaptation. Toutefois, des stratégies d'adaptation peuvent parfois être combinées aux stratégies d'atténuation pour atteindre les objectifs voulus (Michaelowa, 2001).

4.8.2.2 Quels sont les cadres de réflexion en matière d'adaptation?

Il existe divers documents importants qui traitent de l'adaptation au changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer, et qui établissent des cadres conceptuels pour les stratégies d'adaptation. Parmi ces documents (voir, par exemple, Sutherland and Nichols, 2004) figurent :

- Les *Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptation* du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 1994, qui formulent certaines recommandations, notamment :

    - la protection (c.-à-d. la poursuite de l'aménagement du territoire, comme la construction de digues);
    - les aménagements (p. ex., les ajustements aux activités humaines ou aux infrastructures, comme l'accroissement de la résilience naturelle grâce aux dunes côtières et au rétablissement des marécages);
    - le retrait (p. ex., en évitant les risques, c.-à-d. abandonner les projets de développement dans les zones vulnérables).

- Le *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies* du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) (Feenstra

et al., 1998), élaboré pour aider les pays à organiser les études nationales sur les impacts et l'adaptation et à prendre des décisions au sujet de la portée et des méthodes de ces évaluations.

Pour déterminer les stratégies appropriées d'adaptation aux impacts potentiels (autant positifs que négatifs) du changement climatique, il est nécessaire d'évaluer la vulnérabilité des communautés au changement, leur résilience et leur capacité d'adaptation. Pour ce faire, on effectue des évaluations biophysiques de l'étendue menacée (figure 1). Il faut évidemment aussi évaluer la nature des menaces potentielles (CPACC, 1999; Mendis, Mills et Yantz, 2003).

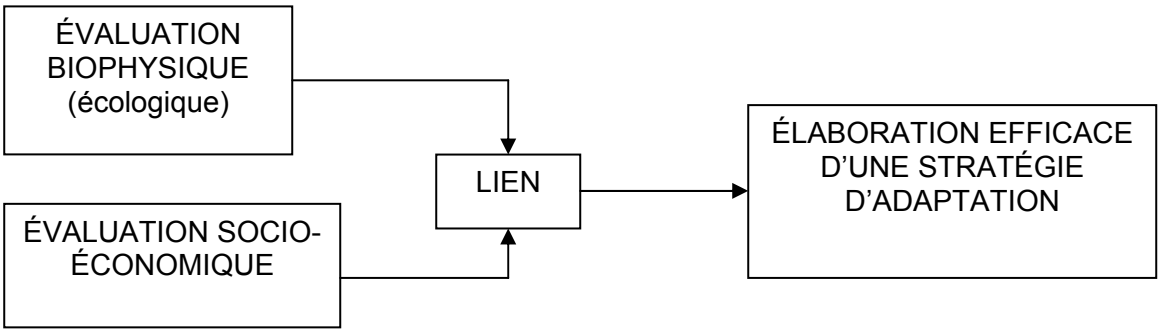


Figure 1. Élaboration efficace des stratégies d'adaptation. *(*Tiré de Mendis, Mills et Yantz, 2003)

En règle générale, les stratégies d'adaptation se divisent en trois grandes familles : information, options techniques, politiques. Les options d'information comprennent diverses activités, comme l'acquisition de connaissances sur le taux d'élévation du niveau de la mer, les ressources humaines disponibles et les contre-mesures planifiées. Les options techniques comprennent la construction de digues et autres ouvrages, le renforcement et l'amélioration des infrastructures. Les options politiques comprennent notamment l'aménagement du territoire, les réformes de la législation, la préservation de l'environnement, la gestion des côtes et les politiques favorisant le développement durable (Sutherland et Nichols, 2004).

4.8.2.3 Que pouvons-nous apprendre des autres provinces, des autres programmes et des autres pays?

Selon Mendis, Mills et Yantz (2003) :

> *Le modèle standard utilisé pour prévoir le changement climatique est le modèle de circulation générale* (*MCG) basé sur des scénarios. On doit garder à l'esprit que, même si le changement climatique est un phénomène planétaire, chaque communauté subit localement les effets des régimes météorologiques.*

Par conséquent, les stratégies d'adaptation utilisées dans différentes entités géographiques (ou conçues pour elles) sont uniques, en raison de la nature particulière de l'ensemble des problèmes environnementaux et socioéconomiques propres à chaque endroit menacé. On peut recourir à des formules pour les évaluer, mais l'ensemble approprié de stratégies employées est souvent propre à la région géographique menacée. Souvent, d'ailleurs, les stratégies dépendront de plusieurs paramètres. On

peut mentionner entre autres (Mendis, Mills et Yantz, 2003; Saleemul, Reid et Murray, 2003; CCNUCC, 2003; Gouvernement de l'Australie, 2004;) :

- information disponible sur la nature des menaces climatiques;
- ressources et soutien pouvant être offerts par différents ordres de gouvernement;
- ampleur de la coopération, de la collaboration, etc. entre tous les intervenants;
- degré de dépendance de la communauté à l'égard des ressources locales;
- population et importance socioéconomique de la communauté;
- vulnérabilité de la communauté;
- résilience de la communauté;
- capacité d'adaptation de la communauté.

Le PNUD a également formulé certaines suggestions au sujet des préparatifs requis, face aux impacts négatifs du changement climatique. Ce sont entre autres (PNUD, 2003) :

- ratification de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (visant à faciliter l'adaptation aux conséquences négatives du changement climatique);
- surveillance, relevés et collecte de données sur le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer;
- élaboration de politiques d'atténuation;
- cartographie des zones vulnérables;
- évaluations socioéconomiques;
- éducation du public sur les problèmes;
- échange d'information entre instances similaires;
- réduction des effets du changement climatique grâce à la planification du développement;
- amélioration de l'accès aux ressources financières et techniques disponibles pour surveiller le changement climatique;
- augmentation des recherches sur les impacts du climat.

De nouveau, ce sont les vulnérabilités environnementales et socioéconomiques propres à chaque endroit qui façonneront l'ensemble des stratégies appropriées visant à répondre aux impacts potentiels de l'élévation du niveau de la mer. C'est ce que montre le tableau 1, qui présente un échantillon de stratégies adoptées par différents pays face à l'élévation du niveau de la mer, un impact majeur du changement climatique. Toutefois, comme on le constate, on retrouve certains éléments stratégiques communs dans les divers plans nationaux, notamment :

- recours à des ouvrages côtiers et stratégies de stabilisation comme les brise-lames, les remparts de cordon littoral et les épis (structures artificielles faites de béton ou d'empierrement, et conçues pour empêcher le lessivage des plages);
- politiques de gestion des côtes et stratégies d'aménagement du territoire (p. ex., zonage, marges de recul et réserves), afin de gérer les activités humaines dans les zones côtières et protéger ces dernières.

Tableau 1. Échantillon international de stratégies d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer et à l'inondation des zones côtières

Région/pays : Risques/impacts	*Stratégie/réponse*	*Processus*

Canada :
• *Élévation du niveau de la mer et inondation des zones côtières dues à :*
  • *la réduction des glaces de mer*
  • *l'augmentation de l'énergie des vagues*
  • *l'érosion du littoral*
	(*Stratégies suggérées)*
	• *Protection*
	  o *Options de protection coûteuses*
	  o *Options de protection souples* (*recommandées)*
	• *Aménagement*
	  o *Modification des structures pour réduire les impacts*
	  o *Zonage visant à encourager l'utilisation du territoire avec peu d'immobilisations sur des terres vulnérables*
	  o *Accroissement de la résilience naturelle* (*p. ex., restauration des dunes côtières; renouvellement des milieux humides, etc.)*
	  o *Méthodes de protection souples*
	• *Recul*
	  • *Évitement des risques, p. ex., empêcher le développement inapproprié des terres vulnérables*
	(*Environnement Canada, 2002)*
		• *Descendant, d'après l'étude de la modélisation de l'élévation du niveau de la mer à l'Île-du-Prince-Édouard*
		• *Il a été suggéré que les problèmes d'adaptation soient réglés localement et de préférence avec « l'acceptation des intervenants locaux ».*

Grande-Bretagne : • *Élévation du niveau de la mer et inondation des zones côtières*	(*Stratégies suggérées)* *Action et reformulation de diverses politiques :* • *Transport* (*zones côtières)* • *Santé* (*communautés côtières)* • *Secteur financier* • *Planification du territoire* (*zones côtières)* • *Défense côtière* • *Agriculture dans les zones côtières* (*Office of the Deputy Prime Minister, 2004)*	• *« Avis » descendant.* • *Basé sur les prévisions d'élévation du niveau de la mer.* • *On invite les planificateurs locaux, les promoteurs et les grandes communautés à élaborer des partenariats.*

Région/pays : Risques/impacts	*Stratégie/réponse*	*Processus*
Gambie : • *Élévation du niveau de la mer et inondation des zones côtières* • *Recul du littoral* • *Érosion des côtes*	(*Stratégies suggérées)* • *Gestion novatrice des sables* • *Construction et réhabilitation des épis* (*stabilisation du littoral)* • *Construction de revêtements afin de protéger des secteurs importants* • *Construction de remparts de cordon littoral et de murs de protection* • *Éducation et sensibilisation du public* • *Réglementation de la construction et planification de la croissance urbaine* • *Préservation des milieux humides et mesures d'atténuation* • *Élaboration d'un plan de gestion des zones côtières* (*Jallow, Barrow et Leatherman, 1996)*	• *Descendant.* • *Basé sur une étude de modélisation de l'élévation du niveau de la mer.*
Australie occidentale : • *Élévation du niveau de la mer et inondation des zones côtières*	(*Stratégies suggérées)* • *Politique côtière* (*politique de planification côtière de l'État)* • *Mesures de politiques générales* (*p. ex., forme et conception des développements, droits et accès du public, etc.)* • *Utilisations durables de la côte* • *Protection des entités importantes* • *Participation des communautés* • *Utilisation ciblée du territoire* • *Accès public et réserves* • *Ouvrages et processus côtiers* • *Stratégies côtières et plans de gestion des estrans* • *Plans côtiers* • *Zones de recul* • *Réserves pour les estrans* • *Zone de recul pour les processus physiques* (*Panizza, 2002)*	• *Descendant.* • *La politique de planification côtière de l'État, mise en œuvre par la Western Australian Planning Commission, s'appuie sur « l'approfondissement des connaissances sur les menaces que présente l'élévation du niveau de la mer ».*

Région/pays : Risques/impacts	*Stratégie/réponse*	*Processus*
Israël : • *Élévation du niveau de la mer et inondation des zones côtières*	(*Stratégies suggérées)* • *Surélévation des structures portuaires* (*mouillages, quais) et des ouvrages au large des côtes, afin de les protéger contre les risques de franchissement et l'accroissement des hauteurs de vague maximales. Des mesures ont déjà été prises dans les ports d'Haïfa et d'Ashdod, où on a surélevé les mouillages.* • *Protection des zones côtières basses et des falaises de plage par des brise-lames et autres ouvrages* (*environ 50 km de plages sensibles).* • *Renforcement et réparation des brise-lames en place.* • *Surélévation des stations électriques.* • *Transport de sable vers le nord* (*« engraissement artificiel ») pour reconstituer les sables du nord de la côte d'Israël, afin de réduire le risque d'erosion des côtes* (*environ 100 km de plages sensibles).* • *Conception de futures îles au large des côtes, en les surélevant et en utilisant un plus grand volume de matériaux de remblayage.* (*Pe'er et Safriel, 2000)*	• *Descendant.* • *Basé sur une analyse de la documentation et sur des entrevues avec des scientifiques et des décideurs d'Israël.*

Région/pays : Risques/impacts	*Stratégie/réponse*	*Processus*
Philippines : • *Élévation du niveau de la mer et inondation des zones côtières*	(*Stratégies suggérées)* • *Combler les lacunes des politiques.* • *Plan de gestion intégrée des zones côtières afin d'empêcher les initiatives destructives.* • *Zones de recul obligatoires* (*traiter les zones de servitudes publiques et les zones de recul comme des terrains séparés lors des arpentages).* • *Utilisation des terres basses pour des usages de moindre valeur* (*p. ex., parcs au lieu de zones habitées, etc.).* • *Stricte conformité aux normes d'habitation.* • *Institutionnalisation du développement des mangroves* • *Stricte application des lois visant les côtes* (*Perez, 2000)*	• *Descendant.* • *Basé sur une étude gouvernementale des risques pour les côtes associés à l'élévation du niveau de la mer.*

Il convient de souligner ici que les stratégies présentées au tableau 1 ne sont en fait que des suggestions, basées en partie sur des modèles et des prévisions d'élévation du niveau de la mer, parce que ces instances (comme la plupart des autres ailleurs dans le monde) n'ont pas encore connu d'augmentation catastrophique du niveau de la mer.

Toutefois, certains pays ont connu des événements catastrophiques temporaires d'élévation du niveau de la mer, liés à des conditions météorologiques comme des ouragans et des tempêtes. À quelques endroits, on a pu tester les stratégies d'adaptation/atténuation. Par exemple, Sutherland et Nichols (2004) indiquent que des bâtiments construits au bord de la mer en Floride, en infraction avec la politique *Coastal Construction Control Line*, ont été beaucoup plus endommagés que les bâtiments conformes à la réglementation sur l'aménagement du territoire. De même, au Bangladesh, les pertes de vie dues à des inondations côtières causées par les cyclones ont grandement diminué après la construction de digues côtières, la mise en place de programmes de sensibilisation du public et la participation des communautés et des organisations non gouvernementales (ONG) aux plans d'intervention, d'adaptation et d'atténuation en cas de catastrophe. Les événements de 2005 à la Nouvelle-Orléans ont fait la preuve de la nécessité de se préparer davantage à de telles situations, au niveau tant national que communautaire.

Les processus d'élaboration des stratégies d'adaptation présentés au tableau 1 semblent *ponctuels*, car ces stratégies ne semblent pas avoir été élaborées selon une formule ou un processus donné. De plus, elles semblent toutes avoir été élaborées en mode « descendant », c.-à-d. par des organismes gouvernementaux. Rien n'indique que les communautés locales, dans ces pays, aient été consultées pour l'élaboration de

stratégies, bien que, dans certaines instances, on suggère de créer des partenariats avec les communautés dans le cadre des stratégies d'adaptation.

4.8.3 Approche communautaire

4.8.3.1 Portée et méthode de la recherche auprès des communautés

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, une des principales caractéristiques de cette recherche est la volonté de nous écarter de l'approche « descendante » : dans cette approche, les chercheurs conçoivent des modèles, puis communiquent ensuite avec les communautés locales pour tester les résultats de leurs travaux. Un aspect unique de cette recherche est plutôt son caractère « ascendant » : les chercheurs ont voulu connaître les valeurs et les perceptions des communautés afin d'évaluer le besoin d'adaptation et les pratiques exemplaires possibles. Cette recherche s'est appuyée sur le lien de confiance établi de longue date entre les chercheurs de l'Université de Moncton et les communautés locales des zones à l'étude.

Comme nous l'avons indiqué à la section 4.8.2 ci-dessus, les stratégies d'adaptation doivent être axées sur les communautés (selon les situations propres à chaque région) pour les raisons suivantes :

- les impacts du changement climatique varient énormément d'un endroit à l'autre;
- l'éventail des stratégies d'adaptation possibles et leur mise en œuvre sont freinées ou accrues par les ressources et la capacité des communautés, et par conséquent colorées par les valeurs des particuliers ou des groupes en cause[34];
- sans acceptation par la communauté, les approches descendantes échouent souvent (voir par exemple l'étude de cas à la section 4.8.4.6.2)[35].

C'est pourquoi, dans toute cette recherche, les connaissances et la sensibilisation des communautés sont devenues le thème central. Les résidents locaux et les autres personnes potentiellement touchées ont pu ainsi discuter avec les chercheurs et les responsables chez eux et à leur propre rythme. Parallèlement, une approche plus conceptuelle a été élaborée, afin de pouvoir reproduire ce type d'approche dans d'autres régions ou pour d'autres problèmes associés au changement climatique. L'approche était donc plus importante que la formulation de mesures d'adaptation spécifiques.

4.8.3.2 Ateliers avec les communautés : partage des expériences et des connaissances

Comme la section 4.7.2 l'indique, l'aspect « engagement des communautés » du projet visait à mobiliser celles-ci afin d'accroître leur capacité d'adaptation. À cette fin, les chercheurs ont recueilli de l'information sur les initiatives et les besoins locaux en matière d'adaptation, ainsi que sur les difficultés ou les obstacles rencontrés. Ensuite, il a fallu présenter aux communautés des connaissances scientifiques sur les impacts du

---

[34] Par exemple, dans la région de Bouctouche, on constate l'erosion des côtes de certains cimetières, ce qui pourrait nécessiter une intervention locale plus immédiate, tandis que des problèmes plus vastes, comme les routes ou les ponts menacés, pourraient nécessiter l'intervention du gouvernement provincial.

[35] On peut formuler des observations similaires pour expliquer d'une part le succès des mesures d'intervention lors du tremblement de terre en Californie en 1906, où la communauté locale a été largement responsable des services d'urgence jusqu'à ce que l'aide nationale arrive, et d'autre part la catastrophe de la Nouvelle-Orléans en 2005, où l'intervention nationale a souvent entravé les efforts de la communauté.

changement climatique, des prévisions de l'élévation du niveau de la mer pour le prochain siècle et d'autres données pertinentes, afin que toute mesure d'adaptation soit basée sur la meilleure information disponible.

L'information sur le degré d'adaptation des communautés a été recueillie essentiellement par des entrevues et par des discussions avec des groupes témoins dans différentes communautés entre 2003 et 2005. En tout, 27 entrevues ont été réalisées en 2003-2004 avec des particuliers représentant différents groupes socioéconomiques qui vivent près de la côte. Elles ont porté sur leurs perceptions des impacts du changement climatique. Les résultats des entrevues ont été validés dans le cadre de trois discussions avec des groupes témoins, composés de 9 à 13 personnes provenant de trois communautés côtières différentes.

En 2004, 12 entrevues ont été réalisées avec des particuliers qui ont vu le changement climatique et l'élévation du niveau de la mer avoir un impact sur leur propriété, ou qui sont susceptibles de subir de tels impacts dans l'avenir. Les questions concernaient surtout :

- les raisons de l'adaptation;
- les méthodes passées et présentes d'adaptation et leur efficacité;
- les sources d'information pour la prise de décisions.

Les participants ont également visité avec les chercheurs les endroits touchés pour discuter des impacts et des méthodes d'adaptation. Au cours de cette période, sept séances d'information publique ont eu lieu dans différentes communautés, afin de faire connaître une partie des résultats de la recherche et d'établir des liens avec les communautés. En outre, un atelier de deux jours sur le même sujet a été organisé à l'automne 2004 en coopération avec la Coalition pour la viabilité du sud du Golfe Saint-Laurent, et avec le nœud « Science et connaissances locales » du Réseau de recherches sur la gestion des océans. (Les références pour le rapport final de l'atelier et pour le *Coastal Research Bulletin*, numéro de novembre 2004, se trouvent sur le site http://www.sfu.ca/coastalstudies/publications.htm).

À l'automne 2005, une série de séances d'information sur les impacts du changement climatique et l'adaptation a eu lieu dans cinq communautés du sud-est du Nouveau-Brunswick. Des questionnaires sur les besoins d'adaptation ont alors été distribués à quelques participants. De plus, des discussions avec des groupes témoins ont eu lieu à Pointe-du-Chêne, Rexton et Elsipogtog. Ces réunions visaient à raffiner la validation des résultats et à obtenir des renseignements plus détaillés propres à chaque communauté.

Pour toutes les présentations et les groupes témoins, nous nous sommes efforcés d'inviter différents représentants de la communauté, notamment des conseillers, des maires, des planificateurs, des représentants des districts de services locaux, des groupes de protection de bassins hydrologiques, et d'autres organismes intéressés. De l'information a été présentée à ces réunions, et il y a eu une période de questions et de discussions sur les préoccupations et les problèmes locaux.

L'information ayant été recueillie dans les collectivités sur une période relativement longue, on a pu mieux comprendre les changements survenus dans les perceptions

locales. Les chercheurs ont observé, entre 2003 et 2005, un certain changement dans l'attitude des gens, se manifestant surtout par un sentiment accru d'urgence et le désir d'agir afin de s'adapter. Les résultats des questionnaires et des entrevues indiquent également que les communautés estiment avoir un besoin urgent de plus de soutien, en termes d'information, d'avis et de ressources, pour les aider dans leurs efforts d'adaptation. De nombreuses communautés ont indiqué que les séances d'information avaient été importantes et ont souligné le besoin d'en tenir d'autres plus tard. Dans au moins un cas, les visites sur place ont donné naissance à des actions communautaires (voir le cas de Pointe-du-Chêne, à la section 4.8.4.6.4).

4.8.3.3 Stratégies traditionnelles dans le sud-est du Nouveau-Brunswick

4.8.3.3.1 Impacts

Toutes les personnes interrogées étaient bien conscientes du changement climatique et de la vulnérabilité des zones côtières. Dans la plupart des cas, elles avaient été témoins de divers impacts : inondations attribuables à des ondes de tempête, augmentation de l'erosion des côtes, vents violents associés aux tempêtes. D'autres étaient préoccupées par la disparition du sable sur les plages et les dunes. Pour la plupart des participants, ces impacts n'étaient pas nouveaux, car ils les constatent depuis au moins 10 à 20 ans, mais certains estiment qu'ils ont été plus prononcés dans les cinq dernières années. Beaucoup de gens croient également que les impacts constatés ces dernières années sont inévitables et que nous en verrons davantage à l'avenir, ce qui inquiète grandement quelques personnes.

À certains endroits, comme Barachois, Pointe-du-Chêne et le village de Rexton, les impacts ont eu des conséquences économiques importantes et soulevé des préoccupations pour la santé et la sécurité. Certaines parties de ces communautés sont situées sur des basses terres, et très vulnérables aux inondations quand il y a des ondes de tempête. Pointe-du-Chêne est particulièrement vulnérable, car la route d'accès est inondée presque chaque année lors des marées hautes extrêmes. Avec des ondes de tempête comme celle de janvier 2000, une partie des villes et des maisons du village est inondée, et le pont de la route principale est bloqué. Le village devient alors presque une île, et les services d'urgence sont difficiles d'accès. À au moins une occasion à Pointe-du-Chêne et à Rexton, on a dû évacuer des résidents de leurs maisons en utilisant de l'équipement lourd, car les voies d'accès étaient sous l'eau. À Richibouctou, l'inondation attribuable à la tempête de 2000 avait isolé au moins une usine de transformation du poisson, ce qui avait bloqué des expéditions valant 0,5 million de dollars. Le propriétaire n'a pu régler ce problème qu'après maints efforts.

4.8.3.3.2 Adaptation

L'adaptation dans les zones côtières n'est pas un phénomène nouveau, car l'érosion et les tempêtes sont courantes le long des côtes. Certaines des personnes interrogées ont recours à des ouvrages de protection depuis les années 1960. Toutefois, la plupart des participants ont estimé que le rythme du changement s'accélérait, ce qui représente des besoins additionnels en termes d'adaptation.

Les enquêtes et les entrevues avec les communautés indiquent que de nombreux travaux d'adaptation ont été entrepris par des propriétaires ou, dans quelques rares cas, par des groupes locaux qui désiraient prendre des mesures concertées. La plupart des efforts répertoriés concernent des ouvrages de protection du littoral, utilisant de la pierre

armée, des murs de ciment ou de bois, des gabions ou d'autres structures bâties sur l'arrière-plage. D'autres, moins nombreux, ont préféré recourir à l'accommodement, notamment en rehaussant le terrain par du remblayage, ou en surélevant leurs maisons ou leurs chalets. Certains ont pris ou se proposent de prendre des mesures afin de réduire les situations qui fragilisent les plages, comme limiter la circulation des véhicules tout-terrains (VTT) pour ne pas écraser l'herbe qui, jusqu'à un certain point, ralentit l'érosion du littoral. Ces différents types d'ouvrages d'adaptation ont été construits essentiellement pour protéger des propriétés, des chalets ou des maisons, des routes ou d'autres infrastructures, mais de nombreux intervenants sont préoccupés par la perte ou le changement des écosystèmes naturels, et par les pertes subséquentes pour l'économie locale si le tourisme est touché. Les participants admettent avoir peu à dire ou avoir peu de connaissances sur l'efficacité des différentes méthodes de protection, mais bon nombre indiquent que, **quelle que soit la méthode utilisée, ses effets sont limités dans le temps et il faut à terme reconstruire les ouvrages.**

Fait intéressant, environ la moitié des répondants étaient préoccupés par les **impacts négatifs des ouvrages de protection construits,** surtout en raison de la perte de sable sur les plages, de la perte d'habitats et des effets sur la faune. La plupart des intervenants estiment que le travail doit être fait pour protéger les propriétés et les infrastructures, même si cela nécessite des ressources importantes. Les investissements requis, associés à l'augmentation spectaculaire de la valeur des propriétés côtières au cours des dernières décennies, préoccupent de nombreux résidents, qui estiment que de plus en plus de gens de l'endroit, notamment parmi les moins fortunés, sont évincés des propriétés donnant sur la mer. C'est un point important, car bon nombre d'intervenants ont souligné l'importance de la côte pour diverses raisons : historiques, esthétiques, familiales et culturelles. Dans certaines régions du sud-est du Nouveau-Brunswick, les propriétaires de chalets sont déjà, pour la plupart, des personnes qui proviennent de l'extérieur des communautés côtières avoisinantes, ce qui soulève des préoccupations, notamment au sujet de l'accès à la plage.

Il semble y avoir, dans les communautés où des entrevues ont été réalisées, une minorité de personnes qui considèrent le ***retrait comme une option***, bien que certaines admettent que les mesures de protection n'ont qu'un effet très limité à long terme et exigent des ressources énormes. La plupart des répondants sont en fait très attachés aux zones côtières, pour des raisons économiques et autres, et ne considèrent pas le retrait comme une option envisageable. Certaines personnes admettent que vivre dans cette région les expose à certains risques mais, en même temps, elles se déclarent prêtes à les accepter, parce qu'elles aiment beaucoup leur région. On constate toutefois un sentiment d'urgence : il faut agir et prendre des mesures d'adaptation, les répondants disant craindre les impacts futurs sur la côte.

Les enquêtes révèlent également que les mesures de protection ont été en grande partie prises sur une base individuelle, par des propriétaires confrontés aux impacts. Il y a eu peu de projets communautaires ou collectifs, bien que la moitié des participants aient souligné la nécessité de prendre des mesures plus collectives et plus concertées.

Certaines communautés ont eu recours à la restauration du littoral comme méthode d'adaptation. Au Nouveau-Brunswick, il y a eu plus de 15 projets de réhabilitation des dunes, consistant à réalimenter les plages et à planter des herbes sur les dunes, sur

toute la côte est (Dominique Bérubé, comm. pers., 2005). Ces projets (installation de clôtures à sable et plantation d'herbes sur les dunes) ont été dirigés par des particuliers, des groupes locaux ou des coalitions, mais la plupart ont été abandonnés lorsque des tempêtes majeures y ont causé des dégâts importants. Quelques projets sont encore actifs, et la plupart des intervenants reconnaissent que les projets ont été d'importants outils d'éducation et de sensibilisation, et qu'ils ont aidé les communautés à prendre conscience de la gravité du recul et de l'érosion des côtes dans certains secteurs.

Les municipalités et d'autres ordres de gouvernement ont été également actifs en termes de mesures d'adaptation dans les communautés côtières ou à proximité. Par exemple, la ville de Rexton, dans le sud-est du Nouveau-Brunswick, protège activement certaines zones d'importance historique et culturelle de son littoral, depuis quelques décennies au moins. Les premières tentatives de protection consistaient à utiliser des gabions, et plus récemment du grès dans les régions où ces méthodes offrent une protection suffisante ou de la pierre armée dans les zones plus touchées. Le gouvernement provincial, par l'intermédiaire du ministère des Transports, a également participé à la construction d'ouvrages de protection le long de la côte pour protéger les routes et les ponts. En certains endroits, comme à Cap-Lumière, on a déjà abandonné d'anciennes routes en faveur de nouvelles, situées plus loin à l'intérieur des terres. Le gouvernement fédéral participe également aux travaux de réparation et de modification des quais après des tempêtes majeures, sur toutes les côtes de l'Atlantique, par l'intermédiaire du Programme des ports pour petits bateaux. Les parcs fédéraux, comme celui de Kouchibouguac, ont également participé à de nombreux projets de réparation et de modification des passerelles et des routes, après les ondes de tempête qui ont frappé le parc depuis sa création en 1970. Les responsables du parc estiment que les changements des dernières années ont cependant été plus spectaculaires.

4.8.3.4 Résultats de la participation des communautés

Les entrevues, les questionnaires et les discussions avec des groupes témoins ont permis de constater qu'il y a de nombreux obstacles à l'adaptation, selon les résidents.

De nombreux auteurs estiment qu'il y a suffisamment d'information disponible sur les mesures d'adaptation pour que l'on commence à agir mais, selon certains, d'importants travaux de recherche et d'évaluation sont requis pour soutenir les décisions en matière d'adaptation (Adger *et al*., 2005; Baethgen *et al*., 2005). Nos propres recherches corroborent cette opinion.

Les résultats des entrevues montrent que la majorité des personnes ont utilisé la technique d'essais et erreurs ou une approche d'imitation dans leurs techniques de protection, en raison d'un **manque d'information ou de connaissances sur les techniques les plus efficaces ou les plus appropriées**. Beaucoup de gens ont également souligné l'absence de sensibilisation dans les communautés quant à la gravité des impacts du changement climatique et à la nécessité de prendre des mesures d'adaptation proactives. Les répondants de toutes les régions ont discuté de la nécessité de tenir davantage de sessions publiques et de discussions en groupe sur ce sujet avec les parties intéressées. Un entrepreneur interrogé dans la zone étudiée a indiqué qu'il n'aurait pas construit son usine près du littoral s'il avait été conscient de la vulnérabilité de la zone côtière aux impacts du changement climatique. Certaines personnes estiment par ailleurs que, même si elles connaissent les risques, elles sont néanmoins disposées

à construire près de la côte, car elles veulent prendre leur retraite dans une région qu'elles apprécient énormément.

L'évitement est une approche d'adaptation, mais on semble manquer d'outils à cette fin. Bien que le Nouveau-Brunswick dispose d'une Politique de protection des zones côtières depuis 1996 (voir, par exemple, Direction de la planification durable, 2002), celle-ci n'a aucun pouvoir exécutoire, et on continue de construire dans des zones sensibles à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête. De nombreux intervenants interrogés, y compris des planificateurs, ont indiqué que le retard dans l'application de la politique a créé une ruée de construction près du littoral dans les zones côtières, les propriétaires voulant bâtir avant que la réglementation ne les en empêche.

Des particuliers, des représentants municipaux et des groupes environnementalistes se sont plaints du **manque d'outils pour gérer le développement** dans les zones côtières, afin d'empêcher la construction dans les zones à risque élevé et de protéger certaines caractéristiques naturelles de la côte. En outre, là où il y a une certaine réglementation, notamment pour mieux protéger les milieux humides ou les cours d'eau, les participants estiment que les fonctionnaires manquent de ressources pour appliquer la loi, et qu'ils ne l'appliquent pas de façon uniforme.

Dans les autres provinces, il n'y a pas encore de politiques côtières, et certains secteurs sont confrontés à d'importantes pressions dues au développement. Des études réalisées à l'Île-du-Prince-Édouard, au Nouveau-Brunswick et à Terre-Neuve ont souligné la nécessité de mieux planifier le développement dans les zones rurales et urbaines, afin de tenir compte de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête (Paone *et al*. 2003). Les connaissances locales recueillies lors de certaines entrevues montrent que, dans certaines communautés côtières, il y a 50 ans ou plus, personne ne construisait près du littoral; on préférait demeurer jusqu'à près d'un kilomètre à l'intérieur des terres. Aujourd'hui, cette attitude de précaution est abandonnée, en raison d'une demande sans précédent de propriétés très proches du littoral. Selon la majorité des participants, cette nouvelle demande vient renforcer la nécessité d'instaurer un mécanisme de planification permettant de limiter la construction dans certaines zones très vulnérables, afin de protéger les personnes autant que les écosystèmes.

Nombre des discussions tenues avec des groupes au Nouveau-Brunswick ont porté sur l'**absence de gouvernance, particulièrement dans les régions rurales**. Les zones rurales de cette province se sont regroupées en districts de services locaux (DSL) et un comité local de représentants non élus formule des recommandations au gouvernement provincial quant à leurs besoins. Bon nombre de personnes interrogées estiment que ce mécanisme de gouvernance rurale offre très peu de pouvoir aux communautés, et que leurs demandes en matière d'adaptation dans leur région sont tout simplement perdues parmi les nombreuses demandes présentées par les autres Districts de services locaux à la province.

Dans au moins un cas, l'absence de gouvernance locale a donné lieu à une mobilisation locale pour prendre en charge les problèmes associés aux impacts du changement climatique. Les résidents de la communauté de Pointe-du-Chêne, après les épisodes d'ondes de tempête des dernières années et après avoir tenu quelques réunions avec des chercheurs dans le cadre du présent projet, se sont regroupés pour agir. Un comité

spécial a organisé dans la communauté un abri d'urgence en cas d'inondation, et il discute présentement avec d'autres ordres de gouvernement de l'aide requise pour gérer les problèmes de santé et de sécurité liés à l'inondation de la route d'accès au village pendant les ondes de tempête. Les résidents s'estiment particulièrement vulnérables parce que la population vieillit. Des discussions se poursuivent également pour trouver d'autres solutions à l'inondation de certaines parties de la communauté.

La **complexité du processus réglementaire** (grand nombre d'approbations de permis et de ministères en cause) a également été soulevée comme problème touchant les efforts d'adaptation dans les zones côtières. De nombreux participants ont souligné la nécessité de simplifier et de centraliser au niveau local le processus d'approbation de permis pour les mesures de protection et autres d'adaptation.

Enfin, le **manque de ressources** est également un obstacle majeur auquel sont confrontés les particuliers et les communautés qui veulent adopter des mesures d'adaptation. Par exemple, les ouvrages de protection sont très coûteux et ce ne sont pas toutes les communautés qui ont les moyens d'en construire. On a mentionné dans certains cas des conflits entre les résidents, en raison de l'incapacité de certains de contribuer aux structures jugées nécessaires par d'autres, celles-ci étant plus efficaces si elles sont continues le long d'une section donnée du littoral. Par ailleurs, certaines organisations privées, comme l'Éco-centre Irving (un parc naturel de la côte est du Nouveau-Brunswick, qui appartient à des intérêts privés), ont pu investir des sommes considérables pour reconstruire, surélever et déplacer des sections de passerelles, endommagées par les ondes de tempête provoquées qui ont accompagné au moins trois tempêtes majeures depuis 1997. Il est très rare que des particuliers et des municipalités disposent de telles ressources.

4.8.3.5 Résumé des résultats du processus de participation communautaire

Les communautés et les propriétaires particuliers se sont par le passé adaptés aux changements survenus sur la côte, mais on estime que ceux-ci ont plus d'impact depuis quelques années. Même si diverses stratégies ont été élaborées, la plupart ont été appliquées de façon ponctuelle, sans qu'on sache vraiment si elles seraient efficaces. De plus, on a reconnu que les mesures d'intervention touchant l'environnement et les propriétés avoisinantes peuvent avoir certains impacts négatifs.

Parmi les principales préoccupations des communautés quant à leur capacité de s'adapter figurent :

- l'absence d'information sur les techniques et les pratiques possibles;
- l'absence et l'inégalité des ressources disponibles pour faire face aux problèmes côtiers;
- l'absence de gouvernance locale et d'outils efficaces pour gérer le développement côtier;
- la complexité, l'inégalité d'application et l'inefficacité du processus réglementaire.

4.8.4 Développement d'un cadre décisionnel pour une prise en charge par les communautés envers des stratégies d'adaptation

4.8.4.1 Description du cadre

La partie analytique de la recherche consistait à créer un cadre décisionnel afin d'aider les divers intervenants à s'adapter à l'élévation du niveau de la mer et au changement climatique. Essentiellement, il s'agit de répondre au désir des communautés d'avoir plus d'information au sujet des stratégies; nous n'avons cependant visé aucune mesure spécifique.

Le cadre, qui comporte un processus permettant de choisir des stratégies appropriées d'adaptation pour des endroits donnés, a été élaboré à la suite de discussions avec les communautés, de l'examen des principaux travaux mentionnés, et de l'analyse des expériences personnelles. Il visait les trois objectifs suivants :

1. offrir aux personnes qui élaborent des stratégies d'adaptation un guide qui mette l'accent sur l'importance de la participation de la communauté et sur sa prise en charge;
2. créer une approche transférable, tout en permettant au processus de prendre en compte les contraintes et les possibilités de chaque communauté;
3. offrir aux communautés un outil décisionnel qui puisse aider un groupe diversifié de personnes à comprendre la plage des options d'adaptation disponibles, dans le but de créer, dans un esprit communautaire, des solutions qui *« protègent et accroissent le bien-être* (*de la communauté) »* (PNUD).

Ce cadre d'adaptation comporte deux parties : a) les éléments du cadre et b) ses processus, et peut être utilisé pour examiner le bien-fondé des stratégies d'adaptation précédentes, ou en créer de nouvelles (figure 2). En tant qu'instrument analytique ou outil décisionnel communautaire, il souligne l'importance d'une **approche qui donne les moyens à une communauté de se prendre en charge.**

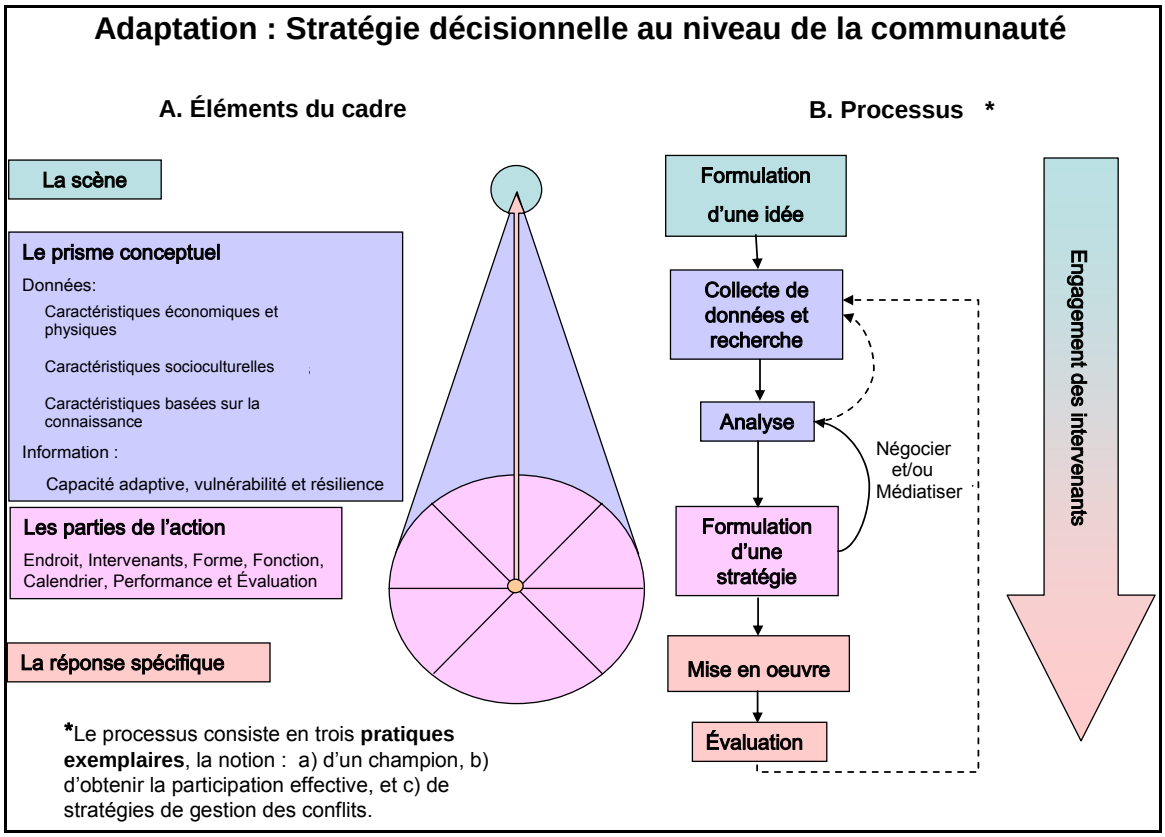


Figure 2. Adaptation: Strategy for Community Decision-Making (d'après McCarthy et al. [2001, Table 18-1]); Mendis et al, [2003, p. 45, Figure 7]; Sutherland et Nichols [2004, p. 4-6]; Sutherland, et al. [2004, p. 2-7]; Scialabba [1998, p. 59, 79], Lim and Spanger-Siegfried, ed. [2005, p. 11]).

4.8.4.2 Éléments du cadre

Les éléments du cadre consistent en quatre parties consécutivement dépendantes :

1. la scène;
2. le prisme conceptuel;
3. les parties de l'action;
4. la réponse spécifique.

1. La scène : Le cadre de décision communautaire commence par la définition de la scène, c.-à-d. ***le lieu où des problèmes clés déclenchent un désir d'adaptation.*** En fait, il s'agit à la fois d'un lieu dans l'espace et d'un moment dans le temps qui définissent de manière unique la situation de la communauté. Pour un endroit donné, divers prismes influent sur les options d'adaptation disponibles.

2. Le prisme conceptuel : Le prisme conceptuel désigne la façon dont une situation est perçue par les participants. Il se compose de données sur les caractéristiques propres à la scène et d'informations obtenues en analysant ces caractéristiques. (Mendis *et al*., 2003, p. 45; Sutherland et Nichols, 2004, p. 4-6; Sutherland *et al*., 2004, p. 2-4).

Les *caractéristiques économiques et physiques de la scène* comprennent :
- l'infrastructure;
- les ressources financières;
- les attributs écologiques;
- la technologie.

Les *caractéristiques socioculturelles* de la scène comprennent :
- le cadre juridique;
- la réglementation et les politiques;
- l'interaction avec les intervenants;
- les valeurs et les priorités des intervenants;
- la dynamique du pouvoir.

Les *caractéristiques basées sur la connaissance* comprennent :
- l'éducation et les perceptions;
- l'information et les compétences;
- l'expertise;
- l'expérience.

On peut bonifier le prisme conceptuel en tenant compte des divers points de vue ou perspectives des participants de la communauté. On en arrive ainsi à une compréhension commune de la situation dans une région donnée, ce qui accroît les ressources dont peut se prévaloir la communauté. Ce renforcement du prisme conceptuel de la communauté accroît les chances qu'il puisse favoriser des mesures d'adaptation appropriées, soutenues et ciblées, pour l'ensemble de la communauté.

3. Les parties de l'action : Le prisme conceptuel fournit une assise pour les diverses parties des mesures d'adaptation (figure 3). Par conséquent, pour créer une stratégie d'adaptation appropriée, il faut tenir compte des points suivants : a) la fonction; b) les intervenants; c) l'endroit; d) la forme; e) le calendrier; f) la performance et l'évaluation de la mesure d'adaptation. Dans chacune de ces catégories, on doit examiner d'autres options d'adaptation (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2001). Par exemple, quand on considère la performance et l'évaluation de la mesure, on doit tenir compte de ses divers coûts, y compris ceux qui sont difficiles à quantifier et à pondérer. Ceux-ci comprennent les coûts fixes et variables (p. ex., équipement et maintenance), ainsi que les coûts directs et indirects (p. ex., coûts pour le propriétaire par rapport aux coûts pour l'environnement). Il peut s'agir également du coût monétaire des matériaux, du prix émotionnel de l'action, du temps alloué ou encore du coût des possibilités perdues.

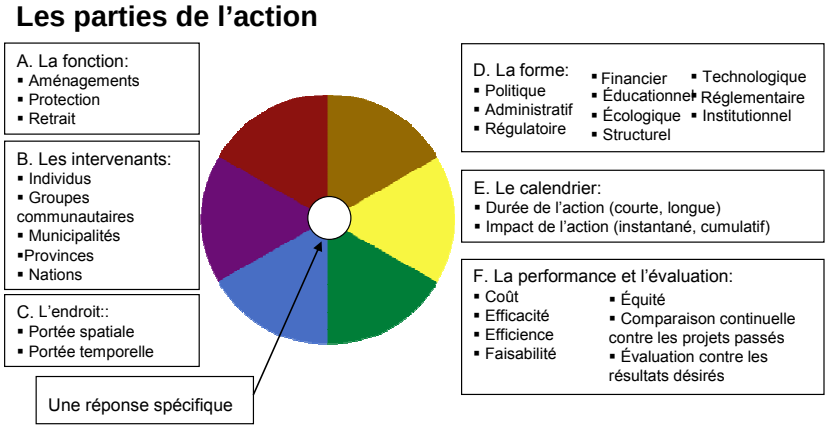


Figure 3. Les parties de l'action (d'après McCarthy et al. [2001, Table 18-1] et Mendis, Mills, et Yantz [2003, p. 45])

4. La réponse spécifique : Les stratégies qui donneront les meilleurs résultats seront de nature multidimensionnelle et comporteront plusieurs éléments. En se basant sur les résultats de l'analyse des trois autres éléments, une communauté peut formuler une réponse spécifique. Toutefois, dans la pratique, ce travail se fait par l'intermédiaire des processus du cadre.

4.8.4.3 Le processus du cadre

La création et la mise en place d'une stratégie d'adaptation comportent a) une méthodologie procédurale et b) une liste supplétive des pratiques exemplaires.

1. Formulation d'une idée : Il s'agit de présenter les problèmes actuels et les situations futures possibles pour déclencher le processus. Du point de vue de la prise en charge par la communauté, la décision de recourir au processus d'adaptation doit être prise par le particulier ou le groupe d'intervenants à qui incombe cette tâche. Cela présuppose donc une certaine organisation initiale et une compréhension commune des menaces (Scialabba, 1998, Part A ; Mills et Yantz, 2003; Conde et Lonsdale, 2005; Mendis)[36].

2. Collecte de données et recherche : Ce processus aide la communauté à communiquer, à examiner la situation actuelle et à formuler ses valeurs et ses objectifs. Dans l'ensemble, la communauté doit être engagée pour déterminer la performance des stratégies passées et pour établir les données de base (trois caractéristiques primaires) de leur prisme conceptuel communautaire. Il est important pour les acteurs non seulement de recueillir des données, mais également de les mettre en commun (d'une manière participative) afin d'établir une vue collective. Les connaissances et la coopération aident à accroître la capacité d'adaptation de la communauté (Scialabba, 1998, Part A ; Mills et Yantz, 2003; Conde et Lonsdale, 2005; Mendis)[37].

---

[36] *Dans la zone étudiée, le projet du FACC décrit ici est devenu le catalyseur de l'organisation dans certaines communautés. Dans d'autres, comme à Pointe-du-Chêne, il existait déjà une organisation à cause des menaces perçues et de l'existence de champions locaux.*

[37] *La nécessité d'établir des vues collectives est bien illustrée par la situation suivante : le propriétaire d'un terrain côtier prend des mesures unilatérales pour protéger une partie de littoral contre l'érosion (p. ex., en utilisant du béton ou des pneus, etc.), ce qui provoque l'érosion des propriétés avoisinantes.*

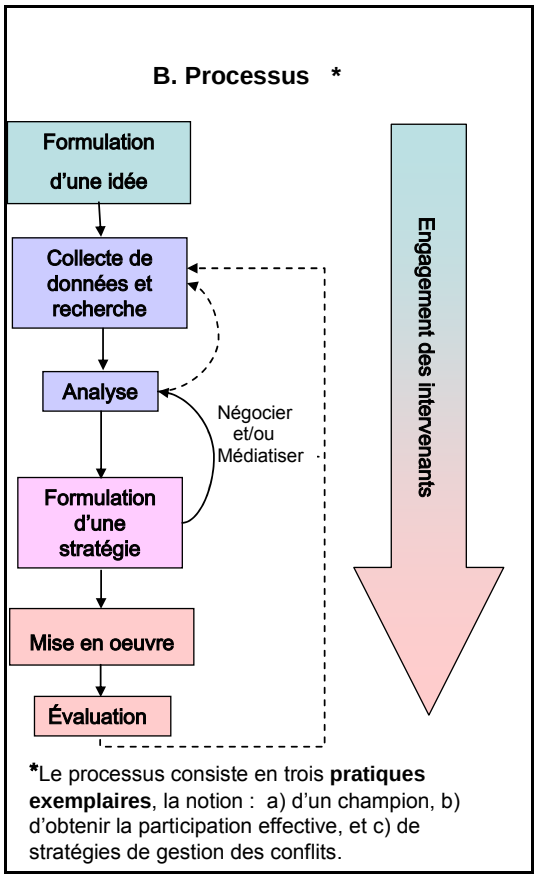


Figure 4. Le processus d'adaptation (d'après Scialabba [1998, p. 59, 79]; Lim and Spanger-Siegfried, ed. [2005, p. 11]).

3. Analyse de la situation et des options : L'étape d'analyse requiert que la communauté détermine le caractère spécifique de son prisme communautaire, à partir des caractéristiques primaires qui auront été définies (Mendis, Mills et Yantz, 2003; Sutherland et Nichols, 2004). De façon idéale, on devrait établir une compréhension commune des besoins de la communauté, grâce à l'intégration de toute l'information recueillie. Les divers souhaits des intervenants peuvent alors être transformés en objectifs initiaux du projet, et on doit déterminer quels sont les outils et les obstacles pour la communauté (Scialabba, 1998, Part A ; Conde et Lonsdale, 2005).

4. Formulation d'une stratégie : Cette étape permet de définir les divers éléments de l'action adaptative spécifique, d'après les connaissances de base acquises sur la scène et le prisme conceptuel de la région. Il est habituellement nécessaire de consulter les intervenants et de négocier avec eux, afin de réanalyser la situation (probablement en obtenant davantage de données) pour définir la réponse spécifique (et les actions nécessaires en ce sens) en vue d'atteindre les objectifs voulus. Le processus de formulation de la stratégie consiste à définir les ressources requises et les moyens de les obtenir. Un facteur important sera alors de déterminer qui paiera pour la mise en œuvre. Il peut se révéler nécessaire de procéder à des négociations ou à une médiation afin d'empêcher et de résoudre les conflits; de plus, il faudra probablement en arriver à des compromis ou recourir à une approche entièrement différente (Scialabba, 1998, Part A

and Part E; Morris, n.d.; Rijsberman, 1999; Mendis, Mills et Yantz, 2003; Conde et Lonsdale, 2005).

5. Mise en œuvre et évaluation : Souvent, les actions des divers intervenants doivent être coordonnées afin d'assurer l'efficacité de la réponse ou de la mesure. Comme il peut s'agir d'un processus complexe, les éléments cruciaux de son succès sont entre autres l'existence d'un champion, d'une stratégie d'adaptation bien définie et d'un plan de mise en œuvre.

La mise en œuvre du plan peut comprendre un calendrier d'évaluation bien défini, mais l'évaluation de la stratégie peut aussi se faire de façon plus informelle. Quoi qu'il en soit, l'évaluation est un aspect important du processus qui pourrait avoir un effet sur d'autres projets d'adaptation, ou sur la poursuite même du projet. Les participants des communautés ont indiqué que la rétroaction est un aspect manquant (mais souhaitable) des actuelles tentatives d'adaptation; cette rétroaction pourrait prendre la forme de rapports officiels ou encore d'un partage plus informel des expériences positives et négatives (Session d'information, 28 septembre 2005; Session d'information, 11 octobre 2005; Session d'information, 12 octobre 2005; UNB et UdeM, 2005).

4.8.4.4 Participation des communautés

Un aspect essentiel du processus d'adaptation est d'obtenir la participation des intervenants. À cette fin, il est important également d'identifier correctement (ou, plus important encore, de ne pas exclure) certains intervenants, et de savoir quel type de participation est recherchée.

La recherche indique qu'il y a deux grands types d'intervenants : a) les communautés et b) les acteurs. Les communautés ayant des intérêts communs ou une même origine géographique seront probablement touchées ou intéressées par le processus d'adaptation. Leurs membres peuvent participer, ou non, activement au processus d'adaptation. À l'opposé, les acteurs contribuent à la création ou à la mise en œuvre d'une mesure d'adaptation spécifique. C'est pourquoi il est très important que les acteurs obtiennent de l'information des autres intervenants et soient disposés à coopérer et à partager leurs idées, car les intervenants ne seront pas les seuls à être touchés par les résultats du processus (Scialabba, 1998, partie A et partie E; Conde et Lonsdale, 2005) (figure 5).

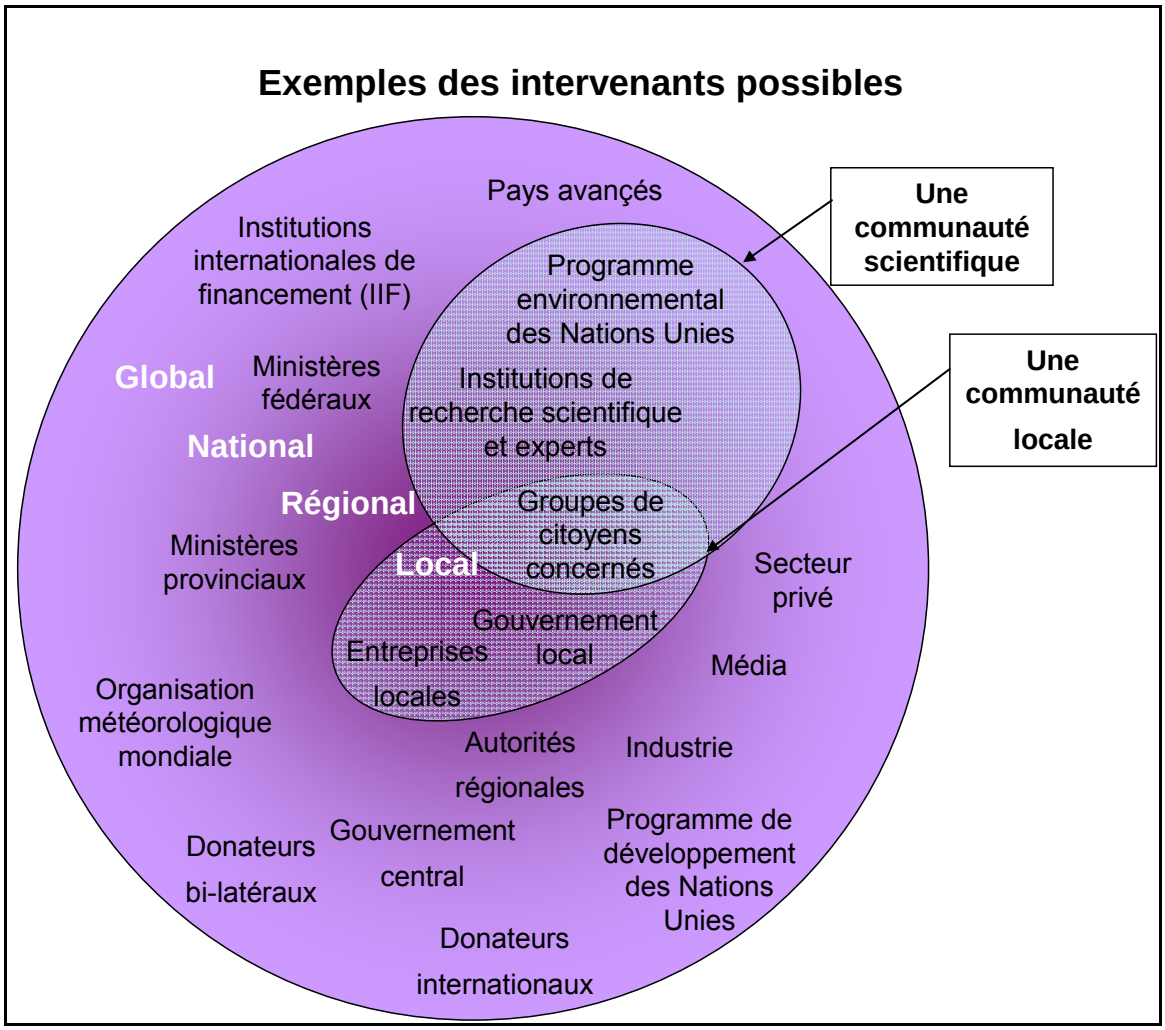


Figure 5. Exemples d'intervenants possibles (d'après Lim and Spanger-Siegfried, ed. [2005, p. 39] et Scialabba [1998, p. 41 Figure A.8]).

La participation d'un groupe diversifié d'intervenants est essentielle afin d'assurer la validité de l'information recueillie et présentée, et d'établir la pertinence des stratégies d'adaptation créées. Il est donc essentiel que l'invitation à participer soit non seulement inclusive, mais que l'on encourage à parler les particuliers et les communautés dont on n'entend pas habituellement les opinions. Il est important également de réaliser qu'il y a divers types de participation qui comportent des niveaux uniques d'activité : on peut, à certaines occasions, être un champion ou un porte-parole et, à d'autres, être un simple participant à une réunion qui veut en savoir davantage (Scialabba, 1998, partie A et partie E; Conde et Lonsdale, 2005). (Voir la figure 6 – Types et niveaux divers de participation).

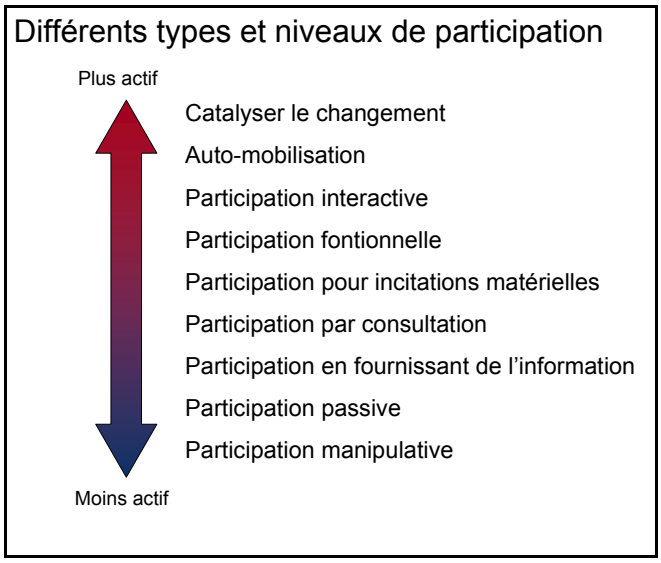


Figure 6. Différents types et niveaux de participation (d'après Conde and Lonsdale [2005, p. 52] and Scialabba [1998, p. 41 Table A.4]).

La participation des intervenants offre des avantages extrêmement précieux pour assurer la pertinence, la qualité et la longévité du projet. Avec un groupe diversifié d'intervenants, les membres de la communauté peuvent apprendre à mieux travailler avec les décideurs, et vice versa. Il est fréquent que les responsables gouvernementaux aient peu de contact avec les membres des communautés. Une communauté organisée autour de thèmes spécifiques, comme le changement climatique, peut contribuer positivement au dialogue politique (Conde et Lonsdale, 2005). Le processus de création communautaire de stratégies d'adaptation donne également aux intervenants un sentiment de propriété à l'égard des résultats finaux du processus, et permet une prise de conscience commune des préoccupations et des contraintes de la communauté. Cette compréhension communautaire des problèmes peut favoriser la coopération et la prise en charge, et ainsi accroître la capacité d'adaptation de la communauté. Le processus participatif facilite également l'obtention de résultats durables et économiques, car les idées d'adaptation peuvent être diffusées et testées auprès des communautés touchées avant leur mise en œuvre (Conde et Lonsdale, 2005).

La participation des intervenants à un projet ne garantit pas nécessairement que celui-ci sera approprié, équitable, durable ou de qualité, mais elle en augmente les chances. Pour assurer le succès d'un projet, il est important également d'utiliser de manière efficiente la notion de champion, d'obtenir la participation effective des communautés et d'adopter des stratégies de gestion des conflits (Morris, n.d.; Scialabba, 1998, partie E; Rijsberman, 1999; Mendis, S., S. Mills et J. Yantz 2003; Lim, B., et E. Spanger-Siegfried, dir. de publ. 2005).

4.8.4.5 Pratiques exemplaires du cadre

La création de mesures d'adaptation par l'intermédiaire d'un processus participatif prend du temps, pose des défis et requiert la consolidation de certaines questions intégrées au cœur même du processus de participation. La nécessité d'identifier un champion, une

participation efficace et la présence de techniques de gestion des conflits pour le processus sont autant de facteurs intrinsèques du succès de la stratégie d'adaptation.

A. Identification d'un champion : Un champion est un intervenant ou un groupe d'intervenants actifs, voué à une cause, et qui instille au processus d'adaptation un **dynamisme.** Ces acteurs jouent en quelque sorte le rôle de figures de proue et orientent les intervenants pendant le processus d'adaptation. Ils contribuent à assurer la continuité du processus et coordonnent les divers aspects de la procédure complexe. La figure 7 illustre la complexité de la coordination requise.

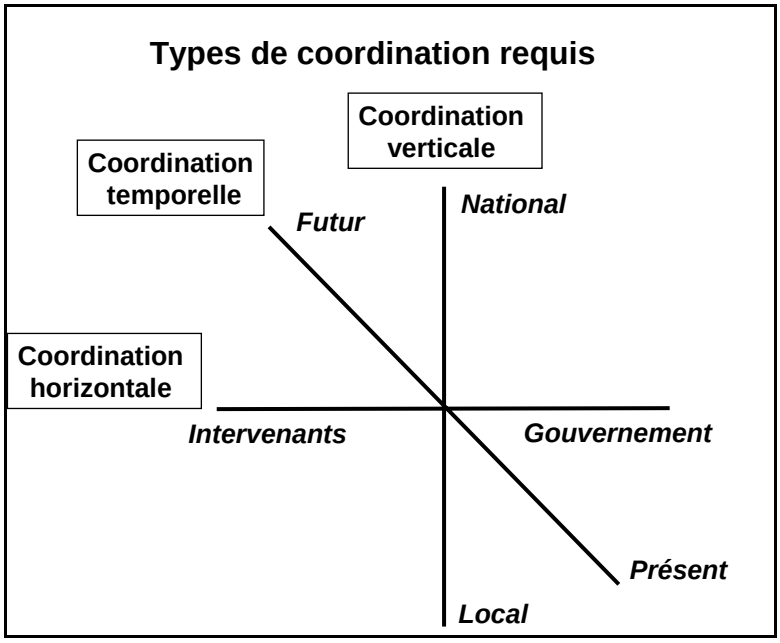


Figure 7. Types de coordination requis (d'après Scialabba [1998, p. 39]).

B. Participation efficace : Pour que le processus de participation donne les résultats escomptés et les avantages mentionnés plus haut, cette participation doit être tangible et concrète. Comme les personnes participent de différentes manières, le processus d'adaptation sera plus utile s'il est conçu pour favoriser certaines caractéristiques. Conde et Lonsdale (2005, p. 53) mentionnent les caractéristiques suivantes :

- clarté;
- compréhension des processus connexes;
- gestion de l'information ;
- soutien et développement de capacité;
- transparence;
- établissement d'un lien de confiance;
- durée suffisante pour le processus;
- rétroaction et souplesse.

L'échange d'information par divers canaux vise à donner à tous les intervenants, ou à la plupart d'entre eux, une compréhension collective et réaliste des contraintes et des

avantages de la situation. Si on y parvient, on peut grandement réduire la nécessité de gérer les conflits (Morris, n.d.; Rijsberman, 1999; Scialabba, 1998, partie E).

C. Gestion des conflits : Le recours à un mécanisme de règlement des différends est très pertinent pour les conflits dans les zones côtières, en raison des utilisations nombreuses de la côte, de la multitude des intervenants et de l'aspect multidimensionnel des conflits. On peut décrire la résolution des conflits comme un « processus qui amène deux ou plusieurs parties en conflit à améliorer la situation grâce à une action coopérative… leur permettant d'optimiser leurs avantages respectifs, ou d'empêcher que ces avantages ne diminuent » (citation de Melling (1994) par Scialabba (1998), p. 201).

La gestion des conflits est à la fois proactive et réactive. En mettant l'accent sur la nécessité d'obtenir la participation des intervenants dans le processus d'adaptation, nos recherches ont utilisé une approche proactive pour la gestion des conflits, ce qui facilite un environnement ouvert de communication entre tous les intervenants. Le mécanisme de règlement des différends requiert que les parties touchées discutent du conflit, pour que les solutions correspondent mieux à leurs besoins. Un mécanisme souple de règlement est souvent plus rapide et moins coûteux que les techniques usuelles de résolution des conflits. En outre, comme les techniques « souples » de résolution des différends exigent des intervenants qu'ils communiquent et en arrivent à une compréhension mutuelle, ils seront plus enclins à s'attaquer aux causes premières de leurs désaccords et ainsi à jeter les ponts pour de meilleures interactions ultérieures (figure 8) (Morris, n.d.; Scialabba, 1998, partie E; Rijsberman, 1999; Scialabba, 1998, partie E).

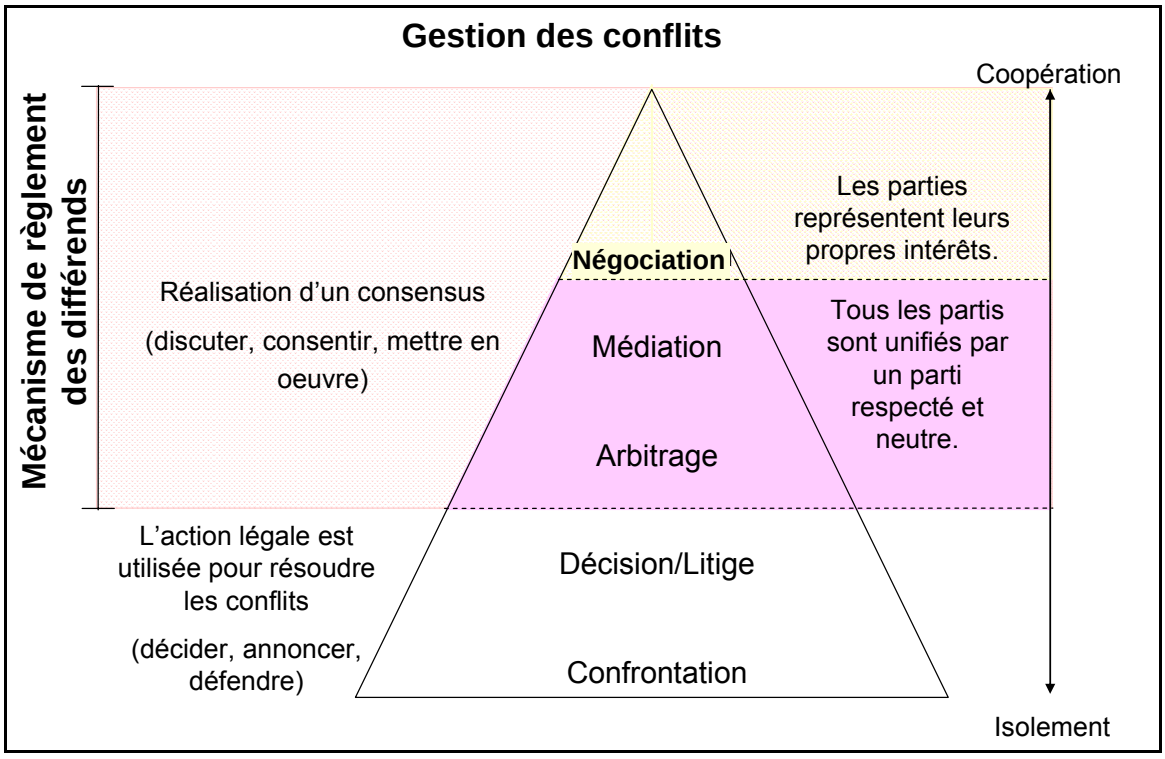


Figure 8. Gestion des conflits (d'après Scialabba [1998, p. 202, Figure E.1] et Morris [n.d.]).

4.8.4.6 Application du cadre d'adaptation

Nous avons réalisé quatre études de cas afin de démontrer l'utilité du cadre conceptuel dans l'analyse de stratégies passées d'adaptation, et l'élaboration de nouvelles. Dans deux études de cas, nous utilisons le cadre pour analyser les mesures d'adaptation passées, afin d'en déterminer les principales caractéristiques. Ensuite, nous l'appliquons à deux situations actuelles pour explorer son utilisation possible comme outil de décision communautaire. Ces applications illustreront la capacité du cadre de traiter diverses situations uniques, l'importance de l'accent mis sur la participation communautaire, et les éléments essentiels pour assurer le fonctionnement du cadre.

4.8.4.6.1 Exemples d'application du cadre : Parc national Kouchibouguac

A. Importance de l'étude de cas

Le parc national Kouchibouguac a cherché à réduire les coûts de ses mesures d'adaptation en intégrant à ses politiques la nature changeante des écosystèmes locaux et en s'appuyant sur ceux-ci pour établir des stratégies d'adaptation temporaires, mais efficaces. Cette étude de cas examine les méthodes d'adaptation peu coûteuses (mais fort efficaces) utilisées dans le parc national Kouchibouguac, et nous indiquerons comment ces stratégies conviennent à la communauté de Kouchibouguac, et comment on peut appliquer ailleurs les enseignements tirés de ces stratégies d'adaptation. L'information provient des dossiers du parc, de visites sur place et d'entrevues.

Figure 9. Parc national Kouchibouguac (de Parcs Canada [2002, 1998]).

B. Cadre d'application : les éléments

***La scène* :** Au parc national Kouchibouquac, plusieurs problèmes ont amené à s'adapter à l'élévation du niveau de la mer. Le parc a été établi en 1969 pour préserver l'habitat de diverses espèces végétales et animales, mais nombre d'entre elles sont de plus en plus menacées par les changements de l'environnement local. Par exemple, le Pluvier siffleur, un petit oiseau qui vit et nidifie sur les quelques dunes du parc, est menacé par l'augmentation des inondations et l'érosion des dunes. De plus, une tempête particulièrement violente en octobre 2000 (voir la figure 9) a montré l'impact monétaire de l'augmentation de fréquence des tempêtes : les coûts de réparation des passerelles et des pistes d'accès au parc ont été évalués à 785 000 dollars (Martin et Tremblay, 2005).

Le prisme conceptuel : Le parc national Kouchibouguac est un lieu unique pour analyser les stratégies d'adaptation, parce que ses prismes conceptuels diffèrent de ceux que l'on retrouve dans les autres communautés locales touchées par la nature changeante du littoral du sud-est du Nouveau-Brunswick. Comme le parc est une entité financée par le gouvernement fédéral, il dispose de nombreuses ressources économiques et physiques, sous la forme d'infrastructure, de fonds gouvernementaux pour la maintenance, d'un personnel qualifié et d'installations éducatives. De plus, le parc se caractérise par l'accent mis sur les connaissances et par la formation de son personnel, qui a une connaissance poussée de la région et qui a accès à diverses ressources. Toutefois, les autres intervenants locaux n'ont pas vraiment leur mot à dire dans les stratégies d'adaptation adoptées par le parc. Les valeurs du personnel du parc et des communautés qui dépendent du parc en tant qu'attraction éco-touristique sont régies par des directives écrites. Les principales caractéristiques socioculturelles du parc comprennent un cadre juridique qui en balise les priorités :

- accroître la protection du patrimoine de cette région côtière représentative, et en maintenir l'intégrité écologique;
- faire mieux connaître le patrimoine au public en améliorant les programmes d'interprétation de ce patrimoine, et en diversifiant les façons de l'apprécier;
- maintenir le rôle que joue le parc en tant que bon voisin, modèle écologique et destination naturelle et culturelle d'importance.

Pour réaliser ce mandat, il faut recourir à des stratégies d'adaptation qui aient un impact relativement faible sur l'environnement local; ce n'est cependant pas nécessairement une politique de non-intervention. Le personnel de Parcs Canada est autorisé à prendre certaines mesures lorsque l'action humaine perturbe les processus naturels ou pour aider les espèces menacées à survivre et à s'épanouir (Tremblay, 2005).

Parties de l'action et réponse spécifique : Les mesures d'adaptation appliquées au parc ont consisté en deux types de réponses, comportant diverses parties. Le personnel du parc a constamment réparé les passerelles qui donnent accès aux plages, et il a tenté de ralentir divers processus d'érosion qui menacent plusieurs espèces fauniques et les sentiers d'accès.

Quand on examine les éléments des diverses mesures prises, il semble qu'une meilleure compréhension de la puissance des systèmes naturels, notamment l'incapacité de les

contrôler, ait influé sur les stratégies d'adaptation utilisées à Kouchibouguac. La connaissance des écosystèmes locaux complexes a permis de ralentir efficacement les modifications, ou d'éviter les problèmes causés par des processus naturels, tout en minimisant les principales interférences négatives possibles avec l'écosystème naturel. Parmi ces méthodes d'aménagement (Martin et Tremblay, 2005) figurent :

- le remplacement des passerelles fixes par des passerelles amovibles (en 1981);
- le remplacement de deux sections de pont flottantes par une voie surélevée, fixée à des poteaux métalliques (depuis 1995-1996);
- la protection des plages par la plantation d'herbe marram;
- des activités saisonnières visant à encourager l'accrétion à l'aide de clôtures à neige.

En comprenant mieux la puissance des systèmes naturels et en constatant que toutes les mesures d'adaptation ont une durée limitée dans le temps, le personnel du parc a pu mieux soupeser les avantages et les inconvénients des diverses mesures (Parcs Canada, 2004; Tremblay, 2006). Par exemple, la construction d'un pont fixe sur la passerelle et la relocalisation de la route menant au quai Loggiecroft ont eu des incidences monétaires (724 373 $ et 1 164 670 $) et écologiques immédiates, mais ces ouvrages préservent l'accès aux installations du parc, ce qui fait partie du mandat du parc. Pour toutes les mesures d'adaptation, les coûts répertoriés de 1975 jusqu'en 2005 totalisent 2 853 892 $ en dommages et en frais de reconstruction, la majeure partie étant associée aux passerelles. L'efficacité des réparations était variable. Il est coûteux de réparer les passerelles, mais l'utilisation de passerelles amovibles en a grandement accru la durée. Par ailleurs, l'herbe marram, bien que peu coûteuse, est facilement détruite par les ondes de tempête, tandis que l'utilisation saisonnière des clôtures à neige a réduit les coûts attribuables aux dommages et au nettoyage. Mais, comme avec toute structure anti-érosion, ces mesures n'ont qu'un effet limité sur le ralentissement des processus d'érosion. Cependant, dans les deux cas, le coût des stratégies d'adaptation sur l'environnement a été faible et cela n'a pas nui à l'accès au parc.

C. Conclusion

En illustrant les coûts potentiels et la logique de la mise en œuvre ponctuelle des stratégies d'adaptation au parc Kouchibouguac, cette étude de cas a montré que le parc est en mesure de prendre des mesures d'adaptation qui ont un impact relativement faible sur l'environnement. Elle montre également qu'il y a une courbe d'apprentissage, car les évaluations des mesures d'adaptation passées ont permis de déterminer quelles mesures ultérieures seraient plus efficaces.

À l'avenir, le parc devra peut-être délaisser sa stratégie d'adaptation ponctuelle, pour créer un plan d'adaptation plus détaillé et prendre des mesures répondant mieux à l'évolution des circonstances. Par exemple, dans quelle mesure Parcs Canada interfère-t-il avec l'intégrité écologique et l'évolution naturelle du parc pour préserver les espèces menacées? Cependant, comme les mesures prises par le personnel du parc sont orientées par un même prisme conceptuel (à l'opposé de ce que l'on retrouve dans de nombreuses communautés le long de la côte sud-est du Nouveau-Brunswick), cette absence de plan exhaustif a peu d'incidence monétaire. On peut dire que les mesures d'adaptation prises par le parc ont été un succès, car, tout en continuant d'assurer un

accès peu nuisible à la plage Kellys et à d'autres secteurs du parc, ces stratégies ont également préservé l'intégrité écologique du parc (Parcs Canada, 2005).

Les mesures spécifiques prises par le parc Kouchibouguac ont constitué un juste équilibre entre les diverses préoccupations (sociales, politiques, environnementales et économiques), compte tenu de sa situation unique. Ces stratégies spécifiques ne seraient pas nécessairement applicables dans d'autres communautés, mais il serait possible d'en transférer plusieurs aspects : les connaissances locales, celles découlant des recherches sur les écosystèmes locaux, la nature limitée de toute stratégie d'adaptation, le caractère plus durable des stratégies naturelles et la nécessité de trouver un équilibre approprié et donc durable entre les divers intérêts. L'évaluation des stratégies d'adaptation utilisées à Kouchibouguac fait la preuve qu'il est dans la nature de la côte de changer et qu'une des forces du genre humain, qui après tout fait partie de l'environnement naturel, est sa capacité de changer en même temps.

4.8.4.6.2 Exemples d'application du cadre : la Politique de protection des zones côtières (PPZC)

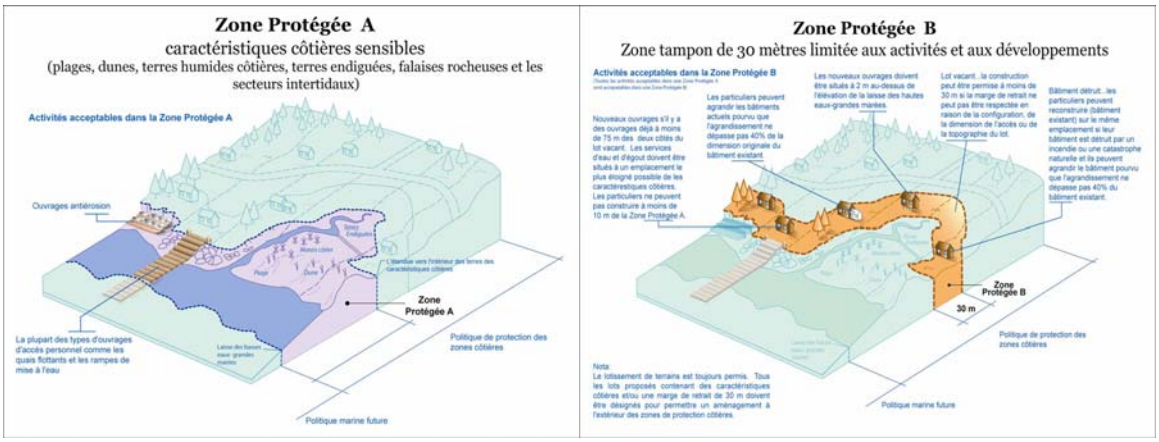


Figure 10. Zones protégées de la Politique de protection des zones côtières (du ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 2005).

A. Importance de l'étude de cas

Au cours de cette recherche, un enjeu en particulier a été maintes fois relevé lors des rencontres et des entrevues avec les collectivités : l'incertitude entourant la politique provinciale sur la protection des zones côtières. Au milieu des années 1990, le gouvernement du Nouveau-Brunswick a été la première instance canadienne à proposer une politique de protection des terres côtières. Celle-ci était assortie de deux objectifs particuliers:

1. protection de caractéristiques côtières particulières (surtout les dunes et les terres humides);
2. réduction des dommages et des coûts associés aux inondations et aux tempêtes côtières grâce à un aménagement structuré.

Cette politique fournit aux propriétaires fonciers des directives d'aménagement qui les aident à prévenir et à atténuer l'impact des changements climatiques. Il s'agit donc d'une stratégie d'adaptation avant-gardiste.

À l'époque où elle a été proposée, la politique constituait un précédent : une stratégie d'adaptation descendante qui visait à assurer la protection des espèces sauvages et des collectivités côtières et qui n'avait d'égale nulle part ailleurs au pays. Cependant, dix ans plus tard, les défis inhérents à sa mise en œuvre demeurent entiers, et les résultats sont variables, en partie parce qu'elle met en jeu un grand nombre d'intervenants à de vastes échelles spatiales et temporelles.

Les paragraphes qui suivent exposent les rôles du gouvernement et montrent que, pour être efficaces, les méthodes d'adaptation doivent être étayées de diverses mesures, dont un dialogue constructif, des consultations efficaces et une planification intégrée entre intervenants.

B. Application du cadre : Le processus

Naissance de l'idée: L'idée de la politique côtière est venue d'un ministère provincial, qui en est resté l'acteur principal; autrement dit, les collectivités touchées n'ont pas « pris le projet en charge ». Le processus a pu avancer parce qu'il était appuyé par un champion possédant des ressources et des préoccupations valables.

Aux États-Unis, des approches descendantes semblables ont été couronnées de succès là où des politiques de gestion des zones côtières ou des règlements stricts sur l'utilisation des terres côtières ont été adoptés pour diverses raisons (ex. : protection des terres humides et accès public aux plages). Ces mesures ont été mises en place tant par le gouvernement fédéral (*Coastal Zone Policy* de 1975, qui prévoyait aussi des ressources importantes) que par les gouvernements d'État (dans le cas des dossiers qui leur étaient propres). De nombreux efforts ont été déployés pour définir et respecter les droits privés sur les propriétés côtières.[38] Le gouvernement du Nouveau-Brunswick suivait donc une pratique déjà établie.

Voici certains résultats de cette approche descendante :

- *Participation limitée des collectivités* – Le gouvernement a fait du travail de communications et tenu de nombreuses séances d'information pour renseigner les propriétaires fonciers au milieu des années 1990, à l'époque de la présentation de la

[38] *Lorsque des États comme la Floride, le New Jersey et la Californie ont tenté de faire appliquer des dispositions portant notamment sur l'accès du public aux plages, la protection des terres humides côtières et la propriété publique des terres côtières remblayées, cette démarche a donné lieu à toute une série de procès qui, pour la plupart, ont confirmé la propriété privée des terres côtières jusqu'à la limite moyenne des laisses de hautes eaux par présomption. Certains de ces litiges ont duré des années, visaient des propriétés de plusieurs millions de dollars et ont nécessité des ressources énormes pour la collecte des données et la délimitation des propriétés. En fin de compte, les États-Unis disposent maintenant d'un système national de définition des niveaux d'eau qui peut être utilisé pour prédire l'élévation du niveau de la mer, ainsi que de procédures rigoureuses pour définir l'emplacement de la laisse des hautes et des basses eaux. Si le Canada accuse un retard dans ce domaine, c'est parce qu'il n'y a eu à peu près aucune contestation judiciaire; en fait, dans les récentes décennies, le gouvernement a fermé des stations marégraphiques plutôt que de les améliorer.*

proposition initiale, et après 2002, année de diffusion de la politique révisée. Aux dires des intervenants des collectivités, toutefois, la plupart des rencontres publiques n'ont servi qu'à diffuser de l'information. Certains groupes particuliers, tels que l'Association des arpenteurs-géomètres du Nouveau-Brunswick, ont tenté de participer à l'élaboration de la politique dès le départ, mais la plupart des décisions stratégiques de base avaient déjà été prises lorsqu'elles ont été présentées aux intervenants. Essentiellement, les intervenants considèrent que le gouvernement n'a fait que leur présenter la politique plutôt que de leur donner l'occasion d'en discuter. Cette approche a également été observée au cours de la recherche.

- *Incertitude entourant la mise en œuvre* – Des tempêtes comme celle d'octobre 2000 sont venues renforcer aux yeux du public la nécessité de mettre en place des mesures pour contrôler l'aménagement. Cependant, comme les travaux d'élaboration des règlements se sont échelonnés sur plusieurs années et que certains règlements n'ont pas encore été adoptés, les intervenants sont incertains des effets de la politique. Certains intervenants (planificateurs, avocats arpenteurs, etc.) sont incapables de donner des conseils exacts et complets à leurs clients en l'absence de règlements approuvés (Hartley, 2006). Les planificateurs interrogés lors de la recherche se sont plaints du fait que, dans les six à dix dernières années, les retards dans l'adoption de la réglementation nécessaire à la mise en œuvre de la politique ont eu pour effet de stimuler l'aménagement plutôt que d'y mettre un frein. Les exemples de constructions inappropriées se sont multipliés depuis le milieu des années 1990, époque où le public a pris conscience de l'existence de propositions visant le contrôle de l'aménagement.

- *Uniformité de l'approche* – La politique proposée accordait le même traitement à toutes les régions géographiques, indépendamment des enjeux. Ainsi, les propriétaires fonciers établis sur des falaises rocheuses de la baie de Fundy avaient de la difficulté à comprendre pourquoi une marge de recul de 30 m s'appliquait à eux. Cependant, le ministère de l'Environnement autorise certaines dérogations à la réglementation, et il permet également l'adoption de règlements plus sévères à l'échelle locale afin de régler certains enjeux précis.

- *Portée étroite* – Loin d'être une approche exhaustive à l'égard de la gestion des zones côtières, la politique proposée mettait l'accent sur deux enjeux particuliers – la protection des caractéristiques côtières et la prévention de l'érosion et d'autres dommages aux biens par l'aménagement structuré. Cependant, elle ne s'insérait pas dans une vision plus large de la gestion intégrée des ressources côtières. De plus, la politique était limitée aux activités entreprises du côté terre des basses eaux. Lors des rencontres publiques tenues à Bouctouche au cours de cette recherche, par exemple, les pêcheurs ont soulevé l'impact de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête sur l'aquaculture (26 octobre 2005). Dans le golfe Saint-Laurent, bon nombre d'activités aquacoles traditionnelles reposent sur des installations situées soit très près du rivage, soit sur le rivage même, et les aquaculteurs ont dit craindre pour leurs investissements. Au milieu des années 1990, le gouvernement a entrepris l'élaboration d'une politique marine, qui n'a pas encore été diffusée au public. On peut présumer que le rivage sera le dénominateur commun de ces deux politiques et que les activités qui chevauchent cette « limite » ou cette « zone » seront couvertes par l'une des politiques, sinon par les deux.

Collecte de données et recherche: En plus d'un solide programme de surveillance de l'érosion des côtes, la collecte de données a été étayée de travaux de cartographie par orthophotographie couleur. Il a ainsi été possible de procéder à une délimitation géomorphologique et environnementale des caractéristiques côtières et de la limite ordinaire approximative de la laisse des hautes eaux, à partir de laquelle les marges de recul devaient être mesurées. De 1995 à 1999, les principales dépenses visaient les activités suivantes (Finley, 2006) :

- étude des besoins des utilisateurs (environ 40 000 $);
- préparatifs, élaboration de devis, photographie et production (environ 770 000 $);
- création d'une base de données sur les terres côtières et contrôle de la qualité (environ 780 000 $).

Ces travaux de cartographie ont fait du Nouveau-Brunswick un leader pour l'excellence de l'information recueillie sur les côtes. Malgré tout, plusieurs problèmes ont été détectés :

- *Caractère actuel des données* : Les cartes visaient à aider les agents de planification à déterminer les marges de recul légales. Dans les régions côtières qui ont subi d'importants changements dans la dernière décennie, il faudra procéder à des vérifications sur le terrain. Par exemple, les données sur l'élévation du niveau de la mer et les changements climatiques recueillies pendant la recherche donnent à penser que, dans de nombreuses régions de la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, il ne suffit plus de surélever sa maison de 2 m, comme l'indique l'actuelle PPZC, pour la protéger contre les ondes de tempête. Cette situation rend nécessaire l'embauche de « spécialistes des caractéristiques côtières » chargés d'examiner la situation dans des régions précises. Cependant, leurs conclusions concernant l'élévation et les limites (ex. : diverses laisses de hautes et de basses eaux) ne sont pas nécessairement celles d'un arpenteur professionnel agréé.

- *Recherches juridiques*: Même si des juristes de la Nouvelle-Écosse ont été consultés, il semble que peu de recherches exhaustives aient été réalisées au départ sur les droits des propriétaires privés, les champs de compétence et les limites des zones côtières, surtout lors de l'élaboration de la politique originale. Certains de ces enjeux ne sont pas abordés « clairement » dans la législation. Or, en omettant de reconnaître que la politique et la réglementation pourraient nuire aux droits traditionnels (y compris les droits des riverains et les droits publics dans la zone littorale), on risque de créer des obstacles à l'adhésion des collectivités et des propriétaires fonciers. Aux États-Unis, des approches semblables ont donné lieu à tout un éventail de contestations judiciaires dans les années 1970 et 1980.

- *Collecte d'information auprès du public et recherche sur les connaissances et les préoccupations locales* : Les fonctionnaires du gouvernement provincial ont tenu des séances d'information. Cependant, si l'on en juge par les commentaires recueillis auprès des intervenants, ils n'ont pas réussi à inspirer un désir de prise en charge ou un esprit de dialogue durable chez les collectivités locales. Cette situation est en partie attribuable aux ressources limitées dont disposent certaines collectivités pour gérer les menaces créées par les tempêtes dans leur région. Sans la représentation d'une vaste gamme d'intervenants, sans mobilisation efficace (y compris des

ressources nécessaires pour composer avec les impacts de la politique) et sans stratégie de gestion des conflits (voir les pratiques exemplaires), il est difficile de dresser un plan de mise en œuvre intégré qui produira les résultats souhaités. Par exemple, les intervenants qui ont participé à la recherche se demandaient : a) quels volets de la politique étaient en vigueur; b) si les fonctionnaires appliquaient les dispositions de façon équitable et uniforme; c) où ils pouvaient demander de l'aide pour élaborer des stratégies de protection de leurs biens (ex., sessions d'information, 28 septembre 2005; 11 octobre 2005; 12 octobre 2005; 28 février 2006).

Analyse et élaboration de la stratégie: Contrairement au processus exposé ici, la création de la PPZC estompe les limites entre les étapes de la collecte des données, de l'analyse et de l'élaboration de la stratégie. La décision quant à ce qui devait être protégé et comment semble avoir été prise au début du processus. Par exemple, il semble évident que les travaux de cartographie ont été régis par la stratégie, puisqu'on n'a guère accordé d'attention aux zones intertidales, qui à long terme peuvent exiger des critères différents pour ce qui est de la cartographie et de la collecte d'information (Réjean Castonguay, Service Nouveau-Brunswick, comm. pers., 2003).

La principale lacune de la politique du Nouveau-Brunswick tient à l'incertitude qu'elle a créée entre, d'une part, le moment où elle a été annoncée et où les séances d'information publique ont eu lieu (1996) et, d'autre part, sa mise en œuvre partielle près de 8 ans plus tard. De nombreux intervenants interrogés, y compris des planificateurs, ont admis que ce retard avait stimulé l'aménagement et la construction domiciliaire près du rivage, les propriétaires s'empressant de construire avant qu'un règlement ne vienne les en empêcher. Particuliers, représentants municipaux et groupes environnementaux se sont plaints de l'absence d'outils pour gérer l'aménagement dans les zones côtières afin de prévenir la construction dans des zones risquées et de sauvegarder des caractéristiques naturelles de la côte (Sessions d'information, 28 septembre 2005;, 11 octobre 2005; 12 octobre 2005; 28 février 2006).

Mise en œuvre: Le gouvernement provincial a mis en œuvre la PPZC de deux manières : a) par l'intégration de dispositions à d'autres règlements et b) par l'adoption officieuse de dispositions par les districts de services locaux (DSL). Certaines des dispositions de la politique ont été incluses dans la réglementation sur les terres humides (prise en vertu de la *Loi sur l'assainissement de l'eau*) pour protéger les caractéristiques côtières, et d'autres, dans la réglementation sur l'évaluation des impacts environnementaux (prise en vertu de la *Loi sur l'assainissement de l'environnement*). Jusqu'à 500 plans d'aménagement ont été examinés en 2005 (Paul Jordan, ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux, comm. pers., 12 décembre 2005). Cependant, les retards dans la mise en œuvre et le manque de transparence perçu par les intervenants représentent d'importants obstacles à l'atteinte des objectifs de la politique. Les commissions d'aménagement chargées de faire appliquer les lignes directrices de la politique ne disposent d'aucun fondement juridique pour empêcher l'aménagement dans la zone côtière.

Les intervenants craignent également que les personnes chargées de mettre en œuvre les stratégies d'adaptation exposées dans la politique (ex. : lutte contre l'érosion) n'aient pas les ressources voulues pour y parvenir. Les ouvrages de protection, par exemple, sont très coûteux et ne sont pas à la portée de tous. Dans certains cas, des conflits sont

nés du fait que certains résidents étaient incapables de contribuer au financement d'ouvrages de protection jugés nécessaires par d'autres, ces ouvrages étant plus efficaces s'ils sont ininterrompus (Chouinard et Martin, 2006). En outre, les petites collectivités ont peur de ne pas avoir suffisamment de ressources pour respecter la politique (ex. : Cap-Pelé, 28 février 2006). D'ici à ce que la politique ait force de loi, il sera difficile d'en faire respecter l'esprit, même à l'échelle des Districts de services locaux.

Pour la plupart des propriétaires fonciers, la principale crainte concerne la zone « exempte d'aménagement » de 30 m à partir de la laisse des hautes eaux[39] et les caractéristiques côtières qui doivent être protégées. Il existe quelques exceptions aux restrictions, qui sont basées sur les constructions actuelles, mais, quand les propriétés côtières occupent une petite superficie, cette zone peut avoir de graves impacts sur la valeur et les possibilités d'utilisation de la propriété. De plus, l'interdiction d'aménager est en vigueur même sur les hautes falaises rocheuses qui ne sont pas vulnérables à l'élévation du niveau de la mer ou à l'érosion (Direction de la planification durable, 2002). Les propriétaires fonciers ont exprimé leur frustration devant la nature universelle de la politique écrite (Sessions d'information, 28 septembre 2005; 11 octobre 2005; 12 octobre 2005; 28 février 2006).

La complexité du processus réglementaire engendre d'autres problèmes : il faut obtenir plusieurs approbations avant de recevoir un permis, et les zones côtières s'inscrivent dans le mandat de plusieurs ministères. Bon nombre de participants ont souligné la nécessité de mettre en place un processus simplifié et centralisé à l'échelle locale pour la délivrance des permis de protection ou d'autres mesures d'adaptation (Chouinard et Martin, 2006).

La politique expose un certain nombre d'activités que les propriétaires de terrains élevés peuvent réaliser pour protéger leur propriété, notamment planter des graminées ammophiles indigènes sur les dunes ou construire des ouvrages de lutte approuvés. Lorsqu'ils construisent des ouvrages (ex. : murs ou obstacles) pour protéger leur propriété, il arrive que les propriétaires fonciers endommagent des parcelles de terrain situées à proximité ou en aval en y accroissant l'érosion. Ainsi, une politique provinciale telle que la PPZC doit permettre aux commissions d'aménagement de conseiller les propriétaires fonciers et de veiller à ce que les mécanismes de protection soient : a) efficaces; b) sans danger pour les autres propriétés.

D'ici à ce que toutes les dispositions de la politique aient force exécutoire, les fonctionnaires disposent de ressources et de leviers réglementaires limités, et ils pourront difficilement venir en aide aux collectivités. Cependant, les intervenants tentent d'encourager le recul productif et la mise en œuvre de règlements municipaux plus musclés. En vertu de la PPZC, les plans sont évalués au cas par cas, et les évaluateurs jouent le rôle d'agents de diffusion d'information afin de compenser les limites de certaines recommandations (Jordan, 2005).

Comme il a été observé pendant les séances de mobilisation des collectivités, les intervenants considèrent la politique comme inefficace et estiment qu'elle est mise en

[39] La définition précise de cette limite a changé plusieurs fois pendant la rédaction des règlements.

œuvre de façon inéquitable dans les cas où elle est effectivement appliquée. Cette situation pourrait toutefois changer, lorsque le processus d'examen des projets d'aménagement mis en place par le gouvernement du Nouveau-Brunswick s'inscrira dans les activités d'aménagement courantes. L'absence de réglementation claire empêche les collectivités de faire des investissements volontaires ou obligatoires dans la politique. Les problèmes semblent être les suivants : manque de fonds et d'autres ressources, manque de connaissances et absence de consensus. De nombreux membres des collectivités touchées se sont dits frustrés de la situation (Sessions d'information, 28 septembre 2005; 11 octobre 2005; 12 octobre 2005; 28 février 2006).

Évaluation: En matière d'adaptation, la PPZC a probablement à la fois engendré des problèmes et créé des possibilités. Il existe des données attestant que des propriétaires prudents, informés des problèmes grâce aux activités de sensibilisation et de consultation des DSL, ont rehaussé la protection de leur propriété en construisant sur du terrain plus élevé, en surélevant leurs constructions ou en protégeant adéquatement le littoral. Par contre, l'entrée en vigueur retardée de la politique semble avoir mené à des projets d'aménagement inappropriés dans certains secteurs.

L'étude de cas a mis en lumière la nécessité de mobiliser une gamme variée d'intervenants pour la création de stratégies d'adaptation, malgré les difficultés que représente une telle entreprise. Sans le recours à cette pratique exemplaire, qui doit s'accompagner notamment de stratégies de gestion des conflits, il devient très difficile de concevoir une stratégie d'adaptation qui concilie les intérêts de tous les intervenants et à laquelle les collectivités peuvent adhérer. Il est important pour les collectivités de « prendre en charge » la mise en œuvre de la stratégie. Pour ce faire, il faut qu'il y ait un dialogue constructif, que les collectivités participent activement à toutes les étapes du processus et qu'elles aient accès à de l'information claire.

Ce bref examen de la PPZC illustre les avantages exceptionnels que les gouvernements peuvent tirer en participant à la création de stratégies d'adaptation (en tant qu'acteurs traditionnels, champions et représentants de nombreux intervenants, surtout ceux qui ne résident pas en permanence dans la région concernée), tout en mettant en relief la nécessité de rallier l'appui local et de mobiliser les intervenants. Le gouvernement du Nouveau-Brunswick a pris l'initiative en reconnaissant l'existence de graves problèmes côtiers, et, pour y remédier, il a créé la première grande politique côtière du pays. L'évaluation qui précède montre en quoi les mesures d'adaptation proposées auraient pu être plus efficaces. Il faut maintenant surveiller les efforts de mise en œuvre afin d'aider la province (et d'autres administrations) à en tirer des enseignements.

Voici quelques leçons tirées de l'élaboration de stratégies d'adaptation :

- nécessité d'adopter une approche pluridisciplinaire intégrée pour l'élaboration de politiques côtières, de manière à ce que tous les enjeux soient pris en compte dès le début, y compris les travaux de recherche (sciences, droit, etc.);
- nécessité de mettre en place un processus efficace de mobilisation des intervenants dès les premiers stades de l'élaboration de la stratégie, afin d'amener les collectivités à prendre le processus en charge;
- besoin d'un engagement politique solide pour appuyer les efforts des planificateurs ainsi que des ressources voulues pour mobiliser les collectivités locales;

nécessité d'adopter des lignes directrices claires (ex. : mécanismes de protection appropriés) et de créer des « guichets d'information uniques » pour bien renseigner les propriétaires fonciers et les aiguiller vers les spécialistes compétents;

- nécessité de rallier l'appui des propriétaires fonciers, notamment en leur fournissant suffisamment d'information sur les coûts et les options et en leur donnant accès aux ressources voulues pour prendre des mesures d'adaptation (ex. : taxes foncières assorties d'incitatifs, projets communautaires).

4.8.4.6.3 Exemples d'application du cadre : Bouctouche

Figure 11. Le Pays de la Sagouine.

A. Importance de l'étude de cas

L'application du cadre décisionnel à Bouctouche présente :

- l'utilisation du cadre dans un processus d'adaptation participatif;
- la logique d'une stratégie d'adaptation multidimensionnelle;
- les aspects critiques qui sont associés au processus décisionnel.

Comme cette étude de cas est basée sur l'étude socioéconomique de Bouctouche (voir la section 4.7.4.1), les mesures d'adaptation mentionnées chercheront à préserver et à accroître l'économie touristique de cette région, avec l'aide de divers intervenants (la figure 11 identifie un site menacé). L'information pour cette étude de cas provient des commentaires formulés pendant les séances d'information avec la communauté, d'un sondage informel et des scénarios optimistes fournis par la composante socioéconomique du projet (voir section 4.7).

B. Application du cadre : création et mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation communautaire

1. La scène

Formulation de l'idée : À Bouctouche, de nombreux intervenants locaux veulent agir (Martin, 2005a; UNB et UdeM, 2005), parce qu'une érosion importante, des embâcles et des ondes de tempête causées par l'élévation du niveau de la mer menacent ou menaceront le mode de vie de la population. Comme la ville ne veut plus accepter ce danger croissant et ne peut esquiver tous ses problèmes, il est important que les intervenants adoptent une approche d'adaptation plus proactive. Pour des raisons historiques, on peut présumer que les responsables élus traditionnels et d'autres leaders locaux préoccupés par la situation se feront les champions de ce processus.

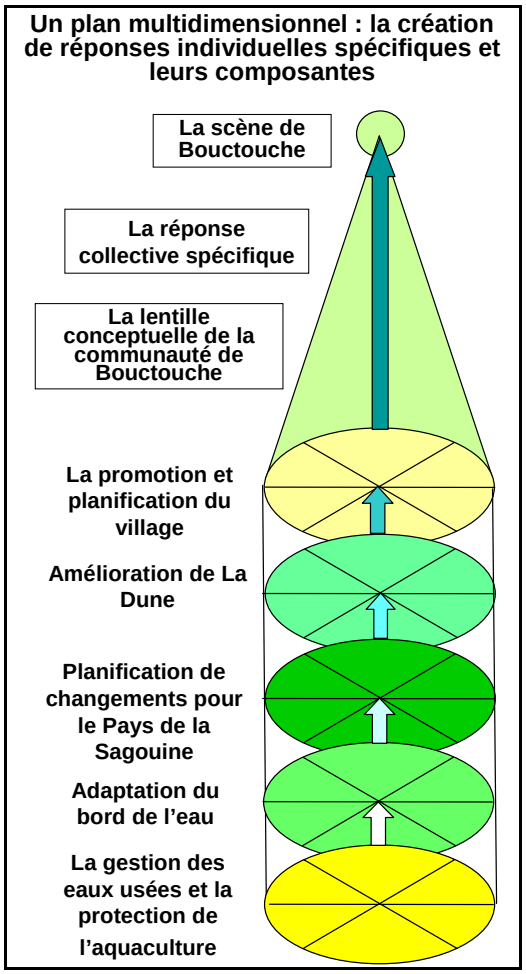


Figure 12. Un plan multidimensionnel.

2. Détermination du prisme conceptuel

Collecte de données et recherche : Afin de créer une stratégie d'adaptation appropriée, surtout pour une ville entière, on peut recourir à diverses techniques pour recueillir des données sur le prisme conceptuel de la communauté, d'après l'information fournie par les participants. Selon les types et les niveaux de participation utilisés, on peut rechercher de diverses façons la collaboration des intervenants afin de faciliter l'échange d'informations. Par exemple, il est important de tenir des séances d'information et des activités participatives bilingues à Bouctouche. En outre, comme l'administration locale est dynamique, il est très important de s'assurer que les voix habituellement moins entendues le soient, grâce à un mécanisme plus actif de participation. On a intérêt à ce que la plupart des acteurs qui recueillent des données proviennent de la communauté, parce qu'ils connaissent justement les questions sociales locales ou encore les liens de pouvoir qui pourraient poser problème lorsqu'on tente d'encourager un climat ouvert et participatif. Toutefois, des acteurs de l'extérieur de la communauté possédant des connaissances spécialisées seraient également un apport précieux au processus de recherche.

Analyse : Les données recueillies sur les intérêts sociaux, politiques, économiques et environnementaux des intervenants doivent être pondérées de façon appropriée, afin que l'on puisse évaluer exactement le prisme conceptuel de la communauté, et non celui des individus. C'est la qualité de cette évaluation qui aidera à déterminer la pertinence véritable de la stratégie d'adaptation pour la communauté, et donc sa durabilité. L'analyse du prisme conceptuel de Bouctouche permet également de bien comprendre comment les changements récents et futurs de l'environnement côtier dynamique, jumelés aux politiques et aux infrastructures existantes, menacent les attractions de la ville, l'écosystème local et les emplois locaux.

3. Identification des éléments des mesures d'adaptation

Création de la stratégie : Quand un groupe diversifié d'intervenants a de nombreuses préoccupations et qu'il est motivé également pour s'adapter à l'évolution des conditions, il est souvent avantageux de coordonner leurs actions dans des plans et des calendriers réalistes. Il est important aussi de créer une stratégie d'adaptation multidimensionnelle afin de combattre la myriade de problèmes (figure 12).

À Bouctouche, diverses réponses spécifiques permettraient de se préparer au changement, notamment :

- coordonner une campagne dans toute la ville pour faire connaître les effets du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer, afin de diversifier l'économie locale pour en réduire la vulnérabilité;
- établir des plans réalistes d'adaptation à court et à long terme pour les attractions touristiques;
- s'attaquer aux dangers possibles pour la santé, avant qu'ils ne se manifestent.

La création d'un plan exhaustif exigera de prioriser certaines stratégies d'adaptation. Des conflits pourraient survenir, au sujet non seulement du type de mesures d'adaptation, mais également de la priorisation et de l'affectation des ressources. C'est pourquoi un dialogue constructif doit être encouragé pendant l'étape de planification. On pourrait y parvenir en présentant les plans initiaux dans les médias, en organisant des séances d'information, et en réglant les critiques et les problèmes au cours de séances d'information publiques ou par l'échange de correspondance.

C. Conclusion

L'application de la situation de Bouctouche au cadre décisionnel illustre les avantages que comporte l'élaboration d'une stratégie multidimensionnelle qui intègre des plans définis et des calendriers variés. Cette étude de cas illustre également l'importance de la participation des intervenants pour créer une stratégie d'adaptation appropriée et durable.

4.8.4.6.4 Exemples d'application du cadre : Pointe-du-Chêne

A. Importance de l'étude de cas

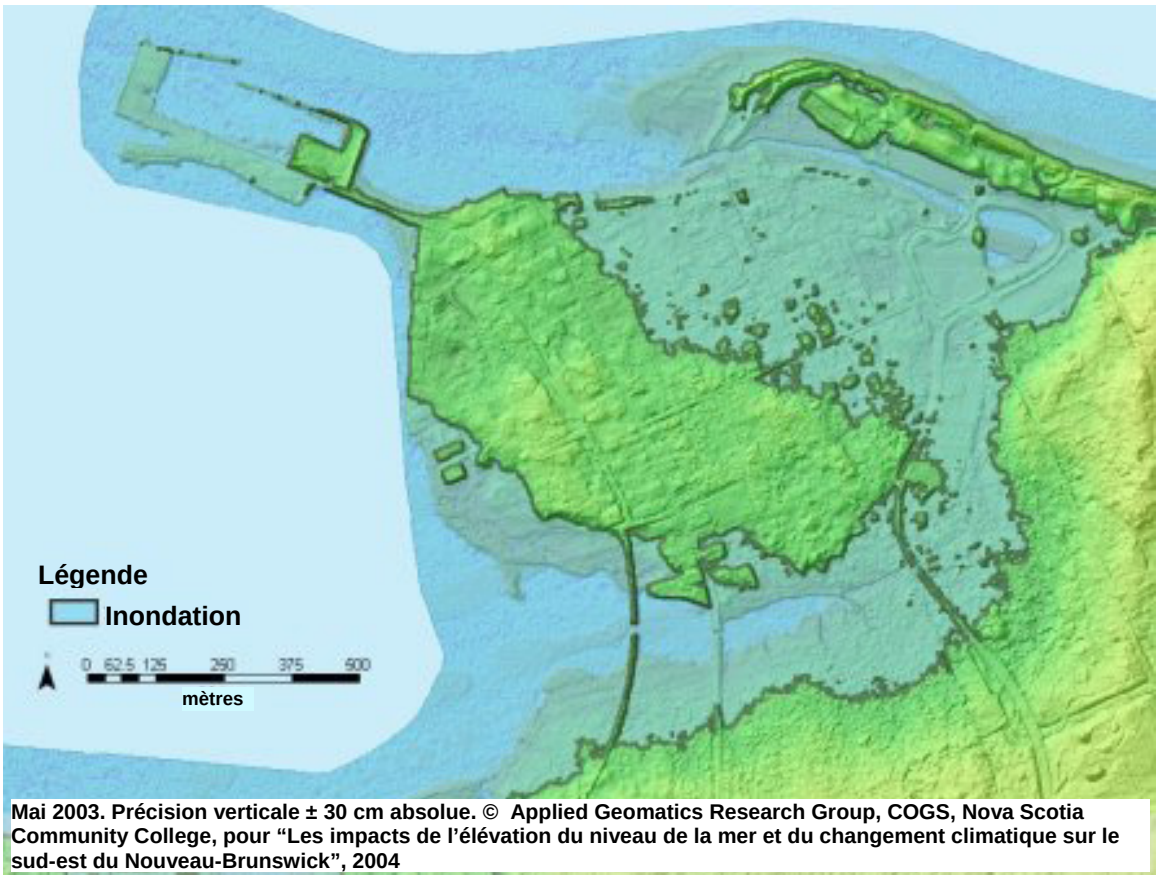


Figure 13. Scénario d'inondation à Pointe-du-Chêne le 21 janvier 2000, avec un niveau d'eau de 2,55 m (MAN). (Environnement Canada [2004]).

À l'opposé de la situation à Bouctouche, à Pointe-du-Chêne, la participation des intervenants semble limitée, les points de vue différents (particulièrement entre les résidents saisonniers et permanents) et les ressources limitées. L'étude de cas montre comment l'utilisation du cadre d'adaptation accroîtrait la capacité adaptative de Pointe-du-Chêne. À cette fin, il s'agirait d'utiliser des techniques préventives et réactives de gestion des conflits, de créer diverses stratégies d'adaptation individuelles et communautaires grâce à des pratiques participatives et effectives, et par la suite de renforcer les synergies existantes et nouvelles. L'étude de cas de Pointe-du-Chêne illustre la capacité, pour les résidents concernés n'ayant que des ressources limitées, d'utiliser le cadre pour créer diverses stratégies d'adaptation. En raison de la grande vulnérabilité de cette communauté et de son besoin manifeste d'aide, des séances d'information ont eu lieu dans le cadre de ce projet, et les zones à problème ont été visitées.

B. Application du cadre : création et mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation communautaire

1. La scène

Création d'idée : Pointe-du-Chêne, une péninsule basse située sur la baie de Shediac, compte habituellement quelque 900 résidents, population qui grimpe l'été à quelques milliers de visiteurs, dont bon nombre sont fortement attachés à la région. Les résidences et les résidents de cette péninsule sont de plus en plus mis en péril par l'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête, les embâcles et l'érosion (figure 13). Cette vulnérabilité (jumelée à un manque de résilience) est une source de préoccupations majeures pour la sécurité, et on a constaté l'absence de l'information et de l'expertise nécessaire pour s'adapter au mieux à l'environnement changeant et dynamique (Session d'information, 11 octobre 2005; Martin, 2005b; UNB et UdeM, 2005).

2. Détermination du prisme conceptuel

Collecte de données et recherche : À Pointe-du-Chêne, les résidents ont toujours été les champions de leur propre cause. Par le passé, ils déploraient le manque de participation des décideurs gouvernementaux (Session d'information, 11 octobre 2005; Martin, 2005b; UNB et UdeM, 2005). Pendant la collecte des données, les recherches ou les réunions publiques, il y a donc lieu de faire participer les visiteurs saisonniers, les médias, les résidents locaux et les responsables gouvernementaux afin de s'appuyer sur cette tradition et de créer un processus d'adaptation communautaire ouvert à tous les intervenants, y compris le gouvernement.

Autrement dit, les caractéristiques socioculturelles à Pointe-du-Chêne sont dominées par des relations complexes (souffrant d'un manque de communication) entre divers intervenants, notamment le gouvernement, Parcs Canada, les estivants et les résidents permanents. De plus, dans cette étude de cas, les principales caractéristiques économiques et physiques sont un environnement côtier attrayant mais menacé, le manque de ressources monétaires et l'absence d'infrastructure locale (Pêches et Océans Canada, 1997; Session d'information, 11 octobre 2005; Martin, 2005b; Ru, 2001; UNB et UdeM, 2005).

D'un autre côté, la communauté possède des connaissances, bonifiées par l'expérience acquise en relevant les défis qui lui sont propres. En effet, la communauté de Pointe-du-Chêne a déjà appliqué avec succès certaines mesures d'adaptation pour pallier ses déficiences. Par exemple, en créant une équipe d'intervention en cas d'urgence, elle a pris en charge certains de ses problèmes de sécurité et a pris davantage conscience de son pouvoir politique. Toutefois, la majeure partie de l'expérience de la communauté en matière d'adaptation est au niveau individuel, et le degré de succès n'a pas été identique pour tous. En fait, certaines mesures individuelles d'adaptation ont été nuisibles à d'autres. Par conséquent, même si la région est riche en connaissances locales, les résidents de Pointe-du-Chêne n'ont pas l'expertise voulue pour prendre certaines décisions d'adaptation informées et collectives (ou même individuelles), et l'échange d'informations entre les organisations de l'extérieur et la communauté locale est minime (Session d'information, 11 octobre 2005; Martin, 2005b; UNB et UdeM, 2005).

Analyse : Il ressort de l'analyse de la région que Pointe-du-Chêne est très susceptible aux effets de l'élévation du niveau de la mer et que sa résilience et sa capacité de planifier correctement des stratégies d'adaptation appropriées, individuelles ou communautaires, sont entravées par son manque d'expertise, de coordination et de communication (Pêches et Océans Canada, 1997; Session d'information, 11 octobre 2005; Martin, 2005b; Ru, 2001; UNB et UdeM, 2005). L'absence d'influence des intervenants clés qui recourent habituellement à des approches « descendantes », freine gravement le pouvoir politique de la communauté, son accès à l'expertise extérieure et sa capacité globale de créer une stratégie d'adaptation appropriée et durable. Cette situation accroît donc la vulnérabilité de la région. Toutefois, en renforçant ses liens et en accroissant ses connaissances locales, la communauté peut accroître sa capacité globale d'adaptation et être mieux en mesure de prendre les décisions appropriées.

3. Identification des parties des mesures d'adaptation

Création de la stratégie : Pour Pointe-du-Chêne, la stratégie serait d'accroître la capacité adaptative de la communauté en renforçant les canaux de communication déjà en place et en en créant de nouveaux. Afin de favoriser de nouvelles communications et une meilleure coopération, on doit établir un dialogue commun, l'établissement d'une telle compréhension mutuelle exigeant un environnement ouvert et encourageant. À cette fin, les intervenants devraient non seulement s'assurer qu'ils veulent coopérer, mais également qu'ils disposent d'un endroit et d'une méthode pour le faire.

Une stratégie que pourrait envisager la communauté serait de créer un forum interactif (figure 14). Cela pourrait aussi pallier le manque d'information et d'expertise de la communauté, et faire participer les intervenants non résidentiels et les autorités gouvernementales. Par exemple, le forum interactif pourrait être offert sur Internet : la question du lieu de rencontre ne serait plus un problème. Des portails communautaires donneraient accès aux membres de la communauté qui ne disposent pas de leur propre accès Internet. L'accessibilité du forum serait cruciale pour assurer la faisabilité et l'équité de la stratégie. Si on ne peut pas utiliser Internet, on pourrait établir un centre de ressources (par exemple, un babillard). L'utilisation de l'interface par les intervenants et leur accès au portail détermineraient l'efficacité et l'efficience du forum; son coût serait réduit au minimum. L'objectif serait d'établir un outil de communication, afin de :

- prévoir les problèmes futurs en apprenant des autres;
- accroître la sensibilisation aux problèmes;
- favoriser des communications ouvertes et participatives;
- diffuser l'information sur les stratégies d'adaptation et offrir des sources d'expertise;
- mettre en commun des informations sur les solutions peu coûteuses;
- faire le suivi des stratégies passées et de leurs impacts;
- créer et maintenir des liens utiles, permettant une réponse communautaire par rapport aux actions individuelles.

Dans l'idéal, la négociation et la médiation requises pour les futurs processus d'adaptation seraient facilitées par la stratégie de participation communautaire, qui aurait été créée au préalable. Toutefois, la communauté devrait d'abord étudier la décision de mettre en œuvre l'interface, ainsi que les questions d'accessibilité et de coût.

4. Réponse spécifique

Mise en place et évaluation : Si cette stratégie d'adaptation est mise en œuvre, la maintenance d'une interface interactive favoriserait, idéalement, des négociations, des mesures et une évaluation constantes. Par exemple, on pourrait débattre de la priorisation des stratégies, de l'applicabilité des mesures d'adaptation de certains intervenants, voire de l'utilité même du forum.

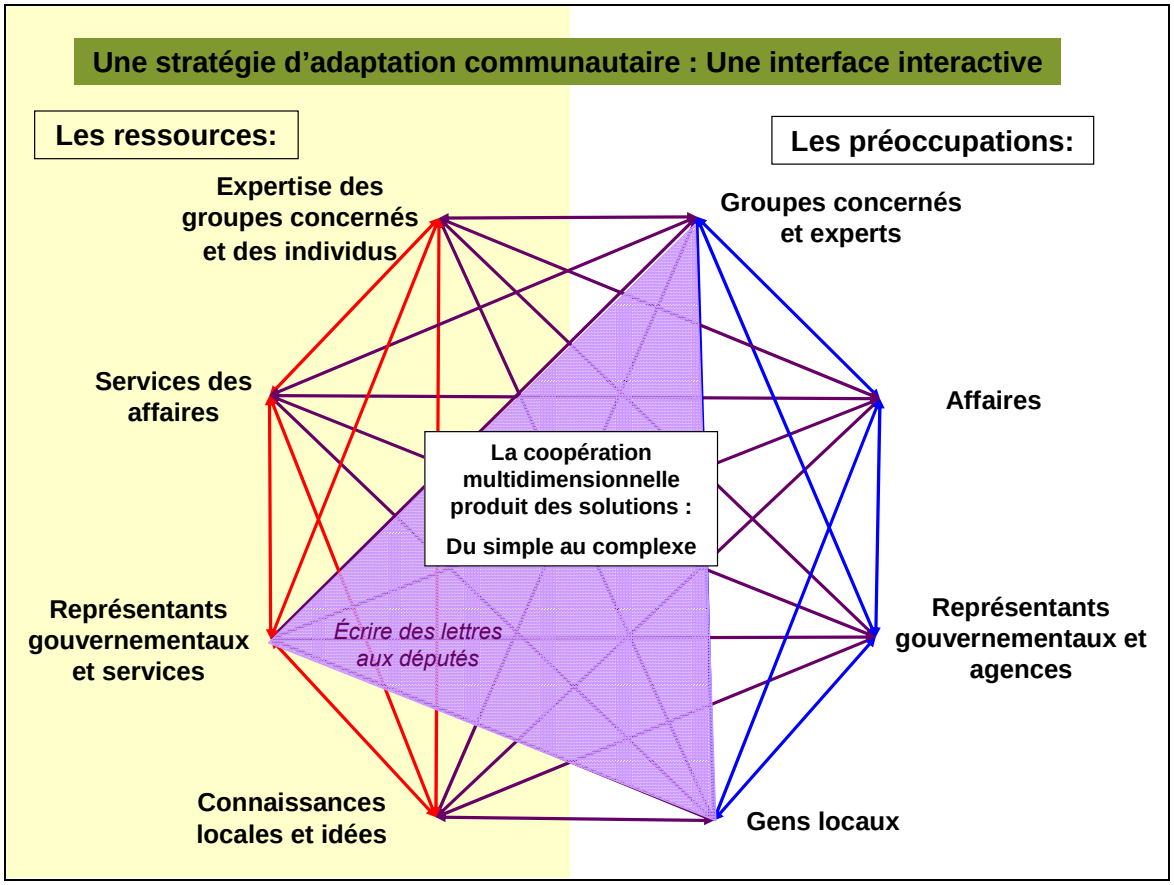


Figure 14. Une stratégie d'adaptation communautaire.

C. Conclusion

À Pointe-du-Chêne, les intervenants les plus actifs sont, avant tout, les résidents qui sont habitués au manque de gouvernance et qui ont une tradition de mesures d'adaptation individuelles et ponctuelles (Session d'information, 11 octobre 2005; Martin, 2005b; UNB et UdeM, 2005). Malgré ces limites, l'étude de cas de Pointe-du-Chêne illustre les possibilités d'adaptation d'une communauté et décrit comment on peut utiliser le cadre pour créer diverses stratégies d'adaptation, compte tenu de contraintes particulières.

4.8.5 Sommaire et conclusions

Pour trouver le juste équilibre entre les intérêts particuliers (environnementaux, sociaux, politiques et économiques) des intervenants, il est crucial d'avoir la participation d'un

large éventail d'intervenants, notamment les résidents, les leaders communautaires et les représentants gouvernementaux. Chaque intervenant apporte en effet au processus d'adaptation communautaire une expertise, une perception, des priorités et des capacités qui lui sont propres. Les stratégies d'adaptation efficaces — celles qui sont mises en œuvre et dont les objectifs respectent les valeurs locales — sont ascendantes, c.-à-d. qu'elles viennent de la communauté touchée, au lieu d'être descendantes.

Les stratégies nationales et provinciales ne peuvent être efficaces que si elles peuvent être adaptées aux conditions locales qu'elles offrent des possibilités d'apport local et respectent les valeurs locales. Il faut aussi qu'elles apportent des ressources et une expertise aux communautés qui sont censées les mettre en œuvre. Même les initiatives nationales ou provinciales bien intentionnées peuvent susciter la méfiance si leur mise en œuvre au niveau local n'est pas efficace. Dans une telle situation, les objectifs de l'initiative peuvent carrément être minés.

Plusieurs éléments sont essentiels pour élaborer des réponses communautaires aux menaces que représentent l'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête : la sensibilisation à l'égard des problèmes, l'établissement d'un lien de confiance et de canaux de communication, la mise en commun de l'information et de l'expertise, et l'identification d'un champion (une personne ou un groupe) qui dirige le processus. En d'autres mots, les mesures d'adaptation communautaires consistent à constamment renforcer le prisme conceptuel, en accroissant la capacité d'adaptation de la communauté et en appliquant des pratiques exemplaires.

Lorsqu'on élabore des stratégies d'adaptation, il y a lieu de trouver un équilibre entre prendre les problèmes isolément et élaborer un plan exhaustif tenant compte de chaque dimension du problème. Un tel plan peut nécessiter beaucoup plus de recherche et d'organisation que ce que les communautés peuvent absorber, tout en arrivant à des changements utiles. Par ailleurs, la première option ne répond pas aux besoins de tous les intervenants, et on peut aboutir à des stratégies qui portent préjudice à d'autres situations. Chaque communauté doit trouver son propre équilibre.

Les stratégies d'adaptation doivent inclure un large éventail d'approches, allant des politiques de la législation aux options faisant intervenir les technologies et l'ingénierie. Des approches qui respectent l'environnement peuvent également être efficaces et atténuer les changements, à faible coût. De plus, en sensibilisant le public et en changeant ses valeurs et ses perspectives culturelles, on peut obtenir des résultats de manière économique.

On peut citer plusieurs exemples de mesures d'adaptation dans la zone à l'étude, notamment l'abandon des terrains vulnérables à l'érosion et aux inondations et le retrait des installations côtières. Dans bien des cas, les résidences anciennes et l'infrastructure (à l'exception de l'infrastructure liée aux ports et à la pêche) étaient situées sur des hauteurs, bien en retrait de la côte. Les chalets de peu de valeur se trouvaient le long du rivage, mais ils ne représentaient que de modestes dépenses en immobilisations. Ces dernières années, le profil d'aménagement de la région a été en partie régi par la demande du marché, les consommateurs exigeant des résidences avec vue sur la mer. L'amélioration de l'infrastructure routière a favorisé un accroissement des distances entre le travail et le domicile, permettant aux travailleurs de l'économie florissante de Moncton

de vivre près de la côte. Le profil d'aménagement qui en résulte est fort mal adapté aux conditions ambiantes: des résidences coûteuses construites le long des côtes, à des endroits où les glaces, les inondations, les ondes de tempête et l'érosion du littoral menacent leur stabilité et leur sécurité à long terme. De même, la demande de terres côtières a favorisé le remplissage et la mise en valeur des terres humides côtières, réduisant ainsi l'habitat disponible.

Les stratégies d'adaptation peuvent prendre de nombreuses formes et comprendre des volets qui agissent à différentes échelles. La politique provinciale sur l'aménagement des zones côtières se veut un cadre pour la gestion du littoral et la prise de mesures d'adaptation à l'échelle locale. La communication et la coordination des efforts entre les divers ordres de gouvernement, les dirigeants communautaires, les organismes locaux et les citoyens sont essentielles à la réussite de toute stratégie d'adaptation. Travaux d'ingénierie lourde et légère, réglementation de l'aménagement du territoire, adoption de politiques d'aménagement innovatrices, échange de terrains et accords institutionnels pour promouvoir l'échange d'idées – tous figurent parmi les options que peuvent envisager les collectivités pour réduire leurs impacts et leurs coûts futurs.

Les communautés ont besoin d'information, et veulent accéder à l'expertise. Même une page Web présentant simplement de l'information du type « qu'est-ce qui se passe si… » pourrait fournir les données voulues, favoriserait les communications et répondrait à de nombreux besoins.

Les chercheurs locaux des collèges communautaires et des universités peuvent établir un lien efficace entre les communautés qui commencent à s'organiser et les responsables gouvernementaux qui façonnent les politiques et les plans.

Pour que les stratégies d'adaptation aux changements climatiques soient véritablement efficaces, il faut que les collectivités directement touchées les « prennent en charge » et en assurent elles-mêmes la gestion. Les efforts de mobilisation à l'échelle locale nécessitent l'appui des organismes d'urbanisme et des gouvernements à tous les niveaux.

4.8.6 Références

Adger, W.N., N.W. Arnell et E.L. Tompkins, 2005. Successful adaptation to climate change across scales. Global Environmental Change 15 (2005) 77–86. (disponible en ligne) : http://www.uea.ac.uk/env/people/adgerwn/Adgeretal2005GEC.pdf (consulté le 21 novembre 2005).

Baethgen, W., Barros, V., Burton, I., Canziani, O., Downing, T.E., Klein, R.J.T., Leary, N., Malpede, D., Marengo, J.A., Mearns, L.O., Lasco, R.D. and Wandiga, S.O. 2005. A plan of action to support climate change adaptation through scientific capacity, knowledge and research. En ligne : http://www.fishclimate.ca/pdf/windsor/Plan_of_Action.pdf (consulté le 21 novembre 2005).

Chouinard, O. et Martin, G. 2006. *Adaptation aux risques associés au changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*. Rapport présenté aux Fonds en fiducie pour l'environnement du Nouveau-Brunswick. Project No. 83, Université de Moncton, mars.

Conde, C., et K. Lonsdale (2005). « Engaging Stakeholders in the Adaptation Process ». *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies and measures*. Dir. de publ. : B Lim et E. Spanger-Siegfried. Programme des Nations Unies pour le développement. Cambridge University Press, Royaume-Uni.

CPACC (Caribbean Planning for Adaptation to Global Climate Change). 1999. *Coastal vulnerability assessment for sea-level rise: Evaluation and selection methodologies for implementation* (http://www.cpacc.org/download/c6_methodology.pdf; consulté en août 2003).

Department of Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA) (2004). *Scientific and Technical Aspects of Climate Change, Including Impacts and Adaptation and Associated Costs.* Department of Environment, Food and Rural Affairs, Londres, Angleterre.

Direction de la planification durable, ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux du Nouveau-Brunswick. (2002). *Politique de protection des zones côtières du Nouveau-Brunswick*. http://www.gnb.ca/0009/0371/0002/Coastal-F.pdf

Environnement Canada (2002). « Backgrounder: Sea-Level Rise and Climate Change Impacts and Adaptation Needs on Prince Edward Island: Study Results ». http://www.atl.ec.gc.ca/press/01-09-06c_back.html, consulté en décembre 2003.

Environnement Canada (2004). Élévation du niveau de la mer au Nouveau-Brunswick – Modèles numériques d'altitude & cartes. http://atlantic-web1.ns.ec.gc.ca/slr/default.asp?lang=Fr&n=16B2BE08-1

Feenstra, J., I. Burton, J. Smith et R. Tol (1998). *Handbook on Methods for Climate Chane Impact Assessment and Adaptation Strategies*, série du Programme des Nations Unies pour l'environnement.

Gouvernement de l'Australie (2004). « Emergency management », http://www.ema.gov.au/ema/emaInternet.nsf/AllDocs/RWP0ACB42930E19FCEFCA256C4800062B66?OpenDocument, accessed March 2004.

Jallow, B., M. Barrow et Leatherman (1996) « Vulnerability of the coastal zone of The Gambia to sea level rise and development of response strategies and adaptation options ». *In* Climate Research, Vol. **6**, p. 165-177.

Lim, B., E. Spanger-Siegfried, dir. de publ. (2005). *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies and measures*. Programme des Nations Unies pour le développement. Cambridge University Press, Royaume-Uni.

Martin, G. (2005a). Notes de la session d'information de Bouctouche. 26 octobre 2005.

Martin, G. (2005b). Notes d'une session avec un groupe de discussion de Pointe-du-Chêne, novembre 2005.

Martin, G., et Tremblay, E. (2005). *Climate change adaptation strategies in Kouchibouguac National Park.* Résumé de la consulation de divers rapports et dossiers du parc (surtout documents généraux) des années 1980 à 2005.

McCarthy, J., O. Canziani, N. Leary, D. Dokken et K. White, dir. de publ. (2001). *Climate Change 2001: Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat; PNUE; OMM. http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg2/644.htm#1823

Mendis, S., S. Mills et J. Yantz (2003). « Building Community Capacity to Adapt to Climate Change in Resource-based Communities ». Préparé pour le Service canadien des forêts. 85 p.

Michaelowa, A. (2001). « Mitigation versus Adaptation: The Political Economy of Competition Between Climate Policy Strategies and the Consequences for

Developing Countries » HWWA (Das Hamburgische Welt-Wirtschafts-Archiv); document de discussion 153, Hamburg Institute of International Economics.
Morris, C. (s.d.). « Definitions in the Field of Dispute Resolution and Conflict Transformation ». [En ligne] 11 décembre 2005. http://www.peacemakers.ca/publications/ADRdefinitions.html
Nations Unies (1992). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Nations Unies.
Office of the Deputy Prime Minister (2004). *The Planning Response to Climate Change: Advice on Better Practice.* Office of the Deputy Prime Minister, Londres, Angleterre.
Panizza, V. (2002). « The WA planning approach to climate change and coastal stability ». http://www.coastal.crc.org.au/coast2coast2002/proceedings/theme3/wa-planning-approach-climate-change.pdf, consulté en décembre 2003.
Parcs Canada (1998 et 2002). Photos de Kelly's Beach.
Parcs Canada (2004). «L'intégrité écologique du parc.» *Parc national du Canada Kouchibouguac: merveilles naturelles et trésors culturels.* [En ligne] 22 décembre 2005. http://www.pc.gc.ca/pn-np/nb/kouchibouguac/natcul/natcul3_f.asp
Parcs Canada (2005). «Endroits exceptionnels: Éco-leçons tirées des parcs nationaux au Canada atlantique.» *Fiches documentaires : Parc national du Canada Kouchibouguac.* [En ligne] 22 décembre 2005. http://www.pc.gc.ca/apprendre-learn/prof/sub/eco/itm5/fi-lr1/kouch_f.asp
Pe'er. G., et U. N. Safriel (2000). « Climate Change-Israel National Report under the United Nations Framework Convention on Climate Change: Impact, Vulnerability and Adaptation ». http://www.nasa.proj.ac.il/Israel-Research/Climate_Change_Israel_National_Report.html#_Toc495168277, consulté en décembre 2003.
Perez, R. T. (2000). « Assessment of Vulnerability and Adaptation to climate change in the Philippines coastal resources sector » http://www.survas.mdx.ac.uk/pdfs/3perez.pdf, consulté en décembre 2003.
Programme des Nations Unies pour le développement (2003). « Climate change and sea level rise ». http://www.sdnp.undp.org/~eclac/SIDSPOA/climpoa.htm, consulté en août 2003.
Rijsberman, F., dir. de publ. (1999). « Conflict Management and Consensus Building for Integrated Costal Management in Latin America and the Caribbean ». Banque interaméricaine de développement, Sustainable Development Department: Washington, DC.
Ru, Y. (2001). « Web-based GIS for Costal Zone Management in New Brunswick ». Thèse de doctorat en géodésie et génie géomatique, Université du Nouveau-Brunswick, Fredericton.
Saleeemul, H., H. Reid et L. Muray (2003). « Mainstreaming Adaptation to Climate Change in Least Developed Countries (LDCS): Working Paper 1: Country by Country Vulnerability to Climate Change » http://www.iied.org/docs/climate/main_ldc_wp1.pdf, consulté en décembre 2003.
Scialabba, N., dir. de publ. (1998). « Integrated Costal Area Management and Agriculture, Forestry and Fisheries ». *FAO Guidelines*. Environment and Natural Resources Service, FAO, Rome.
Secrétariat de la CCNUCC (2003). « Proceedings of the Special Event on Coastal Adaptation Strategies ». Marrakech, Maroc, Octobre. http://www.netcoast.nl/news/coastal_adaptation_strategies.pdf, consulté en décembre 2003.

Session d'information (28 septembre 2005). Saint-Louis-de-Kent.
Session d'information (11 octobre 2005). Centre communautaire de Pointe-du-Chêne.
Session d'information (12 octobre 2005). Hôtel de ville de Cap-Pelé.
Sutherland, M., S. Ng'ang'a, M. Hutchison, K. Vodden, R. White, B. Nkwae et S. Nichols 2004. « Traditional Adaptation Strategies for Sea Level Rise: Canadian Case Studies ». Rapport pour le ministère des Pêches et des Océans du Canada.
Sutherland, M., et Nichols, S. (2004). « Adaptation and Mitigation Strategies: Storm surge and coastal flooding risks ». Rapport préparé pour le Bureau de protection de l'infrastructure essentielle et de planification d'urgence, 38 p.
UNB (Université du Nouveau-Brunswick) et UdeM (Université de Moncton) 2005. Adaptation Survey*. New Brunswick Sea Level Rise Project*.

Appendice 1: Liste de stratégies d'atténuation des catastrophes et d'adaptation aux risques d'ondes de tempête et d'inondations côtières

Adapté de Sutherland et Nichols (2004)

Adaptation, atténuation et préparation

- *Affectation des terres basses à des utilisations de moindre valeur* (*p. ex., parcs au lieu de logements, etc.)*
- *Réglementation de la construction et planification de la croissance urbaine*
- *Mesures visant à combler les lacunes dans les politiques*
- *Ouvrages côtiers : revêtements, remparts de cordon littoral, épis, talus, brise-lames, etc.*
- *Réserves littorales*
- *Politiques côtières*
- *Cartographie de la sensibilité des côtes*
- *Participation des communautés*
- *Normes de construction*
- *Élaboration d'un guide de pratiques exemplaires pour les zones côtières*
- *Création d'organismes gouvernementaux responsables de la gestion des urgences*
- *Élaboration de plans de gestion des urgences et de politiques d'atténuation locale*
- *Élaboration d'un plan de gestion des zones côtières*
- *Surélévation des structures portuaires* (*mouillages, quais) et des structures au large*
- *Surélévation des stations électriques*
- *Législation fédérale et provinciale sur la préparation des mesures d'urgence et l'atténuation*
- *Établissement d'aires de stockage et de dortoirs en zone surélevée*
- *Programmes de cartographie des zones inondables*
- *Systèmes d'avertissement en cas d'inondation*
- *Soutien financier gouvernemental aux recherches sur le développement de stratégies d'atténuation et de préparatifs en cas de catastrophe*
- *Inclusion des inondations et des ondes de tempête dans le Code du bâtiment de l'Australie* (*fait)*
- *Gestion novatrice des sables*

- *Institutionnalisation du développement des zones de mangrove*
- *Plan de gestion intégrée des zones côtières afin d'empêcher les initiatives (destructives) dans les zones côtières*
- *Lois obligeant la mise en place de systèmes de surveillance de l'océan*
- *Utilisation ciblée des terres*
- *Infrastructure de données géospatiales marines*
- *Programmes d'octroi pour les mesures d'atténuation*
- *Modification de la législation touchée*
- *Programme national d'assurance en cas d'inondation*
- *Acquisition et actualisation de données géographiques dans les régions menacées par les ondes de tempête*
- *Série de publications sur la gestion des catastrophes et autres publications destinées au secteur privé et aux communautés (y compris les enfants)*
- *Protection des entités importantes*
- *Accès public et réserves*
- *Programme d'éducation et de sensibilisation du public*
- *Relocalisation des structures à l'extérieur des zones inondables*
- *Zones de recul obligatoires (traiter les zones de servitudes publiques et les zones de recul comme des terrains séparés lors des arpentages)*
- *Cartographie de la vulnérabilité aux ondes de tempête*
- *Application stricte des lois côtières*
- *Exigence stricte de conformité aux normes du bâtiment*
- *Soutien des recherches universitaires et autres sur les facteurs de risques côtiers*
- *Utilisations durables de la côte*
- *Programmes de formation appuyant les programmes de préparation multi-services/organismes et les réponses en cas d'urgence*
- *Utilisation de matériaux de construction résistant aux inondations (matériaux hydrofuges, joints étanches, fondations robustes)*
- *Préservation des milieux humides*

4.9 Établissement d'une capacité d'adaptation

Liette Vasseur[1]*, Omer Chouinard[2], Kenel Délusca[3], Lisa Debaie[4] et Kelly Murphy[4]

[1]Université Laurentienne, 935, chemin du Lac Ramsey, Sudbury, Ontario, Canada P3E 2C6
[2]Université de Moncton, Maîtrise en études de l'environnement, 165, rue Massey, Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada E1A 3E9
[3]Université de Montréal, 4700, av. Bourret, # 203, Montréal, Québec, Canada H3W 1K8
[4]Division de la planification stratégique et des politiques, Intégration stratégique (Atlantique), Environnement Canada, 45, promenade Alderney, 16e étage, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canada B2Y 2N6

*contact avec l'auteur [courriel: lvasseur@laurentian.ca].

4.9.1 Introduction

L'intégration des facteurs socioéconomiques, en plus des sciences biophysiques, dans la gestion des écosystèmes et le processus décisionnel est généralement complexe, puisque peu de protocoles ont été établis pour aider les décideurs dans cette démarche. Très souvent, il survient des questions d'échelle spatiale et temporelle et de compatibilité des données, qui créent des obstacles difficiles à surmonter. La difficulté est encore plus grande lorsque la question du changement climatique est intégrée au processus. Dans bien des cas, on laisse de côté le changement climatique ou les facteurs socioéconomiques afin de simplifier la prise de décisions à l'égard de l'adaptation des communautés au changement climatique. Il reste qu'il existe peu d'outils pour intégrer et lier les impacts écosystémiques et les perceptions socioéconomiques dans les régions où un projet est évalué, et encore moins d'outils permettant d'ajouter la dimension prédictive du changement climatique. Ce manque d'intégration pourrait tenir aux limites des informations quant aux impacts possibles du changement climatique sur les écosystèmes et de l'éducation de la population sur ces impacts, ainsi qu'à la non-disponibilité de protocoles ou d'outils pour évaluer les perceptions socioéconomiques lorsque les autres informations seront enfin disponibles. Bien que, dans certains cas, le changement climatique ait été étudié à la lumière de données historiques, il y a eu très peu de tentatives d'intégrer au processus les données actuelles et prédictives et les enquêtes socioéconomiques. Étant donné que les consultations publiques prennent de plus en plus d'importance dans les récentes activités de gestion environnementale, il est possible d'inclure, dès les premières étapes, des protocoles visant à intégrer les perceptions socioéconomiques et les réactions écosystémiques dans un modèle de prévision des impacts du changement climatique. Cependant, les efforts menant à ces approches intégrantes qui demeurent le fondement de l'élaboration de stratégies d'adaptation pour ces communautés sont eux aussi très rares. Il y a lieu d'améliorer la compréhension globale de la façon dont la gestion de l'écosystème peut être intégrante en combinant les différentes perspectives biophysiques, climatiques et socioéconomiques. Cela pourrait se traduire par une durabilité accrue et par la prise de meilleures décisions concernant le changement climatique, dans lesquelles de futures stratégies d'adaptation pourront s'intégrer.

Le changement climatique a souvent été abordé dans les actualités au cours des dernières décennies. Avec la survenue de phénomènes météorologiques extrêmes tels

que les inondations, les sécheresses graves et les ondes de tempête, les communautés côtières sont maintenant davantage conscientes des risques potentiels du changement climatique. Des pressions croissantes sont exercées sur les gouvernements du monde entier pour les inciter à prendre des mesures pour réduire ces risques. Cependant, il semble que peu de progrès aient été réalisés, malgré les prévisions scientifiques, les protocoles internationaux et le désir d'agir de certains décideurs et de certaines organisations. Le principal défi est de savoir comment établir un rapport avec la population et surtout les communautés. L'un des buts ultimes de l'éducation environnementale est d'encourager chez les citoyens l'adoption de comportements favorables à l'environnement (Hungerford et Payton, 1976; Hewitt, 1997;); l'adoption de ces comportements non seulement par la communauté en général, mais surtout par les décideurs et les promoteurs est en effet très importante dans le contexte du changement climatique, étant donné les mesures qui devront être prises pour réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale. Cependant, il reste à savoir dans quelle mesure l'éducation peut entraîner une modification du comportement. Les comportements et les habitudes, comme l'utilisation intensive de la voiture, des emballages, des articles jetables, de l'électricité, sont bien ancrés dans les modes de vie contemporains. Ces comportements demeurent dans le domaine de l'atténuation. Mais peuvent-ils se convertir en stratégies d'adaptation? Enfin, de quelle façon, par l'intermédiaire de ces approches et d'autres, pouvons-nous disposer de meilleurs outils décisionnels afin que les décideurs et les planificateurs puissent prendre en compte non seulement les stratégies d'atténuation, mais également les stratégies d'adaptation à l'échelle communautaire? Ce sont là les questions auxquelles il faudra répondre pour y parvenir à court terme tout en mettant dans la balance la question du développement durable de ces communautés.

Dans cette section, nous décrivons une approche et un cadre théorique qui tentent d'atteindre une certaine compréhension de la question du changement climatique pour la communauté et son processus décisionnel. Par la planification et l'utilisation de l'approche écosystémique, je veux rendre les liens clairs et utilisables. À l'aide d'études de cas, je vais examiner les résultats possibles pour deux communautés. Une telle approche peut mener à élaborer un système d'applications pour la prise de décisions et la gestion des écosystèmes dans un contexte de stratégies d'adaptation et d'atténuation des changements climatiques. La section est donc divisée en trois parties : 1) la question des impacts et de l'adaptation au changement climatique; 2) l'importance d'associer les composantes socioéconomiques et biophysiques à la gestion écosystémique et 3) la discussion de ces liens dans un contexte de prise de décisions, de planification et de gestion écosystémique. Ce dernier point devrait examiner dans quels secteurs le contrôle et l'adaptation peuvent être appliqués pour soutenir le système. Le cadre théorique établi ici a été conçu en fonction de deux communautés dans lesquelles un projet de recherche avait été lancé afin de développer ces différentes composantes de la prise de décisions et de la gestion écosystémique face au changement climatique.

Puisque l'environnement économique actuel a tendance à pousser les décideurs et les promoteurs à agir relativement vite face aux questions environnementales, souvent en réduisant ou en évitant tout contact avec le public, il devient essentiel d'analyser quels éléments peuvent être nécessaires pour étudier les impacts et l'adaptation au changement climatique. L'importance de la contribution du public au processus décisionnel est déjà reconnue dans la plupart des pays industrialisés. En Europe, la

participation du public est devenue importante, et de nombreux arguments sont avancés pour aider à améliorer une telle approche (Johnson et Dagg, 2003). Par exemple, le dixième principe de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement encourage la contribution du public et, comme Johnson et Dagg (2003) le signalent, la Directive du conseil européen (85/337/EC modifiée par la directive 97/11/EC) encourage la participation du public, qui peut cependant varier selon la nature du projet. Face aux changements climatiques, on peut adopter des attitudes similaires. Cependant, sans une meilleure appréciation du besoin de considérations sociales, cette déclaration pourrait être difficile à justifier. C'est pourquoi une analyse approfondie des impacts du changement climatique sur les communautés peut aider à comprendre les liens entre le savoir, la participation du public et l'évaluation intégrée de l'environnement. Il s'agit là de l'objectif principal de ce chapitre, soit de relier le savoir et la compréhension des communautés à l'utilisation potentielle de stratégies d'adaptation pour maintenir leur subsistance.

Au Canada atlantique, où la plupart des communautés (60 %) et de leurs activités sont situées dans la zone côtière (zone de 50 km), il y a lieu de mieux comprendre comment le changement climatique influera sur le développement économique à venir (MEGLNB, 1998). Les écosystèmes côtiers, surtout la côte atlantique, se sont révélés très sensibles à l'élévation du niveau de la mer et à d'autres phénomènes tels que les ondes de tempête entraînés par le changement climatique (aperçu publié par la Commission géologique du Canada [CGC], 1998, bulletin 505).

L'objectif global est d'élaborer et de mettre en œuvre un cadre intégré pour examiner des stratégies d'adaptation en fonction de l'écosystème entier, et d'élaborer un protocole directeur (comprenant des aspects écologiques et sociaux) pour évaluer, lors du développement d'un projet, les impacts de l'activité humaine sur les écosystèmes côtiers dans un scénario de changement climatique. Plus particulièrement, le projet visait d'abord à quantifier les impacts potentiels du changement climatique, et plus précisément l'élévation du niveau de la mer, les ondes de tempête et l'erosion des côtes, sur deux communautés ciblées de la côte du golfe Saint-Laurent, dans le sud-est du Nouveau-Brunswick. Ensuite, le projet évaluait les impacts potentiels du changement climatique sur les nouvelles activités humaines en prenant en compte les perceptions sociales et les caractéristiques des écosystèmes. Enfin, les données provenant de ces différentes sources sont intégrées afin de montrer qu'il faut disposer de stratégies d'adaptation et de protocoles directeurs qui pourraient être utilisés pour aider les décideurs à examiner les impacts potentiels du changement climatique dans le développement d'un projet.

L'étude cible donc deux communautés du sud du golfe Saint-Laurent au Nouveau-Brunswick : Bouctouche et Shediac. Ces communautés ont été choisies pour les raisons suivantes : 1) elles sont d'un très grand intérêt scientifique et constituent une importante priorité pour les gouvernements et les intervenants des zones côtières; 2) on y a réalisé un autre projet concernant l'évaluation des changements climatiques (projet de l'Agence canadienne d'évaluation environnementale [ACEE] sur les aspects sociaux de l'évaluation des changements climatiques), dont les résultats viennent compléter le présent projet, et 3) la côte du golfe du Nouveau-Brunswick subit des pressions croissantes en raison de l'accélération du développement côtier et, en même temps, elle est importante pour la durabilité de l'écosystème (pêche, développement de l'aquaculture et tourisme). Les résultats de cette section sont basés sur les données et les

renseignements recueillis dans les autres composantes de ce rapport et on a tiré profit des données acquises de certaines de ces composantes afin de pouvoir établir de meilleurs liens entre, d'une part, les questions d'évaluation, d'écologie et de socioéconomie et, d'autre part, le changement climatique.

Cette section intègre les renseignements recueillis en matière d'impacts et d'adaptation au changement climatique, et elle examine ces différents aspects dans le développement de projets comme les activités touristiques (Bouctouche) et comme le développement urbain et résidentiel et les activités économiques liées à l'écosystème côtier (Shediac/Pointe-du-Chêne). La section méthodologique explique les différentes composantes étudiées afin de : 1) recueillir des données sur des scénarios possibles de changement climatique et sur les principales vulnérabilités des communautés; 2) intégrer les renseignements dans un modèle altimétrique numérique géoréférencé précis; 3) superposer les données précédentes aux activités actuelles des communautés et 4) relier les données aux renseignements qui ont été recueillis lors des ateliers, des groupes de discussion et des séances de consultation publique dans la communauté. À partir de cette intégration, pour chaque cas, on présentera d'abord les résultats; la dernière section résumera les informations sur les vulnérabilités et définira ensuite l'adaptation. Dans la dernière partie, les leçons retenues et les facteurs limitatifs d'une telle approche seront également exposés.

4.9.2 Cadre méthodologique théorique utilisé pour visualiser les issues possibles en termes d'impacts, de vulnérabilité, de mesures d'adaptation et de capacité d'adaptation

On présente ici le cadre méthodologique théorique utilisé dans ces études de cas. Il faut se rappeler que, dans la présente étude, l'acquisition de données a été réalisée avec plus de précision que ce n'est généralement le cas dans les études sur l'adaptation et les impacts du changement climatique. La plupart du temps, les composantes et MAN pourraient être remplacées par l'acquisition de données provenant de la documentation et des scénarios de changement climatique déjà disponibles pour les régions étudiées. Bien que cette approche soit un peu plus limitée, elle donne tout de même une perspective approximative des impacts du changement climatique dans une région spécifique et peut aider à élaborer des stratégies d'adaptation. Idéalement, on ferait une réduction d'échelle, mais il est évident que la plupart des études ne peuvent se permettre une telle technique. L'analyse écosystémique, qui comprend les établissements humains, peut être réalisée plus rapidement en se procurant des cartes foncières ou cadastrales et topographiques, et en les superposant à des scénarios acquis de changement climatique. L'approche consiste soit à utiliser la modélisation sur SIG pour cette intégration (comme ici), soit à superposer manuellement les cartes et les scénarios (s'ils sont à la même échelle) afin d'avoir une idée concrète de la zone dans laquelle le changement climatique pourrait avoir un impact sur les communautés. L'étape d'analyse des considérations sociales devrait être réalisée en même temps que l'acquisition des données sur le changement climatique. Cette composante, expliquée dans la dernière partie de la méthodologie, aidera à relier les données provenant des deux étapes précédentes de la méthodologie. L'intégration des résultats de l'analyse des perceptions sociales à l'évaluation de la vulnérabilité et aux mesures d'adaptation sera abordée dans les parties concernant la discussion et les résultats.

4.9.2.1 Étude de cas

4.9.2.1.1 Bouctouche

Bouctouche est un petit village où l'écotourisme est devenu avec le temps, l'une des plus importantes industries. Parmi les attractions, le Pays de la Sagouine, le Yacht Club et la Dune de Bouctouche sont les principales infrastructures touristiques situées sur la côte ou dans la baie de Bouctouche, qui sont le plus à risque. La dune comprend l'Éco-centre Irving, établi par J.D. Irving Limited pour préserver et restaurer l'une des quelques dunes non encore exploitées de la côte nord-est de l'Amérique du Nord. Située sur le bord du détroit de Northumberland, en face de l'Île-du-Prince-Édouard, cette dune de sable blanc s'étend sur douze kilomètres d'un bout à l'autre de la baie de Bouctouche. La zone, importante sur le plan environnemental, est un habitat pour une grande diversité d'animaux et de végétaux marins et aquatiques, et d'oiseaux migrateurs et de rivage. Par exemple, on y trouve certaines espèces considérées comme rares ou endémiques aux échelles provinciale ou fédérale, telles que l'aster du Saint-Laurent et le Pluvier siffleur. Dans ces deux cas, des recherches ont été entreprises pour comprendre leur degré de sensibilité aux changements environnementaux et évaluer leur potentiel de survie à long terme. Le village de Bouctouche représente également un environnement très fragile mais intéressant, dans lequel le changement climatique, surtout les ondes de tempête, peut avoir des conséquences désastreuses pour le bien-être et l'économie de la communauté.

Au cours des dernières années, plusieurs zones de l'écosystème de la dune ont fait l'objet de projets de recherche, de relevés de populations à l'analyse de données de télédétection. Les dommages causés par la tempête d'octobre 2000 ont été assez graves pour modifier plusieurs des composantes de l'écosystème et de l'infrastructure touristique en place. Lors de tempêtes extrêmes, certaines rues et sous-sols de Bouctouche peuvent rapidement être inondés. Ces problèmes, qui sont survenus en différentes occasions dans les dernières années (p. ex. l'ouragan Gustav en 2002 et la tempête du lendemain de Noël 2004), sont de plus en plus préoccupants pour les citoyens qui exploitent des installations touristiques ou possèdent des maisons et des chalets sur la côte.

4.9.2.1.2 Shediac (Pointe-du-Chêne)

La communauté de Pointe-du-Chêne, située entre 46° 00' et 46° 30' de latitude nord et 64° 30' et 65° 00' de longitude ouest (figure 1), est entourée par le détroit de Northumberland au nord-nord-est, le village de Scoudouc au sud, Cap-Pelé à l'est et la ville de Moncton à l'ouest. Cette communauté en croissance rapide faisait auparavant partie de Shediac. Ses bassins hydrographiques comprennent les rivières Shediac et Scoudouc. La topographie de la région est caractéristique des plaines des Maritimes avec ses terres de basse altitude, de tout temps utilisées pour l'agriculture. Depuis longtemps, on y trouve les chalets de résidents de plus grandes villes, comme Moncton, Fredericton et Halifax. Cependant, depuis 50 ans, en raison de la croissance rapide du Grand Moncton, la construction résidentielle et les lotissements sont devenus la norme, la plupart étant situés près de la côte ou sur d'anciens marais salés. Les projets de construction ont exercé une pression supplémentaire sur la communauté qui a dû accroître son infrastructure municipale, mais les maisons ne sont pas encore toutes reliées de façon appropriée à un système efficace. La croissance démographique à Pointe-du-Chêne a atteint 2,8 % entre 1996 et 2001, soit une densité actuelle de 21,5

h/km^2, ce qui dépasse de beaucoup la moyenne provinciale de 10,2 h/km^2 (Statistique Canada, 2001). La communauté touristique de Pointe-du-Chêne possède également l'une des plages les plus fréquentées de la région de l'Atlantique, la plage Parlee, qui attire un grand nombre de visiteurs, surtout de la mi-juillet à la fin d'août, et joue un rôle important dans l'économie de la communauté. Cependant, sa gestion et le nombre actuel de touristes pourraient compromettre la viabilité de cette plage, qui doit être engraissée chaque année de plusieurs milliers de tonnes de sable.

4.9.2.1.3 Acquisition de données LIDAR et MAN

Les données LiDAR ont été fournies par le Centre of Geographic Sciences (COGS), se composant de fichiers texte ASCII divisés en points terrestres et en points non terrestres. En tout, il y a 80 segments de données LIDAR couvrant environ 165 500 km^2 et plus de 45 millions de points.

Les données brutes ont été importées vers le logiciel ArcGIS d'ESRI version 9.0 et des points ont été générés à partir des données brutes. La couverture ponctuelle LIDAR est ensuite utilisée pour interpoler les plages des grilles 3D. Les points terrestres ont été utilisés pour générer des MAN terrestres réels de la plage à utiliser pour simuler une inondation. Les points terrestres ont été combinés aux points non terrestres afin de générer des surfaces numériques contenant toutes les caractéristiques. Les plages des grilles ont ensuite été combinées pour former de plus grandes grilles, chacune représentant l'une des zones à l'étude. Les niveaux d'inondation ont été calculés à partir des données sur le niveau d'eau fournies par Ritchie, Thompson, Parkes et Forbes (voir chapitres 4.3 et 4.4 de ce rapport). Les données fournies représentaient les niveaux au-dessus du zéro des cartes et ont dû être converties en hauteurs orthométriques pour chaque région. Trois niveaux ont été fournis : 2,55 mètres au-dessus du zéro des cartes, qui représente la meilleure estimation de la ligne des hautes eaux pour l'onde de tempête de janvier 2000, 3,05 et 3,55 mètres au-dessus du zéro des cartes, qui représentent les cas extrêmes. Ces couches ont ensuite été utilisées pour inonder les MAN afin de fournir des plages matricielles inondées ou non. On a recherché dans les couches la connectivité avec l'océan afin de s'assurer que les zones basses non reliées à l'océan étaient inondées. Une carte de profondeur d'inondation a été générée afin d'accompagner la carte d'étendue pour l'onde de tempête de janvier 2000 et le niveau prévu à récurrence de 100 ans.

4.9.2.1.4 Analyse des écosystèmes

Les deux communautés présentent des écosystèmes différents. Alors qu'à Bouctouche la majeure partie de l'écosystème est composé de dunes et de zones protégées contrôlées, l'étude de cas de Shediac (Pointe-du-Chêne) concernait principalement des établissements humains, surtout des constructions résidentielles le long de la côte. La Dune de Bouctouche est un attribut dominant du village de Bouctouche et une composante très importante des activités écotouristiques de la région. Chaque année, la Dune de Bouctouche et l'Éco-centre Irving attirent plusieurs milliers de visiteurs qui viennent pour le paysage et l'écosystème, les marches éducatives et d'interprétation, la plage et les activités de randonnée pédestre ou d'observation d'oiseaux. Par le passé, l'écosystème a été soumis à un certain stress causé par les utilisations et modes de vie traditionnels de 30 à 45 familles de pêcheurs. Avec l'augmentation du passage de VTT et des autres types de stress, l'écosystème s'est progressivement dégradé et a subi davantage de pressions. Progressivement, par l'intermédiaire de consultations et grâce

au soutien de la famille Irving, la dune est devenue une zone protégée dans laquelle ne sont permises que la recherche et les activités de loisirs telles que l'observation d'oiseaux et la randonnée pédestre. Ces initiatives de conservation ont aidé à protéger au cours de la dernière décennie cet écosystème fragile, qui s'étend sur douze kilomètres de longueur et comprend une passerelle de deux kilomètres. Le nombre quotidien de visiteurs est présentement limité à environ 2 000 afin de réduire l'empreinte de l'homme sur l'écosystème.

En 2000, la région du sud-est du Nouveau-Brunswick a été touchée par deux très fortes tempêtes qui ont poussé les communautés, les décideurs et les scientifiques à vouloir comprendre les impacts potentiels et les mesures d'adaptation qu'il faudrait progressivement mettre en œuvre pour assurer la durabilité des communautés et des écosystèmes naturels. Ces tempêtes ont eu des impacts majeurs sur cet écosystème naturel et mené à la perte de 24 000 m^3 de sable des plages (Giangioppi, 2004). De plus, des brèches et des débordements se sont produits à plusieurs endroits le long de la flèche. Quelques diapositives ont aidé à expliquer les changements que les ondes de tempête, telles que celles de janvier et d'octobre 2000 et de septembre 2002, ont infligés à certaines zones de la dune au cours des dernières années. Il est clair d'après les photos prises en juillet 1999 et en mai 2004 que, dans certaines zones de la dune, comme les 100 premiers mètres à partir de l'Éco-centre Irving, le degré d'érosion a été plus important que prévu, ce qui signifie que, à de nombreux endroits du système dunaire, il existe des points de rupture potentiels qui pourraient céder sous l'effet d'une autre forte onde de tempête. Parallèlement, plusieurs sections du système dunaire ont vu leur accumulation de sable diminuer non seulement en largeur, mais également en hauteur, ce qui mène à l'aplanissement du système.

Ces observations ont été confirmées par des gens qui ont grandi dans la région et qui ont observé des changements dans la dune. De plus, l'intégration de la carte d'utilisation du territoire en 1975 à la carte MAN LIDAR indique qu'il y a eu érosion et que celle-ci n'est ni constante ni similaire sur la longueur du système dunaire, même si la carte de 1975 est beaucoup moins précise que la carte MAN LIDAR. Par exemple, à la figure 2, la différence entre les lignes de 1975 et celles de 2003 indique que le système dunaire a non seulement bougé, mais aussi qu'il a perdu de sa largeur dans nombre de sections, ce qui pourrait faire fragmenter la dune en îles (figure 1). Les changements de largeur des plages de sable auront des impacts importants sur les habitudes de nidification de certaines espèces d'oiseaux, comme le Pluvier siffleur. De plus, on a observé avec le temps que la dune avait perdu un peu de sa hauteur sous l'effet des fréquentes tempêtes. Cet impact a influé sur la survie d'autres espèces en péril telles que l'aster du Saint-Laurent, et continuera à le faire. La fragmentation du système dunaire en îles pourrait entraîner une réduction du flux génétique et de la migration des espèces vers d'autres habitats, et cette situation pourrait être grave pour la survie des espèces en péril.

L'étude de cas de Pointe-du-Chêne-Shediac entreprise dans ce projet concerne l'impact du changement climatique sur l'infrastructure des zones côtières, y compris la construction résidentielle et les autres aménagements. Comme on l'a expliqué précédemment, les pressions sur terres côtières ont considérablement augmenté ces dernières années avec l'établissement de nouvelles zones résidentielles. L'infrastructure proche de la côte est dense et fait pression sur les écosystèmes naturels qui protègent habituellement les habitats contre les ondes de tempête et les inondations. Les terres

basses sont davantage à risque; or, c'est la zone la plus intensivement utilisée par la communauté, comme en témoigne la croissance économique et démographique qu'on y observe.

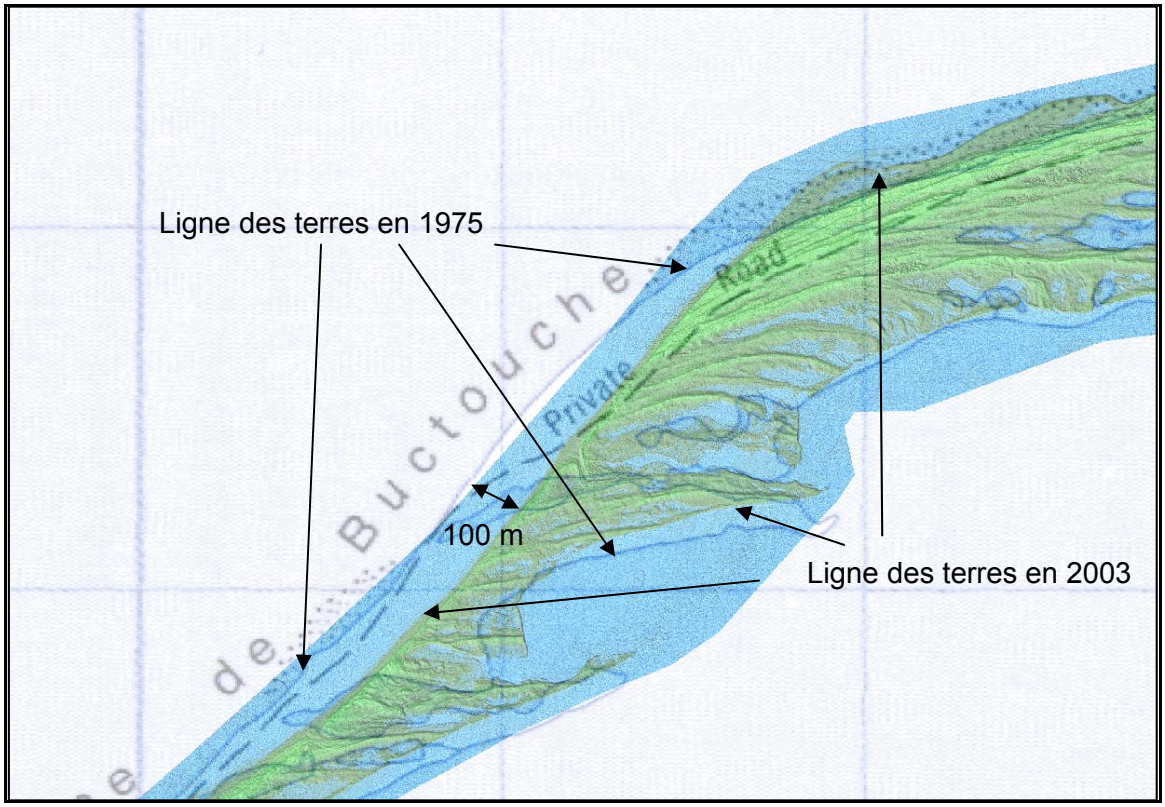


Figure 1. Partie du système dunaire de la Dune de Bouctouche et changements survenus entre 1975 et 2003. Dans certains cas, on peut voir des points de rupture potentiels sur la dune, qui pourraient céder sous l'effet de tempêtes à venir, étant donné l'affaiblissement du système dans les dernières décennies.

La figure 2 résume le degré d'intégration sur lequel le cadre d'analyse se fonde pour la composante d'intégration à Shediac. Ce diagramme décrit la façon dont les informations précédentes, qui prenaient les données de 1975 sur l'utilisation du territoire, sont comparées aux données LIDAR actuelles pour évaluer les changements passés. Ensuite, à l'aide des données actuelles et des différentes prévisions (les scénarios pessimiste et optimiste décrits dans l'évaluation socioéconomique), les changements possibles peuvent être évalués pour l'avenir selon la façon dont les communautés réagiraient au changement climatique. En observant les différences entre les différents scénarios et les scénarios actuels utilisant les données LIDAR, il est possible d'estimer les réactions des communautés au changement climatique futur. Par exemple, les figures 3a et 3b montrent les changements des taux d'occupation dans la région côtière de Shediac entre 1975 et 2003. Les zones colorées révèlent la croissance des pressions exercées par l'infrastructure sur les zones côtières.

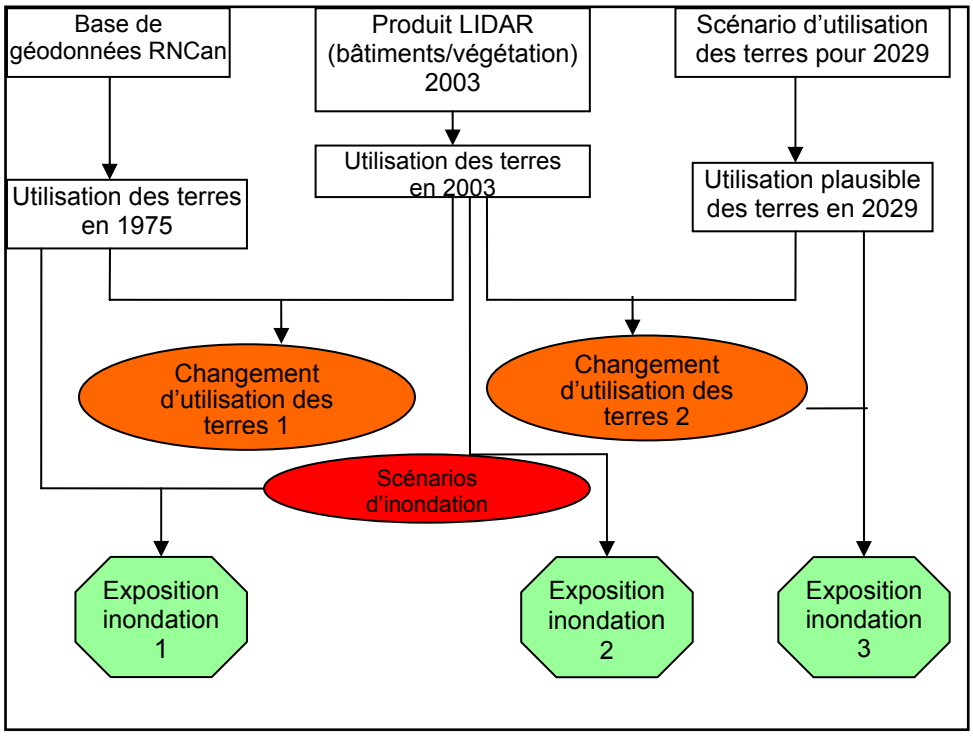


Figure 2. Diagramme du cadre analytique utilisé pour examiner les changements de l'utilisation des terres et les impacts possibles du changement climatique à Shediac pour 1975, 2003 et 2029.

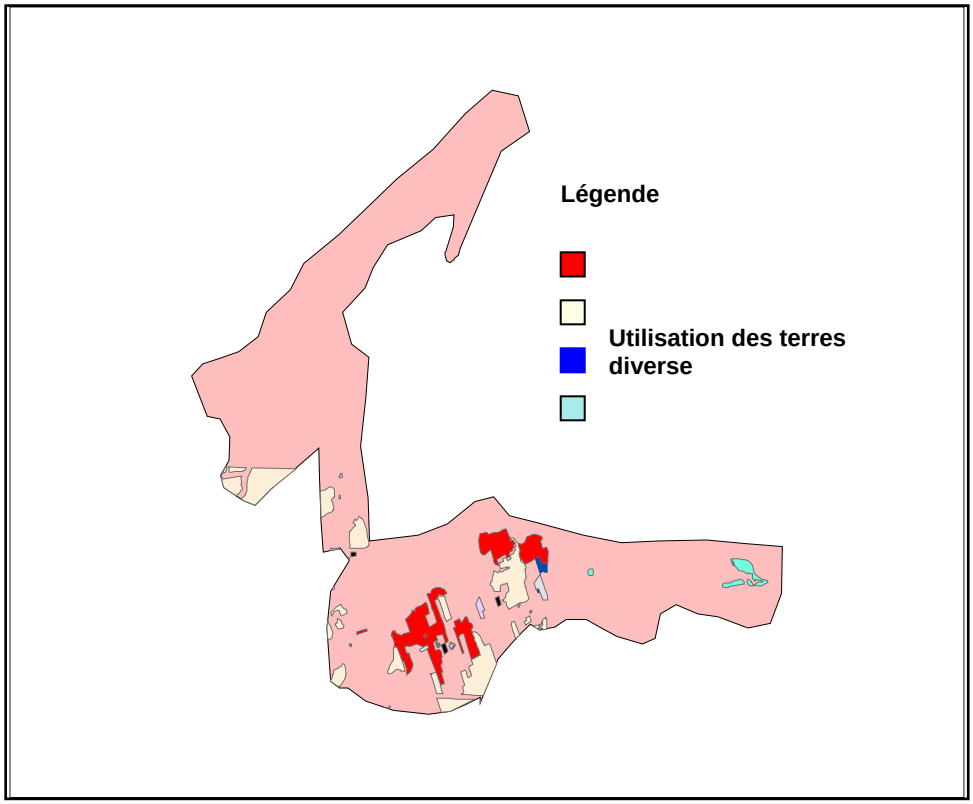


Figure 3a. Utilisation des terres dans la région de Shediac en 1975.

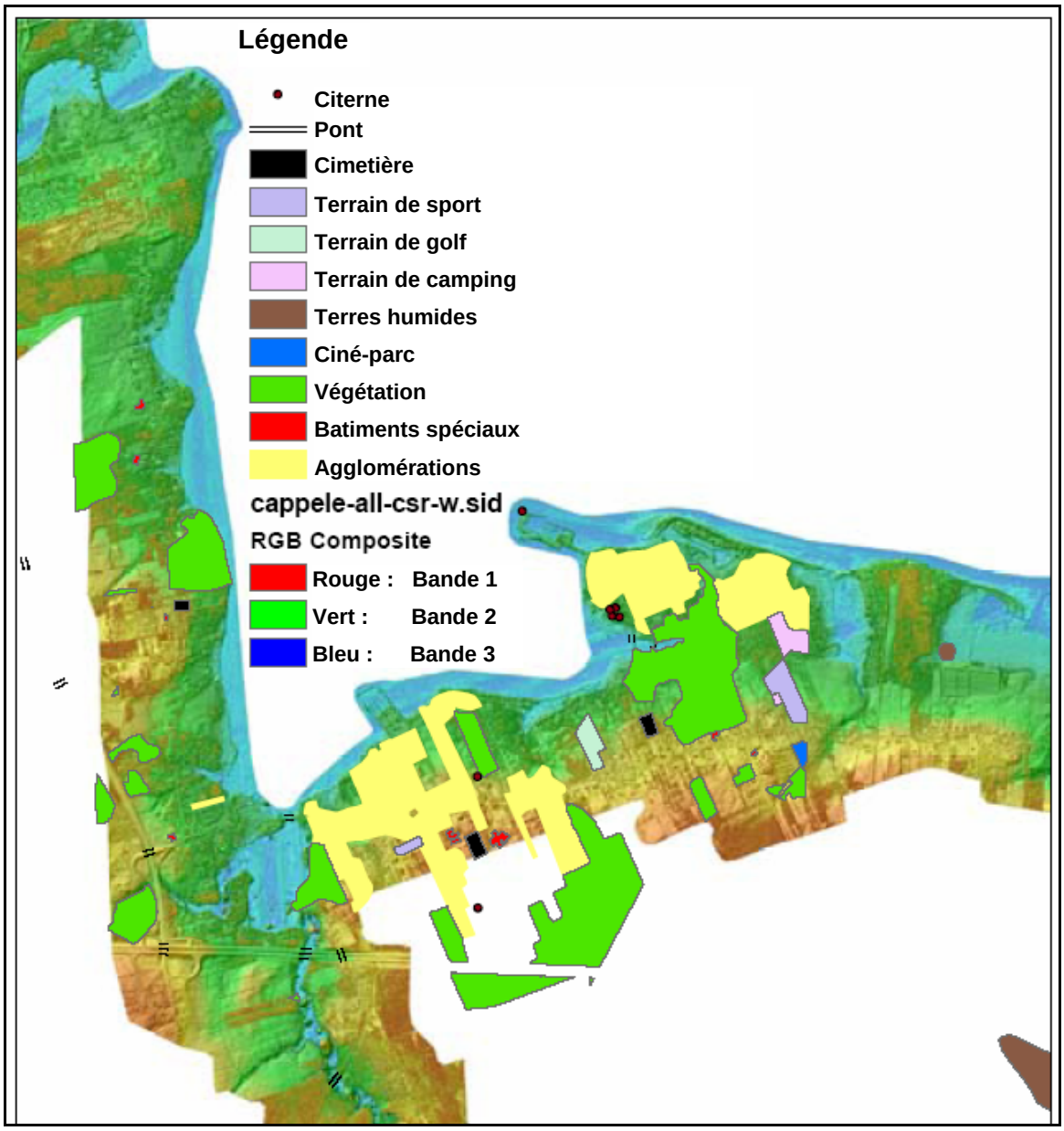


Figure 3b. Utilisation des terres dans la région de Shediac en 2003 intégrée avec la base de données 1975 et le MAN LiDAR de 2003.

4.9.2.1.5 Consultation des communautés

La méthodologie de ces études de cas a cherché à relier l'évaluation traditionnelle des changements climatiques aux intervenants des communautés et aux attributs de celles-ci tels que la stabilité et le bien-être (Mendis *et al*., 2003). Pour tous les êtres humains, la stabilité reflète généralement la sécurité, la durabilité future et le maintien de la position socioéconomique. Pour les industries, elle se reflète dans la continuité de la productivité et permet aux gestionnaires et au personnel d'en profiter à long terme, en préservant les emplois et en maintenant la production (Bowles, 1992). Par contre, le bien-être est un concept plus complexe qui concerne la façon dont le système permet à une personne de s'épanouir sur les plans mental, physique, culturel, social et psychologique (Prescott-

Allen, 2001). Il est également lié à la stabilité. Par exemple, si une sécheresse provoque l'arrêt des activités de l'industrie forestière pendant deux semaines (comme cela a été le cas en 1999 en Nouvelle-Écosse), les employés pourraient être inquiets et affectés psychologiquement par cette décision, qui abaisse non seulement la stabilité de l'industrie et de l'emploi, mais également le bien-être psychologique et mental des employés. Comme Nadeau (2002) l'a expliqué, comprendre le bien-être d'une communauté peut aider à comprendre sa capacité de s'adapter au changement mieux que ne le feraient les mesures traditionnelles de la seule capacité. La capacité d'une communauté à s'adapter est son aptitude à utiliser les ressources et les structures pour réagir à des changements de facteurs internes et externes et à profiter des occasions qui satisfont les besoins de tous les membres de la communauté pour les générations présentes et futures (Kusel, 1996). De plus, en comprenant le bien-être, il est possible d'évaluer l'opposition ou la volonté collectives à prévoir et à s'adapter de façon proactive. L'étude menée dans les deux communautés s'est fondée sur les liens qui existaient déjà entre tous les intervenants de la communauté, y compris les universités, le secteur privé et l'industrie, les organisations non-gouvernementales (ONG), les gouvernements municipaux, provinciaux et fédéral, et les citoyens, femmes, hommes et jeunes. La composante relative aux considérations sociales comprenait deux volets : 1) évaluer la compréhension et la vulnérabilité de la communauté en matière de changement climatique par l'intermédiaire de groupes de discussion et 2) évaluer, pour les différents groupes de la communauté (p. ex. industries, ONG, planification et processus décisionnel municipal, mesures d'urgence, etc.), les mesures potentielles permettant de réduire les impacts du changement climatique lors du développement de projets.

4.9.2.1.6 Évaluation de la compréhension qu'a la communauté du changement climatique et de la vulnérabilité

Si on ne sait pas comment la communauté perçoit et comprend le concept du changement climatique, la planification et le processus décisionnel ainsi que toute mesure d'adaptation vont être difficiles à mettre en œuvre en raison de l'opposition de la population. La conservation dans l'utilisation des ressources est une stratégie d'adaptation exigeant un changement de comportement qui pousse souvent le public à se demander pourquoi il devrait changer puisque la question est mondiale et que sa part individuelle est si petite. Selon lui, le gouvernement devrait en prendre la responsabilité. Cette réaction montre bien qu'il faut mieux comprendre la position de tous les types d'intervenants pour rendre les mesures d'adaptation au changement climatique plus socialement acceptables.

Il existe plusieurs approches pour évaluer la compréhension et la vulnérabilité de la communauté face au changement climatique. Dans ce projet, on utilisera une combinaison de plusieurs approches qualitatives et quantitatives. D'abord, les activités de collecte des données comprenaient des entrevues avec différents groupes d'intervenants de la communauté et des groupes de discussion afin de mieux vérifier et de mieux recouper certains renseignements. Pour les entrevues, une approche « boule de neige » a été utilisée jusqu'à saturation. Les questions portaient sur les perceptions du changement climatique et les réactions de la population à ses impacts. Pour le grand public et les gros groupes de discussion composés d'intervenants, des personnes ont été invitées au hasard. Des questions sur la perception du risque, le degré de compréhension des impacts du changement climatique, les zones de vulnérabilité qu'ils jugent importantes et leur degré de compréhension de leur propre capacité ont été

posées à tous les participants. Les entrevues, semi-structurées, ont fait ressortir des mesures actuellement mises en place par la population pour réduire les risques ou s'adapter au changement climatique. Toutes les entrevues ont été réalisées sous la supervision de O. Chouinard avec la participation de M. Tremblay et de K. Délusca après avoir reçu le consentement des participants et l'approbation du Comité d'éthique de la recherche de l'Université de Moncton.

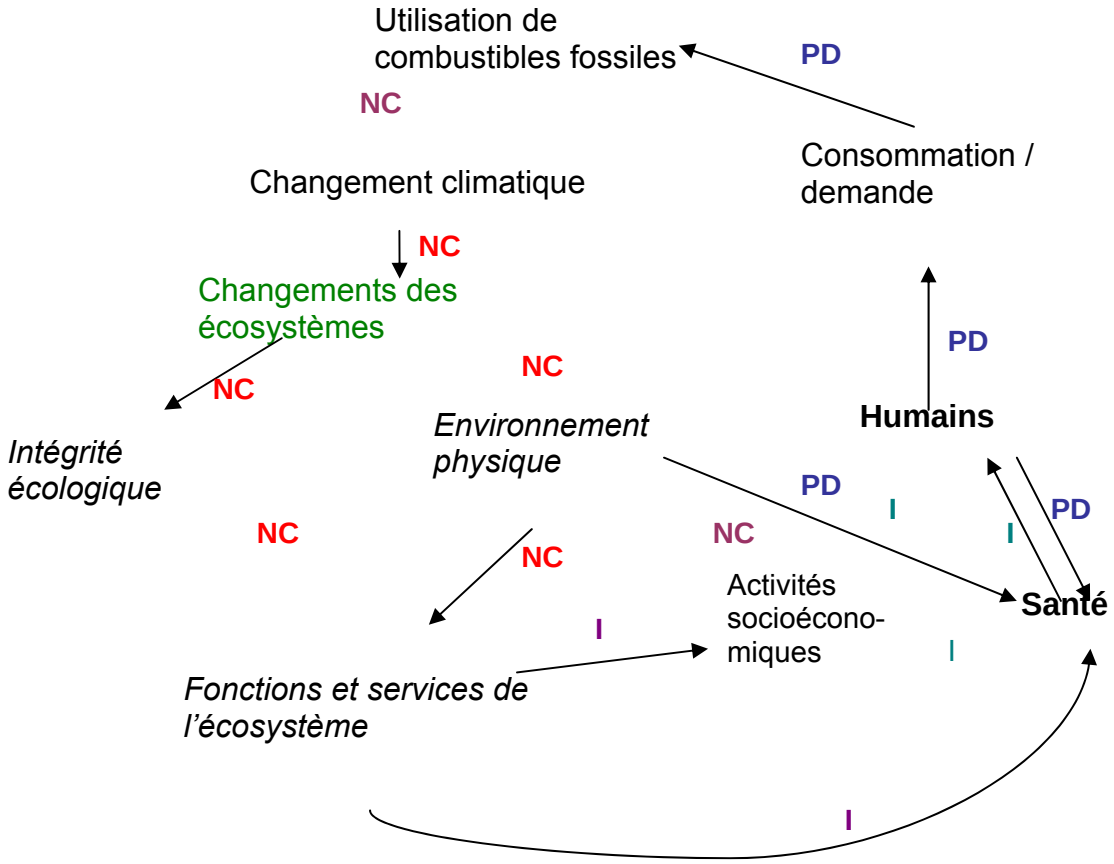
Les entrevues ont été transcrites à l'aide du logiciel Atlas-Ti de l'analyse thématique (Paille, 1996). Ce type d'analyse qualitative fait ressortir les principaux facteurs ou questions soulevés par les personnes interrogées. L'analyse thématique comprenait deux étapes, thème et interprétation, afin de souligner les problèmes et les types d'action et de réaction de la population face à ces problèmes. Les entrevues se poursuivaient jusqu'à la saturation des réponses possibles et jusqu'à ce qu'aucune nouvelle idée sur les impacts du changement climatique ne soit plus proposée. Les données ont ensuite été interprétées afin de mieux comprendre quels éléments pourraient être intégrés pour mieux prendre en compte les dimensions sociales du changement climatique dans une évaluation des impacts environnementaux (EIE), surtout lors des phases de la prise de décisions et de la planification.

En résumé, des présentations publiques, des entrevues, des groupes de discussion et des réunions ont été organisés en 2003 et en 2004 pour discuter en détail des perceptions et des réactions des participants face aux impacts du changement climatique et de la façon dont celui-ci, dans les scénarios optimiste et pessimiste de développement, pourrait avoir un impact et causer des dommages à l'infrastructure et à l'écosystème de la région.

4.9.2.1.7 Intégration

L'analyse de vulnérabilité peut être définie comme l'avant-dernière étape entre l'évaluation des impacts du changement climatique et la définition des mesures d'adaptation. L'évaluation de la vulnérabilité est souvent considérée comme l'inverse de l'évaluation des impacts puisque l'écosystème et sa communauté sont examinés sous l'angle de leur résistance potentielle aux impacts du changement climatique plutôt que des impacts eux-mêmes, ce qui signifie que la vulnérabilité est une propriété de l'écosystème qui intégrera la notion d'exposition au changement climatique et la capacité d'adaptation du système (soit le potentiel du système à réagir aux changements de façon durable) (Smit et Pilifosova, 2001). Avec cette définition, il est clair que la vulnérabilité et la capacité d'adaptation sont deux concepts qui se définissent à l'échelle de la communauté ou de l'écosystème. Chaque système étant différent, tant dans son environnement naturel que dans sa communauté (activités socioéconomiques et structure sociale), il faut s'attendre à ce que les niveaux de vulnérabilité et de capacité d'adaptation des présentes études de cas varient grandement. Dans un écosystème naturel, la capacité d'adaptation dépend des composantes environnementales et biologiques et de leur capacité à résister ou à réagir au changement; dans une communauté humaine, par contre, elle dépend de l'efficacité du système social et de la marge de flexibilité disponible pour modifier l'infrastructure afin de réagir aux changements (Adger, 2003). La figure 4 décrit les composantes du système qui peuvent être influencées par le changement climatique, celles que les communautés peuvent ou non contrôler et dans quels domaines on peut prendre des décisions concernant des mesures d'adaptation. Il est clair que les humains n'auront aucun contrôle direct sur les

changements de l'environnement physique naturel et que seule la prise de décisions concernant l'infrastructure humaine permettra de mettre en œuvre des mesures d'adaptation. C'est pourquoi la plupart des mesures d'adaptation seront liées à deux facteurs principaux: les attitudes sociales et l'infrastructure. Alors que les attitudes sociales concernent la population et la société, l'infrastructure est régie par la prise de décisions à l'échelle communautaire.



PD : prise de décision
NC : non contrôlable, mais possibilité d'adaptation
NC : non contrôlable et pas d'adaptation, sauf par le système
I : influence et possibilité de contrôle
I : influence et possibilité d'adaptation

Figure 4. Cadre théorique des liens entre les divers éléments de l'écosystème, et degré de contrôle ou d'adaptation qui peut être atteint par les communautés humaines présentes dans l'écosystème.

Les niveaux supérieurs du processus décisionnel, tels que les gouvernements provinciaux et fédéral, peuvent également influer sur ce qui se passera à l'échelle de la communauté mais, sans une très bonne compréhension de l'influence des intervenants

dans la communauté, les mesures d'adaptation ne peuvent être réellement acceptées et mises en œuvre. Les promoteurs recherchant un profit à court terme sans que soit effectuée une évaluation environnementale à long terme intégrant les impacts du changement climatique et la vulnérabilité continueront à nuire à la capacité d'adaptation de la communauté et à rendre le système plus vulnérable aux impacts du changement climatique. L'équilibre ne peut être atteint que lorsque tous les aspects, des facteurs biophysiques aux facteurs socioéconomiques, seront intégrés et que la vulnérabilité et la capacité d'adaptation seront correctement évaluées. Ces composantes seront abordées dans la dernière partie de cette section.

4.9.3 Résultats et discussions

4.9.3.1 Étude de cas de la Dune de Bouctouche et du village de Bouctouche

4.9.3.1.1 Types d'impacts liés au changement climatique

L'élévation du niveau de la mer est l'un des principaux problèmes qui inquiètent le public en ce qui concerne les impacts négatifs du changement climatique. Comme on l'a vu dans bien d'autres régions, les inondations deviendront plus fréquentes et plus courantes, ce qui limitera la possibilité d'investir dans des projets à long terme directement sur la côte (Nicholls, 2002). L'augmentation du nombre d'ondes de tempête et autres phénomènes extrêmes exacerbera les changements qui se produisent déjà avec l'élévation du niveau de la mer. Les ondes de tempête sont fréquentes dans cette région de l'Atlantique (Danard *et al.*, 2003; A. Robichaud, 2004, comm. pers.). L'erosion des côtes est l'une des plus importantes conséquences qui a été observée et à laquelle ont réagi dans la mesure du possible les citoyens vivant le long de la côte. Tous les changements dus au changement climatique et aux autres activités humaines, comme la construction de quais, ont mené à une érosion accrue. Ce phénomène se remarque non seulement sur la côte sud-est du Nouveau-Brunswick, mais également dans d'autres régions, comme la Gaspésie (Québec) et la côte nord du Saint-Laurent (Ouranos, 2004).

À Bouctouche, les décideurs et les intervenants de la communauté craignent surtout la perte de leur écosystème naturel, comme la Dune de Bouctouche, puisqu'il s'agit d'un lieu d'intérêt pour la province et la région. En tant qu'attractions touristiques très réputées, la Dune de Bouctouche et l'Éco-centre Irving sont d'importants points d'intérêt pour la communauté. Les principaux impacts environnementaux que pourrait avoir le changement climatique sont l'érosion sur la dune et le long de la côte, l'élévation du niveau de la mer faisant augmenter le nombre d'inondations principalement dans les conditions normales saisonnières, l'aplanissement continu de l'écosystème dunaire par les ondes de tempête, surtout pendant l'hiver lorsque la glace affouille la surface, soit aplanissant le sommet de la dune, soit entraînant le sable. La figure 5 illustre les changements du profil de la Dune de Bouctouche et la vitesse à laquelle le système de dunes peut s'aplanir sous l'influence des ondes de tempête. Il est important de comprendre qu'un tel changement a nécessairement un impact sur la végétation. Par exemple, avec l'érosion éolienne, les petits semis sont rapidement enterrés sous le sable, ce qui réduit leur taux de croissance et de survie. L'étude sur le rétablissement de la végétation après l'impact du dépôt de sable par les tempêtes indique que les espèces clonales telles que l'ammophile à ligule courte (*Ammophila breviligulata*) peuvent repousser rapidement à partir des rhizomes enterrés, alors que des espèces annuelles plus petites peuvent mettre plus de temps à réapparaître. De plus, les perturbations

entraînent d'autres problèmes (qui peuvent également découler de l'activité humaine à la Dune de Bouctouche) dans l'écosystème tels que l'introduction d'espèces envahissantes, qui ont augmenté sensiblement après la série d'ondes de tempête de 2000 à 2002 (Vasseur *et al*., en préparation). Dans le cas de petites plantes annuelles telles que l'aster du Saint-Laurent (*Symphyotrichum laurentianum*) et de certaines espèces d'oiseaux comme le Pluvier siffleur, l'inondation de leur écosystème et l'erosion des côtes peuvent mener à la disparition de leur habitat.

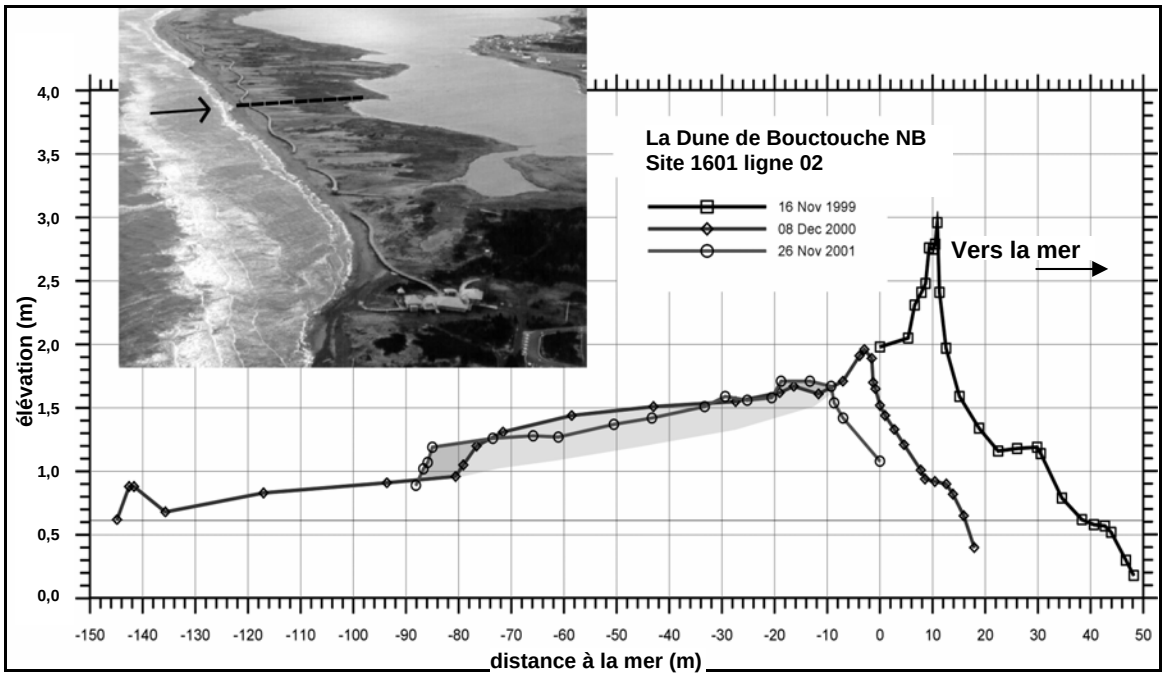


Figure 5. Coupes successives de la flèche de la Dune de Bouctouche en novembre 1999, décembre 2000 après la tempête d'octobre 2000 et en novembre 2001 après une tempête survenue plus tôt dans le mois (Forbes, 2004).

4.9.3.1.2 Zones et évaluation de la vulnérabilité sous l'angle des facteurs biophysiques à socioéconomiques

Nombre des impacts enregistrés à la Dune de Bouctouche peuvent être directement ou indirectement liés (figure 6a) non seulement à l'environnement naturel, mais également à la communauté de Bouctouche. Du point de vue de l'écosystème naturel, les espèces en péril et les espèces moins communes sont les composantes les plus vulnérables de la Dune de Bouctouche. De plus, la réduction des plages due aux ondes de tempête passées et surtout à l'erosion des côtes entraîne un rétrécissement de l'espace disponible pour les espèces ainsi que des changements à l'attrait touristique de l'endroit, comme le montre le diagramme. L'Éco-centre Irving de la Dune de Bouctouche attire environ 120 000 visiteurs par année depuis son ouverture (Arsenault, G., 2005, rapport au conseil consultatif). Étant donné qu'environ 50 % des visiteurs proviennent du Québec et de 20 à 25 % d'autres régions telles que l'Ontario et les États-Unis, un changement à l'infrastructure entraînant une réduction des plages et limitant encore plus l'accès à l'environnement dunaire naturel pourrait faire baisser sensiblement le nombre de

visiteurs. Depuis son ouverture, la Dune de Bouctouche est l'une des attractions publicisées par la province et, comme le décrit la figure, un changement dans son écosystème pourrait entraîner des changements dans le tourisme, ce qui aurait un impact sur toute la région, et pas seulement sur l'Éco-centre Irving.

À Bouctouche, étant donné l'importance du secteur touristique, la majeure partie des exploitants de l'infrastructure, comme le Pays de la Sagouine, les chalets et les sentiers de randonnée pédestre, s'inquiètent beaucoup de l'élévation du niveau de la mer et de l'erosion des côtes. Par exemple, tous les scénarios montrent que, lors de phénomènes extrêmes et pour une courte période après ceux-ci, le Pays de la Sagouine pourrait devoir cesser temporairement ses activités jusqu'à ce que le pont, le réseau d'égouts et d'autres sections de l'établissement aient été réparés, ce qui pourrait entraîner l'annulation de manifestations advenant une tempête tropicale précoce. Avec l'augmentation de fréquence et d'intensité des inondations et des phénomènes extrêmes, on doit fermer temporairement certains sentiers de randonnée pédestre de bord de rivière. En particulier, le pont de la rivière Black est souvent fermé. Il est également clair qu'à la suite des inondations et des phénomènes extrêmes, certains exploitants d'entreprises touristiques tels que les boutiques, les restaurants et les installations d'hébergement et de camping pourraient être incapables d'assumer les coûts non assurés associés aux réparations, ce qui pourrait ne pas être financièrement viable pour certains d'entre eux et entraîner la fermeture temporaire de ces installations. Les premiers secteurs qui pourraient être visés sont les chalets et les établissements d'hébergement situés sur la côte. La demande croissante en eau potable pendant la saison touristique, alors que l'approvisionnement en eau souterraine est diminué (p. ex. la population de Bouctouche et de Shediac augmente de plus de 100 % en été), en est un aspect particulier. Les membres de la communauté s'inquiètent pour l'avenir de l'approvisionnement en eau souterraine et craignent l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur la qualité de l'eau potable. La communauté de Bouctouche a beaucoup investi dans ses attractions et installations touristiques, dont la majorité se trouve dans la zone côtière et a déjà subi dans une certaine mesure les effets des phénomènes météorologiques extrêmes (onde de tempête et érosion).

4.9.3.1.3 Composante sociale

À l'origine, on a fait six présentations publiques aux différentes communautés côtières de la région à l'étude afin de présenter le projet et de connaître les premières impressions générales du problème. Les membres ont indiqué qu'ils étaient très préoccupés par les questions économiques relatives au développement et par les problèmes d'infrastructure touristique. De son côté, une communauté autochtone de la même région (Première Nation Elsipogtog) a exprimé des préoccupations au sujet de l'eau, des cimetières et des plantes médicinales. Étant donné que la majeure partie de son territoire est composé de milieux humides, elle craint toute élévation du niveau de la mer. Un autre problème crucial est le volume et la qualité de l'eau. La source d'eau potable est située en dehors de la réserve, et le développement croissant dans la région de Richibucto fait craindre pour la sécurité de l'approvisionnement. En général, la communauté a été très contente d'être consultée, puisqu'elle désirait participer à l'enquête socioéconomique. Selon nous, l'intérêt des communautés à participer à ce projet a été très positif et devrait aider à mieux intégrer les renseignements, le savoir traditionnel et les perceptions sociales dans l'évaluation écologique et physique des impacts potentiels du changement climatique sur la côte.

Dans le cas de Bouctouche, les communautés étaient surtout préoccupées par différents facteurs sociaux et économiques liés à leur mode de vie, tels que la pêche, l'aquaculture, l'écotourisme et le tourisme culturel. Certaines informations et réactions donnent à penser que les considérations sociales devraient être étudiées lors de l'étape initiale de l'élaboration de mesures d'adaptation. Par exemple, les participants ont observé, comme tendances du développement de la communauté, d'importants phénomènes de « changement » du passé et des mesures prises aujourd'hui pour faire face à l'élévation du niveau de la mer, à l'erosion des côtes et aux ondes de tempête. Par exemple, l'industrie aquacole, qui en est encore à des stades cruciaux de son développement, surtout dans la région de Bouctouche, a subi des pertes énormes lors de ces mêmes phénomènes météorologiques extrêmes, et certains aquaculteurs n'ont personnellement reçu aucun recours financier. Les coûts des dommages de l'onde de tempête et de l'erosion des côtes ont entraîné des revers économiques importants dans les communautés côtières du sud-est du Nouveau-Brunswick.

Si les aspects sociaux du changement climatique sont intégrés à l'évaluation de la vulnérabilité et des impacts du changement climatique, il est important de se rappeler que la population locale possède une mine de renseignements sur son environnement et, par ses connaissances de l'endroit, peut aider à évaluer les facteurs de stress susceptibles non seulement d'avoir un impact sur le projet, mais aussi d'inquiéter et de stresser davantage la communauté. Par exemple, il est clair que, dans certaines zones de Bouctouche, le fait d'être situées près de la côte et davantage exposées aux impacts du changement climatique (élévation du niveau de la mer, erosion des côtes et ondes de tempête) et de n'avoir d'autre choix que de s'adapter aux conditions, puisqu'il est économiquement impossible pour elles de déménager, pousse les populations des communautés à être plus prudentes face à la possibilité que de nouveaux projets de construction se développent dans la même zone. Dans certains cas, il a fallu installer des pompes d'épuisement pour retirer l'eau autour des fondations des maisons. Celles-ci, qui devaient fonctionner seulement lors de pluies torrentielles, fonctionnent maintenant la plupart du temps à marée haute. Dans d'autres cas, bien que cette pratique doive être évitée la plupart du temps, pour protéger les propriétés côtières de l'élévation du niveau de la mer et de l'effet de l'érosion, des ouvrages côtiers ont été construits afin d'opposer une barrière en dur à l'action des vagues. Ces ouvrages peuvent résister quelques années, mais les gens ont constaté que l'eau de mer finit par pénétrer derrière le mur, qui va s'effondrer et entraîner avec lui encore plus du terrain. Par ailleurs, certaines nouvelles maisons surélevées ont été construites le long de la côte (p. ex. terrain intercalaire et fondation plus élevée) avec un mur tampon calculé en fonction de la plus haute marée enregistrée. Leur connaissance de ce qui se passe sur la côte et dans leur communauté peut donc être inestimable pour la prise en compte du changement climatique. D'autres études ont indiqué que les connaissances locales et le besoin d'examiner les conditions propres à l'endroit sont cruciaux pour prendre en compte la vulnérabilité au changement climatique dans la planification du développement durable d'une communauté (Adger, 2003).

4.9.3.1.4 Mesures d'adaptation potentielles

La viabilité à long terme de l'industrie touristique est certainement une préoccupation et plusieurs facteurs peuvent influer sur l'issue des décisions prises par la communauté. La figure 6b décrit les liens entre les changements et les régions où des considérations économiques et sociales devront être intégrées et examinées afin de prendre des

décisions propices à la durabilité de la communauté, surtout en ce qui a trait à l'industrie touristique. Puisqu'une grande partie de la communauté dépend directement ou indirectement de cette industrie, tout changement peut perturber son mode de vie. Les résultats de ces activités montrent que six catégories de considérations doivent être intégrées dans l'élaboration de mesures d'adaptation :

1. érosion visible et inexorable;
2. esthétique du paysage (non pollué, etc.);
3. incertitude et variations saisonnières;
4. résistance ou résignation aux phénomènes extrêmes;
5. évolution de l'économie et rôle de la nouvelle économie;
6. responsabilité du gouvernement et rôle de la communauté.

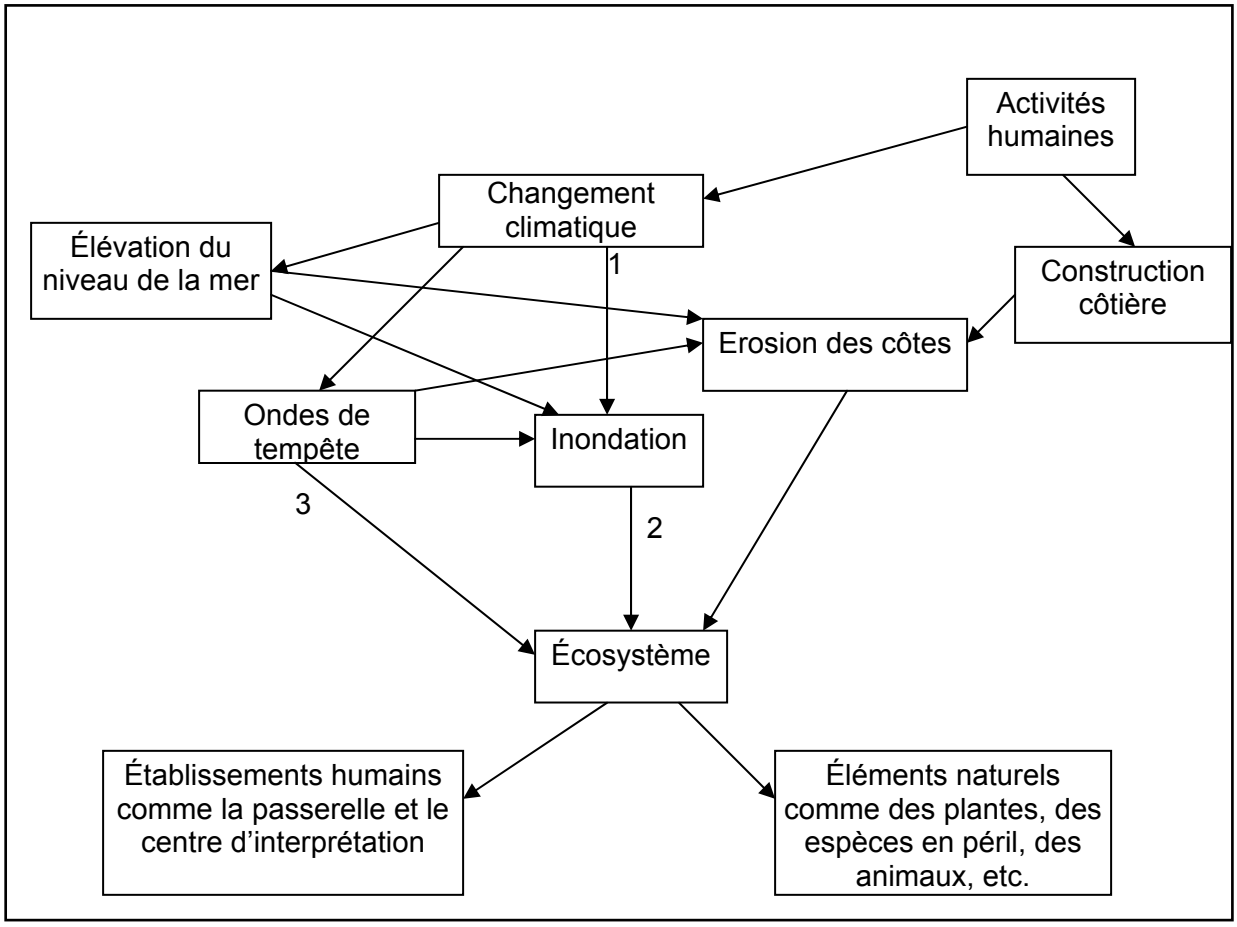


Figure 6a. Sommaire des impacts du changement climatique sur la Dune de Bouctouche : 1) Inondation en tant qu'impact du changement climatique, sous la forme de pluie abondante ou de chutes de neige plus élevées.2) Voir à la figure 6b le détail des impacts intégrés de l'inondation sur l'écosystème de la Dune de Bouctouche. 3) Voir à la figure 6c le détail des impacts intégrés des ondes de tempête sur l'écosystème de la Dune de Bouctouche.

En général, les communautés telles que Bouctouche et les intervenants de la Dune de Bouctouche conviennent qu'il y a perte d'habitat et beaucoup d'érosion du sol, en plus de

l'élévation du niveau de la mer. La plupart des intervenants estiment aussi que les phénomènes extrêmes causant l'erosion des côtes ne sont pas nouveaux, mais qu'ils semblent être plus fréquents. D'autre part, les communautés telles que Bouctouche (et, comme on le verra plus tard, Shediac) reconnaissent que l'attrait des côtes (principalement les plages et la baignade) est un phénomène économique nouveau, qui ne date que de dix à quinze ans, et qui a pu avoir un impact important sur l'écosystème côtier.

Les mesures d'adaptation devraient donc comprendre des façons de pouvoir maintenir un niveau durable d'activité économique qui n'ait à terme pas d'impact majeur sur le système. Les analyses ont montré que l'industrie touristique ne connaîtra de croissance que si les ressources naturelles sont protégées (comme le montrent clairement les liens de la figure 6c). Les résultats actuels donnent à penser que la Dune de Bouctouche continuera à s'éroder; son extrémité sud pourrait même se détacher et devenir une île. Il est possible que, pour le Pluvier siffleur, cette section détachée de dune devienne un habitat de nidification et soit désignée comme une zone protégée où l'activité humaine est limitée. Afin de soutenir ses activités, l'Éco-centre Irving pourrait devoir investir et devenir un centre de recherche et de renseignements, et offrir aux touristes une expérience environnementale, éducative et historique. Il pourrait offrir des excursions en bateau aux touristes qui désirent en savoir plus sur les espèces en péril et sur l'évolution de la côte (G. Arsenault, 2003, comm. pers.). D'autres types de mesures d'adaptation pourraient comprendre des pratiques de gestion durable pour l'industrie coquillière de Bouctouche, ce qui lui permettrait d'offrir aux touristes un produit de haute qualité répondant à leurs demandes. Cependant, avec la croissance de l'industrie touristique de la région, il faudra peut-être construire une station de traitement des eaux usées capable de desservir le nombre croissant d'entreprises et de zones résidentielles. Cette station devrait de plus être construite en terrain élevé puisque la lagune actuelle de Bouctouche pourrait être limitée en matière de charge et d'emplacement. De même, il faudrait améliorer les sentiers de randonnée pédestre, le Pays de la Sagouine et les environnements des petits exploitants pour maintenir le niveau actuel d'activités économiques provenant du secteur touristique.

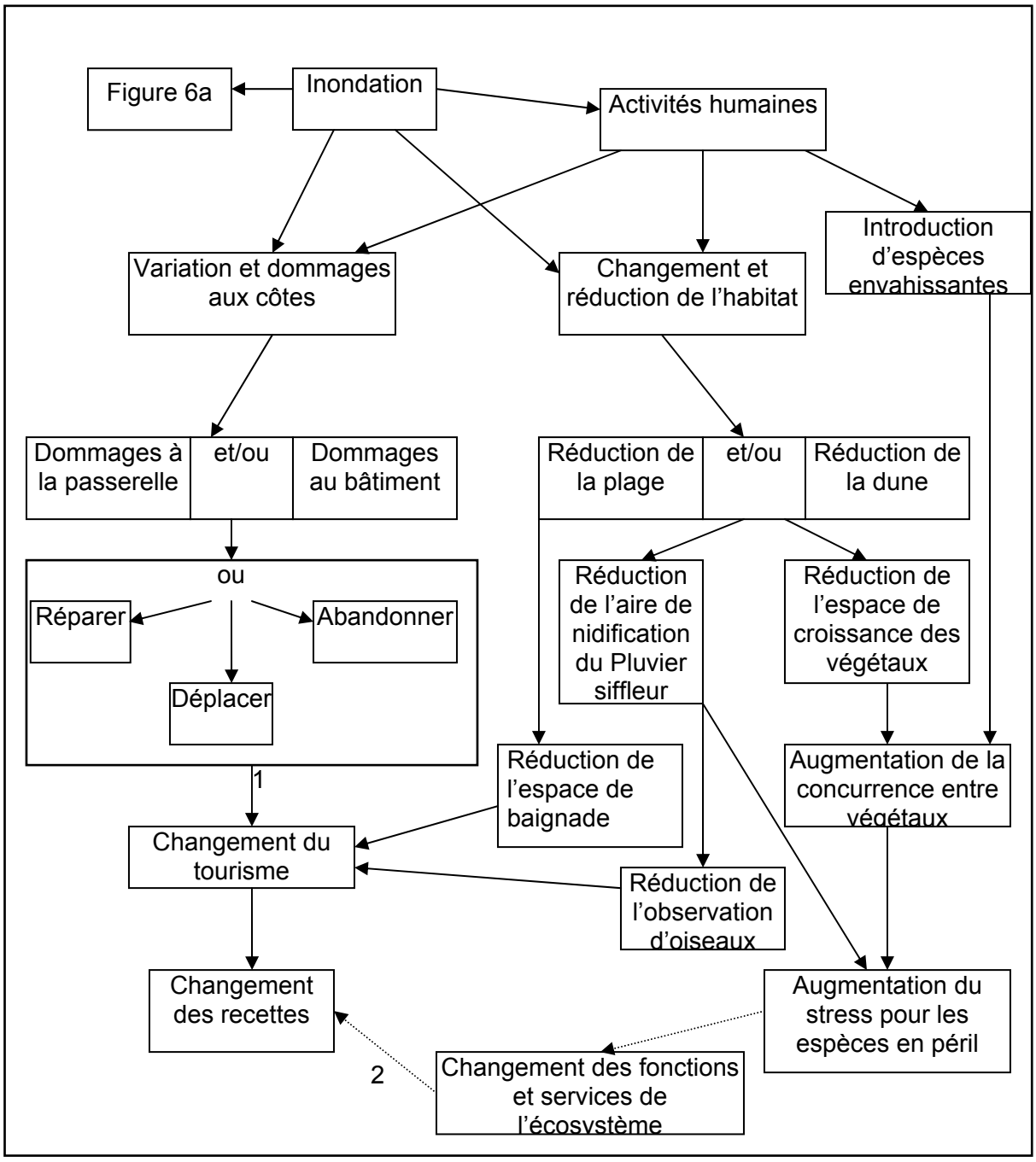


Figure 6b. Intégration des impacts possibles du changement climatique et des activités humaines sur l'écosystème de la Dune de Bouctouche. Le diagramme explique les problèmes directs et indirects et les facteurs à prendre en considération pour évaluer les impacts et les réponses possibles à un projet de développement, dans le contexte de l'élévation du niveau de la mer. 1) Le changement du tourisme peut entraîner une baisse du nombre de visiteurs et donc un ralentissement des activités économiques locales, comme les gîtes touristiques, les restaurants, etc. La conséquence principale serait donc une baisse des recettes de la communauté. Les dommages peuvent rendre le site moins attrayant, et entraîner une diminution des infrastructures et des attractions, etc. 2) À terme, comme d'autres études l'ont estimé (Costanza *et al*., 2000;

FEE, 2005), avec ces changements de l'écosystème qui peuvent être accompagnés de la disparition locale d'espèces, de changements dans les cycles des éléments nutritifs, d'une réduction des obstacles naturels, etc., il y aurait un changement des externalités et donc indirectement de la fonction économique de l'écosystème et de la communauté humaine qui y est attachée. Dans le cas de l'Éco-centre Irving, la perte du Pluvier siffleur ferait baisser le nombre de personnes attirées par l'observation des oiseaux, ce qui entraînerait une réduction des dépenses effectuées dans la communauté, comme dans les restaurants, les gîtes touristiques, les boutiques, etc.

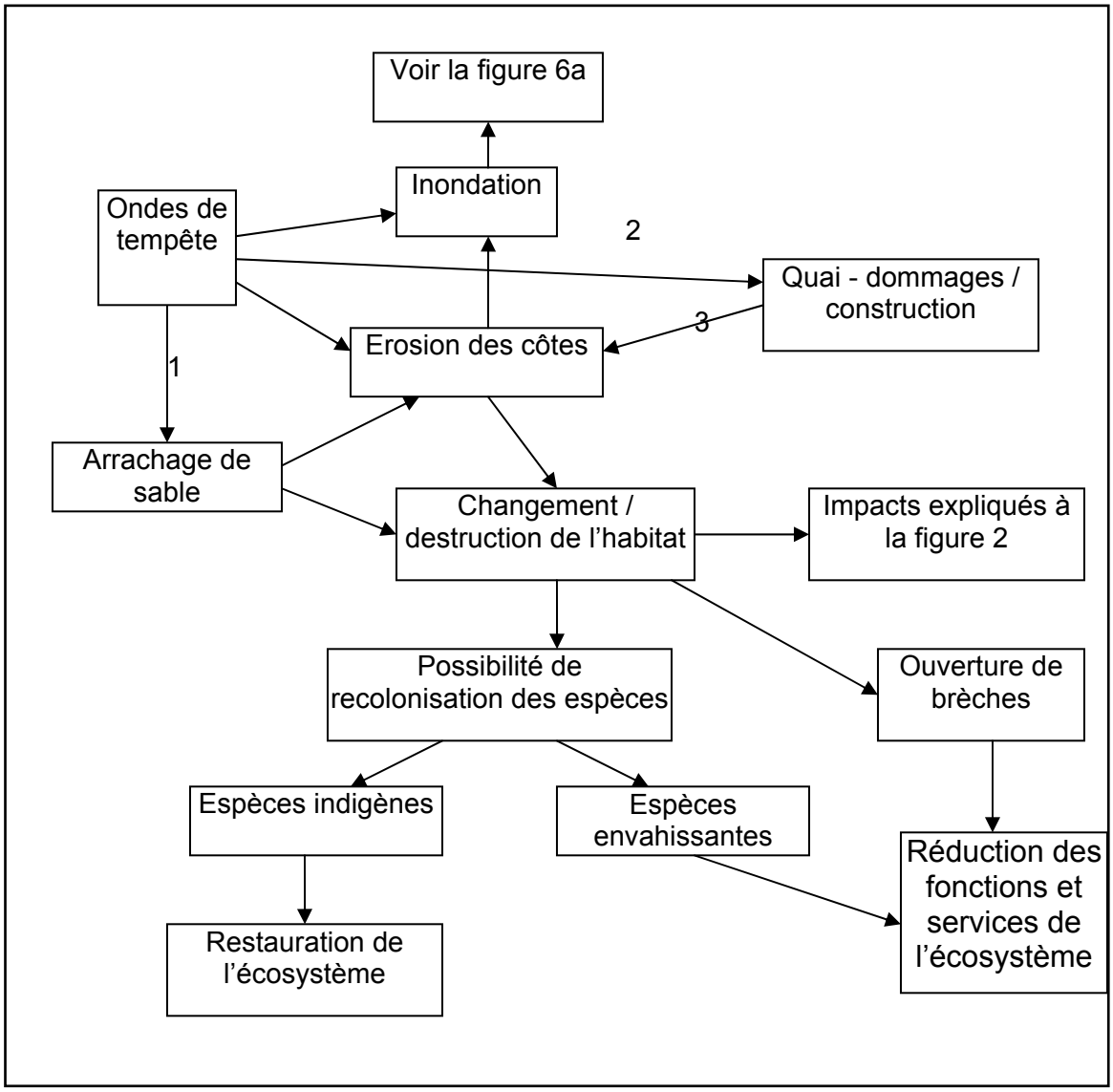


Figure 6c. Intégration des impacts possibles du changement climatique et des activités humaines sur l'écosystème de Bouctouche. Le diagramme explique les problèmes directs et indirects et les facteurs à prendre en compte pour évaluer les impacts et les réponses possibles à un projet de développement, dans le contexte des ondes de tempête. 1) Les impacts des ondes de tempête mèneraient à l'arrachage du sable, surtout en été. En hiver, le phénomène pourrait être moindre, mais l'affouillement par les glaces pourrait avoir des conséquences similaires, comme une

augmentation de l'erosion des côtes et des changements de l'habitat. 2) Les ondes de tempête pourraient endommager le quai de Saint-Édouard-de-Kent, et d'autres sédiments seraient emportés vers la Dune de Bouctouche, ce qui contribuerait à atténuer l'erosion des côtes. 3) D'un autre côté, si le quai supporte les assauts de la tempête ou s'il est immédiatement reconstruit, on s'attend à ce que l'erosion des côtes reste la même, ou augmente en raison de l'instabilité du système.

4.9.3.1.5 Évaluation de la capacité d'adaptation et de la conservation à long terme de l'écosystème côtier naturel et du tourisme côtier à Bouctouche

Les principaux impacts environnementaux potentiels du changement climatique sont l'erosion des côtes sur la dune et le long de la côte et l'élévation du niveau de la mer qui, à son tour, entraînera une augmentation du nombre d'inondations. La plupart des mesures d'adaptation proposées faisaient appel à des progrès technologiques et au déplacement de certaines infrastructures. Cependant, dans un environnement naturel tel que la Dune de Bouctouche, il est important de souligner que la plupart des capacités d'adaptation dépendront du potentiel des espèces naturelles non seulement à se rétablir après un phénomène extrême, mais également, dans le cas des espèces végétales indigènes, à faire face à la concurrence des nouvelles espèces envahissantes. Ces phénomènes ont déjà été observés à la Dune de Bouctouche en 2003-2004 avec une augmentation des espèces envahissantes dans les zones de dépôt de sable et en 2005 dans les populations d'aster du Saint-Laurent. Dans ce dernier cas, l'aster du Saint-Laurent est présentement déplacé par une espèce étrangère très proche provenant de l'Ouest canadien (*Symphyotrichum ciliatum*). En réalité, il est même possible que l'aster du Saint-Laurent soit déjà disparu de la région de Bouctouche puisque l'invasion s'est produite en seulement un an. Dans de telles circonstances, on peut difficilement s'attendre à ce que l'écosystème actuel demeure dans son état original. Il se transformera en un autre type d'écosystème, qui pourrait comprendre certaines des espèces originales, mais également de nouvelles, mieux adaptées aux conditions actuelles et futures. La capacité d'adaptation actuelle n'est donc pas liée aux capacités et aux activités humaines, mais bien au système lui-même (figure 4, identificateurs NC dans les facteurs environnementaux).

Dans la présente étude, les mesures d'adaptation visant l'infrastructure touristique se sont révélées importantes pour le maintien des activités économiques actuelles de la communauté. Elles prennent trois formes : l'évitement, le retrait et la protection. La capacité d'adaptation d'une communauté, décrite précédemment, peut être définie comme la propriété du système à faire face ou à réagir au changement climatique (Smit et Pilifosova, 2001). L'Éco-centre Irving et le village de Bouctouche ont investi dans leur économie afin de pouvoir développer la totalité de l'infrastructure touristique actuelle, ce qui aide présentement à maintenir les activités économiques de la région (tableau 1). Il a été montré que, dans l'analyse d'un scénario optimiste (comprenant des mesures d'atténuation et d'adaptation), les dépenses des visiteurs dans l'infrastructure touristique augmenteront légèrement, ce qui permettra à la communauté de soutenir son développement. Cependant, dans le scénario pessimiste, on s'attend à ce que les dépenses et activités touristiques diminuent, ce qui nuira à la durabilité de cette industrie dans la communauté. Parmi les principaux facteurs qui influeront sur la capacité de la communauté à s'adapter aux impacts du changement climatique figure son acceptation de déplacer le Pays de la Sagouine et d'autres infrastructures, actuellement proches du niveau de la mer, vers des terrains plus élevés. Dans le cas de la Dune de Bouctouche et

de l'Éco-centre Irving, le besoin permanent de reconstruire ou de réparer la passerelle après les ondes de tempête pourrait faire monter les tarifs d'assurance contre les dommages; il se pourrait même, comme on l'a vu dans d'autres zones côtières du Nouveau-Brunswick, que certaines compagnies d'assurances refusent de payer pour les dommages causés par les inondations, les ondes de tempête et l'erosion des côtes.

Tableau 1. Dépenses estimatives en 2004 (dépenses de référence), dépenses du scénario optimiste et dépenses du scénario pessimiste à Bouctouche, Nouveau-Brunswick, avec écart type (ET). Toutes les valeurs sont arrondies à la centaine la plus proche.

SECTEUR	Dépenses de référence (± ET)	Dépenses du scénario optimiste (± ET)	Dépenses du scénario pessimiste (± ET)
Hôtels, motels, auberges, gîtes touristiques	5 228 000 $ ± 13 012 200	5 814 100 $ ± 5 851 000	3 041 700 $ ± 3 182 700
Terrains de camping	864 000 $ ± 2 266 800	1 420 700 $ ± 1 429 700	589 900 $ ± 617 200
Arts, divertissement et loisirs	1 865 000 $ ± 256 100	3 578 421 $ ± 238 300	2 493 529 $ ± 254 200
Magasins d'alimentation	2 295 800 $ ± 2 897 100	2 581 800 $ ± 3 783 900	1 672 400 $ ± 3 026 200
Commerce de détail	4 234 900 ± 5 548 200	4 762 400 $ ± 8 669 000	3 762 100 $ ± 6 930 200
Restaurants	10 093 300 $ ± 11 779 700	11 350 800 $ ± 19 525 800	7 621 600 $ ± 13 295 000
Stations-service	6 294 300 $ ± 8 568 900	7 078 400 $ ± 13 148 400	5 591 600 $ ± 10 506 100

Il est possible d'intégrer l'analyse actuelle des différents secteurs qui contribuent à l'économie de Bouctouche de façon à cibler le plus important secteur pour lequel des mesures d'adaptation devraient être élaborées. L'approche utilisée dans la présente étude est similaire à l'analyse réalisée en Australie par la firme Allen Consulting Group (2005), qui a utilisé une approche de gestion du risque pour évaluer les différents secteurs de l'économie de l'Australie. La différence ici est que l'analyse est réalisée à une échelle locale et limitée aux secteurs liés à la principale activité économique, soit le tourisme. Les critères utilisés pour déterminer la priorité des besoins en mesures d'adaptation sont : l'exposition du secteur aux impacts du changement climatique, sa sensibilité à ces impacts (deux facteurs régissant sa vulnérabilité), sa capacité d'adaptation et son potentiel à tirer profit du changement climatique. Pour tous les critères sauf le dernier, une valeur basse signifie que le secteur n'est pas sensible aux impacts du changement climatique, ce qui peut être dû au fait que l'infrastructure ne se situe pas très près des changements possibles ou qu'elle est suffisamment forte pour résister aux impacts. Le changement climatique peut avoir des avantages lorsque les changements améliorent les conditions ou donnent naissance à d'autres activités économiques. Par exemple, l'allongement de l'été peut entraîner celui de la saison de camping. Le tableau 2 présente l'intégration des renseignements courants afin d'évaluer les priorités pour les secteurs de la communauté de Bouctouche. Les deux secteurs principaux sont d'une part les hôtels, les motels, les auberges et les gîtes touristiques et, d'autre part, les arts, les divertissements et les loisirs, surtout en raison de la proximité à la côte. Dans les deux secteurs, les grands défis seraient l'impossibilité de se relocaliser

pour des raisons de coût si l'élévation du niveau de la mer devient trop importante, une pénurie d'eau potable pour les endroits alimentés par des puits et les dommages infrastructurels causés lors des phénomènes extrêmes. Par contre, comme la plupart des stations-service et des magasins d'alimentation sont situés plus loin dans l'intérieur des terres et qu'ils sont faits de matériaux différents, on ne s'attend pas à ce que le changement climatique ait autant d'impact sur eux que sur ce qu'on peut craindre pour les habitations et les installations récréatives. À la lumière de tous ces facteurs, nous pouvons conclure que, pour Bouctouche, certaines infrastructures (l'Éco-centre Irving et le Pays de la Sagouine, et aussi certains hôtels et gîtes touristiques) devraient être la principale priorité de la communauté pour assurer son adaptation au changement climatique. Dans la plupart des cas, on s'attend à ce que l'adaptation exige de se relocaliser. Même si des murs de soutènement et autres travaux de construction peuvent être des solutions à court terme pour certaines installations (principalement les maisons et les gîtes touristiques), d'autres problèmes comme les inondations et les pénuries d'eau potable viendraient à long terme exacerber les stress actuels du système.

Tableau 2. Estimation des priorités et intégration de la vulnérabilité et de la capacité d'adaptation pour les divers secteurs touristiques de Bouctouche.

Critères	Secteur						
	Hôtels, motels, auberges, gîtes touristiques	Terrains de camping	Arts, divertissements et loisirs	Magasins d'alimentation	Commerce de détail	Restaurants	Stations-service
Exposition	Faible à élevée	moyenne	Élevée	Faible	Faible	Faible	Faible
Sensibilité	Faible	Faible	Élevée	Faible	Faible	Faible	Faible
Capacité d'adaptation	Moyenne à élevée	Élevée	Faible à moyenne	Élevée	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Faible
Potentiel d'avantages	Faible	Faible à moyen	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible à moyen
Priorité globale	Moyenne à élevée	Faible	Moyenne à élevée	Faible	Faible	Faible	Faible

4.9.3.2 Étude de cas de Shediac et de Pointe-du-Chêne

4.9.3.2.1 Types d'impacts relatifs au changement climatique

La communauté de Pointe-du-Chêne, qui couvrait autrefois une superficie de 609 413 m^2, a légèrement augmenté dans les 30 dernières années (figure 7) pour atteindre 715 678 m^2, soit une hausse de 14 %. Cette partie de la région de Shediac a été analysée dans le présent chapitre en tant qu'exemple de communauté suburbaine côtière où la construction résidentielle est la principale force économique. Les renseignements actuels, qui ont été superposés à la carte cadastrale, comprenaient 659 propriétés terrestres (de différents types) (figure 8). Les principaux types d'impacts des scénarios de changement climatique pour cette communauté sont les dommages causés par des phénomènes extrêmes, mais principalement les inondations. La figure 9 montre le territoire inondé pendant l'onde de tempête de janvier 2000. La superposition des données MAN et du scénario d'une onde de tempête comme celle de janvier 2000 (niveau de 2,55 mètres au-dessus de la référence MAN) montre que plusieurs polygones spatiaux de Pointe-du-Chêne ont été inondés à des niveaux variant de 0,01 à 6,35 mètres. Les catégories de profondeur d'eau des inondations sont décrites au tableau 3. À partir de ces résultats, on peut voir que les deux premières catégories couvrent 75 % du territoire qui serait inondé sous 0,5 à 1,0 mètre d'eau. Environ 4 % du territoire se retrouverait sous plus de deux mètres d'eau, ce qui a été observé en janvier 2000 surtout à proximité du quai de Pointe-du-Chêne. La figure 7 illustre les zones qui seraient inondées. Les variations du niveau d'inondation sont principalement attribuables à la topographie de la région et aux points d'entrée de l'eau, les lits des cours d'eau permettant sa pénétration dans l'intérieur des terres. En ce qui concerne les maisons et les autres immeubles touchés par une inondation causée par une onde de tempête similaire à celle de janvier 2000, la plupart des 348 propriétés inondées (à l'exclusion du quai et des routes) faisaient partie des deux premières catégories. Très peu d'entre elles ont été exposées à la catégorie 4 (figure 9, tableau 4).

Tableau 3. Catégories de hauteur d'eau pendant des inondations à Pointe-du-Chêne causées par une onde de tempête semblable à celle de la tempête de janvier 2000.

Catégorie	Hauteur d'eau (m)	Superficie (m^2)	%
1	0 – 0.50	122 313	37
2	0,50 – 1,00	127 125	38
3	1 – 1,50	45 082	13
4	1,50 – 2,00	26 486	8
5	› 2	13 247	4
Total		334 253	100

Tableau 4. Nombre de propriétés qui seraient inondées selon diverses catégories de hauteur d'eau dans la région de Pointe-du-Chêne, pour une onde de tempête semblable à celle de la tempête de janvier 2000.

Catégorie	Hauteur d'eau (m)	Nombre de propriétés touchées
1	0 – 0.50	218
2	0,50 – 1,00	109
3	1 – 1,50	20
4	1,50 – 2,00	1
Total		348

La communauté de Pointe-du-Chêne étant principalement résidentielle et suburbaine, les dommages peuvent être très importants pour les contribuables et les propriétaires. Dans la composante d'analyse économique du projet (section 4.7), les auteurs signalent que, pour la tempête de janvier 2000, 198 demandes d'indemnisation ont été présentées à l'Organisation des mesures d'urgence (OMU) du Nouveau-Brunswick, dont 43 étaient admissibles à un financement qui a totalisé près de 1,5 million de dollars. Le 29 octobre 2000, une autre onde de tempête extrême a frappé la côte sud-est du Nouveau-Brunswick; près de 459 demandes d'indemnisation ont été présentées, dont 159 étaient admissibles au financement, pour un total de près de 1,3 million de dollars. Étant donné l'augmentation du nombre de projets de construction résidentielle le long de la côte dans ces communautés et la construction de maisons plus grandes et plus chères, on s'attend à ce que les coûts augmentent de façon significative.

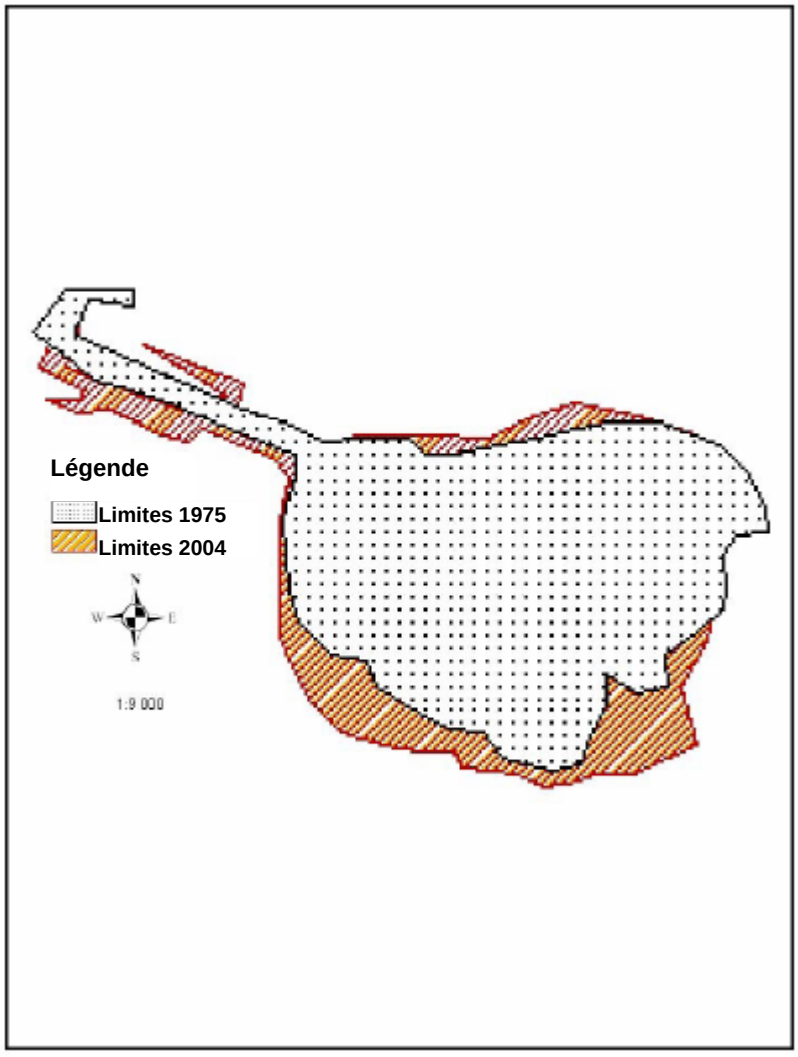


Figure 7. Comparaison des limites de Pointe-du-Chêne entre 1975 et 2004 (intégré comme carte SIG (ArcGIS).

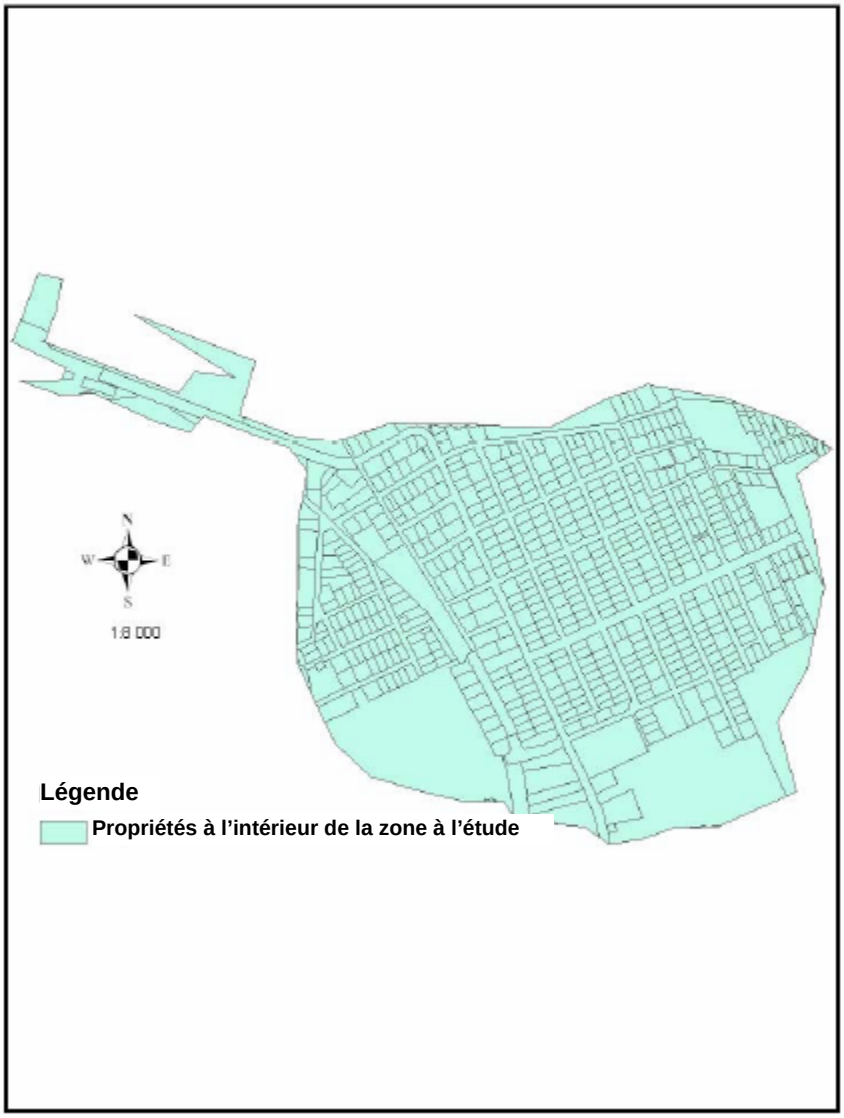


Figure 8. Les propriétés cadastrales extraites des cartes provinciales et municipales pour Pointe-du-Chêne, et intégrées dans des cartes SIG (ArcGIS).

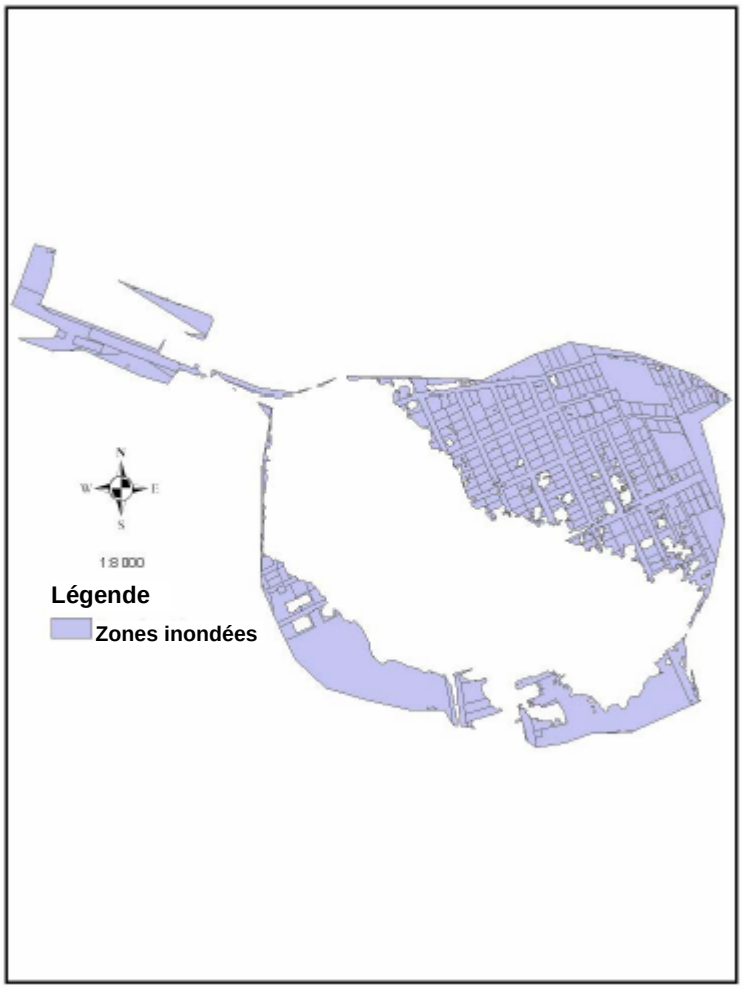


Figure 9. Zones inondées à Pointe-du-Chêne en janvier 2000 lors de l'onde de tempête de 2,55 m au-dessus du MAN. Cette zone représente 348 propriétés.

4.9.3.2.2 Zones et évaluation de la vulnérabilité, sous l'angle des facteurs biophysiques à socioéconomiques

La plupart des participants de la communauté craignaient pour la durabilité des nouveaux projets de développement côtier. Bien que, par le passé, l'élévation du niveau de la mer et l'erosion des côtes aient imposé de relocaliser des maisons, des chalets, des routes et d'autres infrastructures, on voit mal comment cela pourrait se faire maintenant, avec des maisons plus grandes et plus coûteuses. Par ailleurs, d'autres personnes interrogées ont déclaré n'avoir observé que peu de changements sur la côte au fil des années. Certaines des personnes qui ont connu les deux tempêtes records de 2000 croient que c'était des phénomènes « uniques », et qu'il n'y a pas lieu d'en craindre d'autres dans l'avenir. Les participants ont expliqué que, pendant les tempêtes de janvier et d'octobre 2000, le quai, l'équipement de pêche, les passerelles et les autres infrastructures côtières ont été endommagés ou perdus. Certains dommages étaient assurables, mais nombre d'autres ne l'étaient pas. Certains des quais endommagés n'ont pas été réparés parce que les petites communautés n'ont pas le financement requis pour l'amélioration des infrastructures. Les gens estimaient que, si la situation socioéconomique de la

communauté n'était pas prise en considération aux premières étapes des nouveaux projets, avec les tendances actuelles du changement climatique, la pression exercée sur la communauté pourrait atteindre un niveau qui serait loin d'être viable. Les membres de la communauté se sont dits inquiets pour l'avenir des infrastructures de quais restantes et ont dit craindre les impacts de l'erosion des côtes et des changements de la température des océans sur la pêche de fond.

Si l'on effectue une analyse de gestion des risques dans laquelle serait calculée la proportion des propriétés terrestres qui seraient touchées, et si on divise ce chiffre par le nombre original de terres qui pourraient l'être, en utilisant les données sur la tempête de janvier 2000, le coefficient de risque serait égal à 0,53; autrement dit, plus de la moitié des propriétés seraient endommagées ou frappées par l'onde de tempête. Bien que cette valeur du risque soit un coefficient simplifié de la superficie inondée, elle permet d'évaluer rapidement l'importance de la situation. Selon Statistique Canada (2001), une telle tempête toucherait 1 044 personnes. À la lumière des données recueillies pendant ce projet et des tendances du climat, y compris l'élévation du niveau de la mer, on voit que le degré de vulnérabilité des différentes infrastructures humaines côtières est relativement élevé, surtout comparativement à l'écosystème plus naturel de Bouctouche (tableau 5). L'écart entre les capacités d'adaptation et les vulnérabilités est principalement lié au type de scénario privilégié par la communauté (pessimiste ou optimiste) et au type de processus décisionnel et de planification que les municipalités envisageront dans un proche avenir. Des stratégies d'adaptation telles que la conversion en zones protégées de certains terrains de développement potentiel le long de la côte aideront, au cours des 30 à 80 prochaines années, à amortir les impacts de l'élévation du niveau de la mer et permettront à la communauté de préparer d'autres stratégies d'adaptation.

Tableau 5. Estimation des priorités et intégration de la vulnérabilité et de la capacité d'adaptation pour les divers développements résidentiels et secteurs touristiques de Pointe-du-Chêne et de Shediac. Il est important de se rappeler que cette analyse concerne la composante côtière de la communauté, plutôt que sa vie à l'intérieur des terres. C'est en effet cette zone qui subit actuellement le plus de pression du développement résidentiel et du tourisme.

Critères	Secteur				
	Hôtels, motels, auberges, gîtes touristiques	Quai	Restaurants, divertissements et loisirs (surtout les plages)	Magasins d'alimenta-tion et de commerce au détail	Développe-ment résidentiel
Exposition	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Élevée	Faible à moyenne	Faible à moyenne
Sensibilité	Moyenne	Élevée	Élevée	Faible	Moyenne à élevée
Capacité d'adaptation	Faible[1] à élevée[2]	Faible[1] à élevée[2]	Faible[1] à moyenne[2]	Élevée[2]	Faible à moyenne
Potentiel d'avantages	Faible	Faible à moyenne	Faible	Faible	Faible
Priorité globale	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Moyenne à élevée	Faible	Moyenne à élevée

[1] En prenant le scénario pessimiste, dans lequel les stratégies maintiennent le *statu quo* et la protection est assurée par des obstacles physiques; [2] En prenant le scénario optimiste, dans lequel l'évitement et le retrait sont les principales stratégies

4.9.3.2.3 Intégration des données et des impacts à l'adaptation

Le lien entre les considérations socioéconomiques et les changements des écosystèmes suggère plusieurs impacts importants sur la communauté de Pointe-du-Chêne et de Shediac, surtout si les décideurs et les promoteurs s'en tiennent à un scénario de « maintien du statu quo » (dit « scénario pessimiste » dans la section socioéconomique du présent rapport). Les résultats présents montrent clairement que des portions des écosystèmes naturels et des communautés seront touchées par les inondations et par l'élévation du niveau de la mer sur la côte sud-est du Nouveau-Brunswick. L'intégration des résultats des scénarios de changement climatique et de l'analyse des impacts suscite des réactions diverses lorsqu'on les présente aux intervenants et qu'on en discute avec eux. Il a été observé que, selon l'origine des gens participant à un projet, leurs perceptions et leurs réactions varient beaucoup. Par exemple, à Shediac et à Pointe-du-Chêne, la plupart des habitants et des décideurs ont jugé qu'il était important d'adapter le processus de planification et d'intégrer ces impacts potentiels. Dans leur cas, cela a conduit à changer le zonage le long de la côte. La plupart de ces intervenants ont grandi dans la région, et ont connu par le passé des tempêtes et des changements; ils comprennent donc très bien le dilemme posé par le changement climatique et la protection de leurs biens. Leur statut socioéconomique pourrait influer sur leurs réactions puisque les dommages peuvent être coûteux et ne sont pas toujours entièrement couverts par les assurances et les gouvernements, ce qui pourrait devenir encore plus important puisque la province est sur le point d'adopter une loi pour la protection des zones côtières. Cependant, l'étude a également mis en lumière que les gens venant d'autres régions ou qui n'ont jamais subi de dommages causés par les tempêtes ou les inondations ne réagissent pas nécessairement de la même façon. Dans biens des cas, puisqu'il s'agit de leur terre, ils croient qu'ils ont le droit de bâtir près de la côte. Ce n'est pas le niveau d'instruction qui influe sur leur décision, mais leur revenu (ou leur fortune) et le manque de savoir traditionnel quant aux impacts potentiels des tempêtes, de l'erosion des côtes et de l'élévation du niveau de la mer sur leurs propriétés, qui peuvent déterminer dans une grande mesure si un projet ira de l'avant ou non, ou sera modifié pour prévenir les dommages.

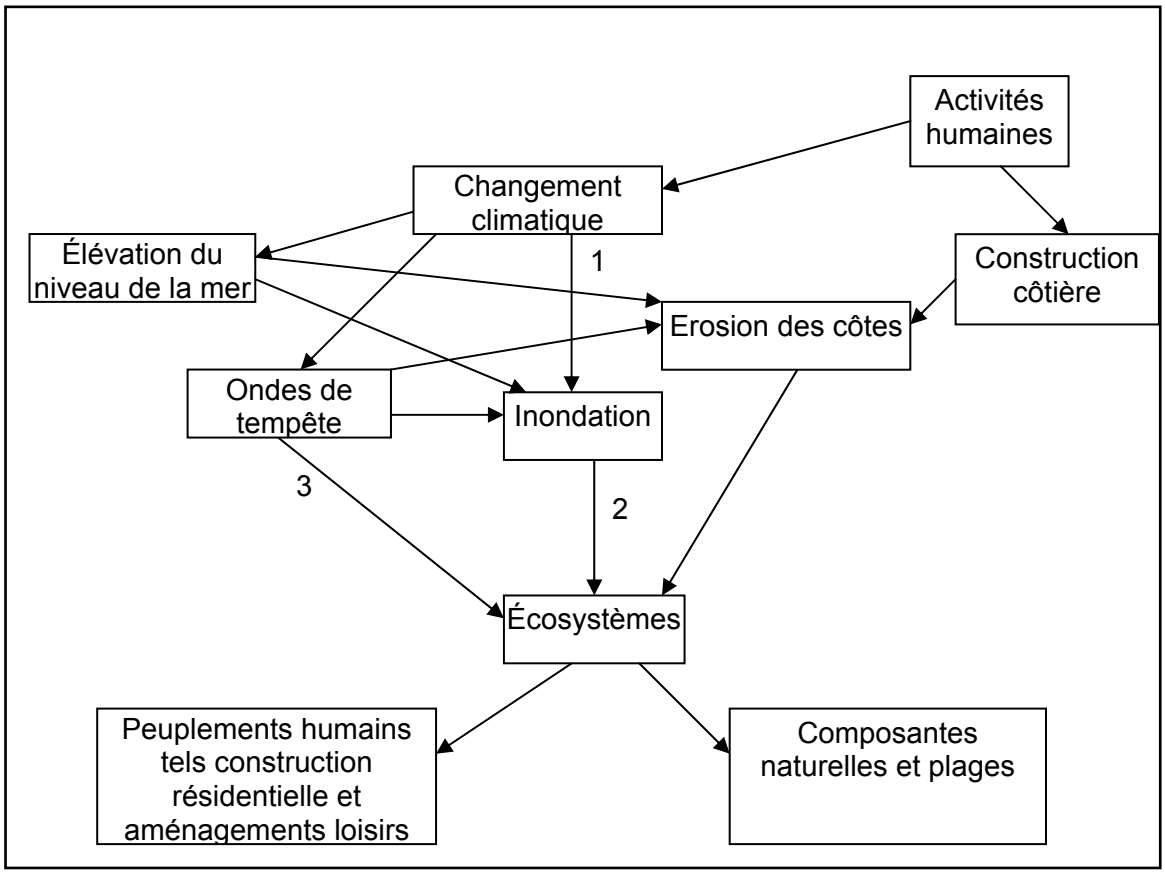


Figure 10a. Sommaire des impacts des scénarios de changement climatique sur la communauté Pointe-du-Chêne-Shediac. 1) Inondations résultant de pluies intenses ou de plus grandes chutes de neige. 2) Voir la figure 10b pour les détails des impacts intégrés des inondations et des ondes de tempête sur cette communauté.

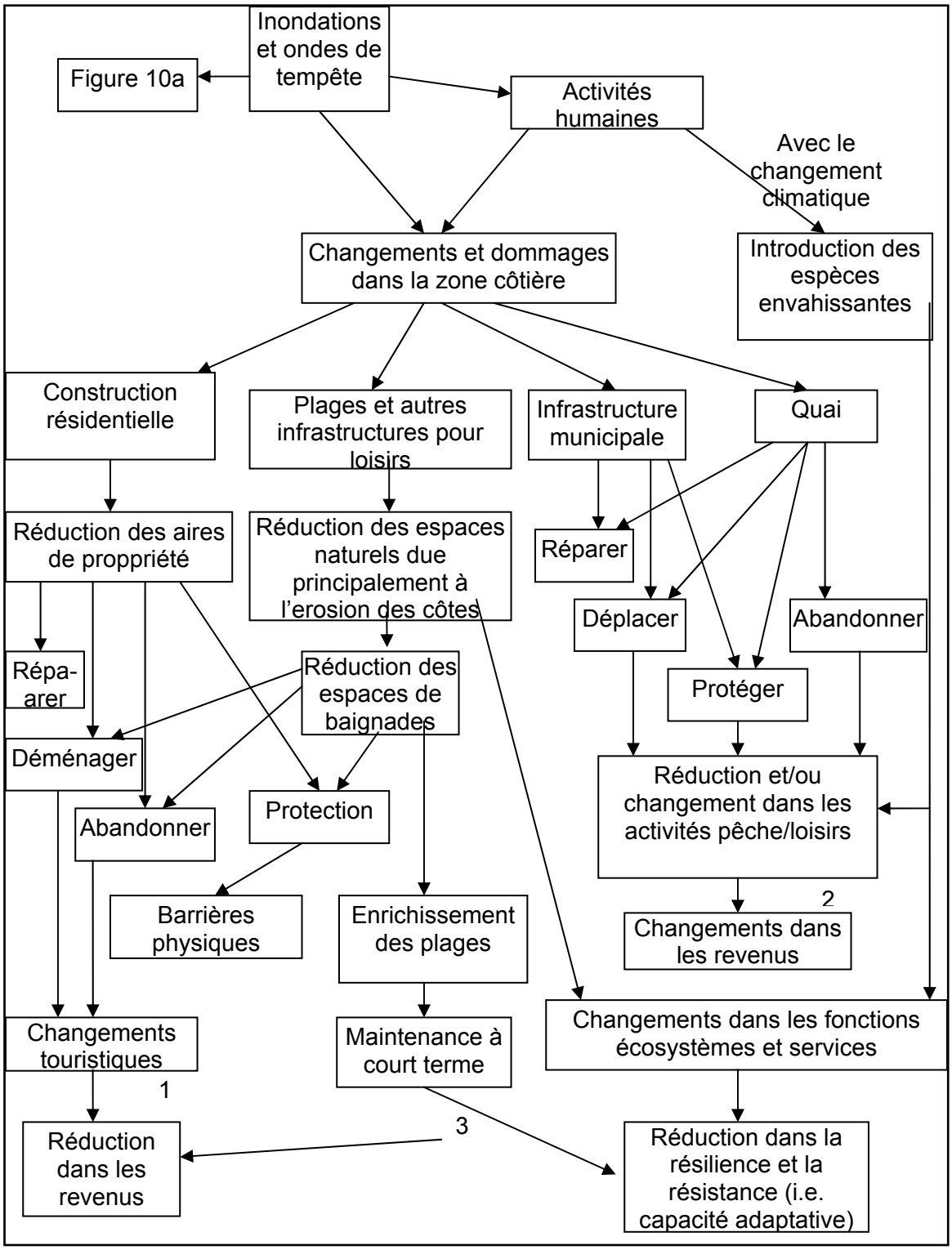


Figure 10b. L'intégration des stratégies potentielles des impacts et de l'adaptation au changement climatique, reliées à la réaction humaine dans la région de Pointe-du-Chêne-Shediac. Le diagramme explique les questions et les considérations directes et indirectes dont il faut tenir compte quand on évalue les impacts et les réponses possibles dans un projet de développement,

du point de vue d'une élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête. 1) Le changement dans les secteurs touristiques tels que les plages et l'infrastructure de loisirs peut mener à une réduction du nombre de touristes et, en conséquence, cela mènerait à moins d'activités locales économiques, comme les gîtes, les restaurants, etc. Cela mènerait aussi à une réduction des revenus pour la communauté. Les dommages peuvent contribuer à une détérioration des sites, à une réduction des infrastructures et des attractions. 2) Les dommages au quai et à d'autres infrastructures municipales mèneraient à une réduction des services. Selon le type de stratégies d'adaptation adoptées, les changements pourraient apporter une réduction des activités de pêche, par exemple. 3) La figure devrait être examinée en fonction de l'échelle de temps. Par exemple, l'enrichissement des plages est une stratégie à court terme qui a été employée pour maintenir le tourisme dans la région. Cependant, il est clair que cela influe de façon importance sur la résilience et la résistance de l'écosystème et, partant, cela le rend plus vulnérable et moins capable d'adaptation. À long terme, ce n'est peut-être pas la meilleure option adaptative pour la communauté, car il y a perte de revenu.

Comme le décrit les figures 10a et 10b, la complexité des impacts et leurs interactions avec les autres activités socioéconomiques devraient être prises en compte dans l'examen des stratégies d'adaptation possibles. L'intégration des considérations sociales ne devrait pas constituer une composante distincte de cette vue intégrante de la communauté. Les impacts possibles du changement climatique et les mesures d'adaptation offertes à la communauté doivent être pris en compte en termes de leurs répercussions économiques à court et à long terme. Par exemple, l'enrichissement des plages (figure 10b) peut être envisagé comme une réaction actuelle à l'erosion des côtes pour maintenir le tourisme dans la communauté mais, à long terme, il ne serait plus acceptable une fois l'élévation du niveau de la mer intégrée dans les prévisions. La construction résidentielle le long de la côte devrait être planifiée en fonction des tendances de l'élévation du niveau de la mer et des ondes de tempête qui peuvent survenir. À court terme, la protection à l'aide de barrières physiques et la réparation des dommages après une tempête restent possibles. Elles ne sont peut-être pas actuellement considérées comme un fardeau économique pour la communauté, les compagnies d'assurances et le gouvernement provincial. Cependant, avec l'augmentation des risques d'inondation et de dommages, on s'attend à ce que s'imposent d'autres stratégies d'adaptation, bien que plus coûteuses et plus considérables en matière de changements sociaux. Les changements seront provoqués au fil des ans par divers stimulants, dont la planification, les régimes d'assurance, les politiques gouvernementales et les dommages matériels. Combien de fois une personne peut-elle reconstruire sa maison? La figure 10b illustre certains des résultats possibles des décisions prises par des personnes dans les communautés. Tandis que, dans certains cas, comme il est démontré plus haut, les changements à court terme peuvent mener à des impacts négatifs; d'autres décisions telles que la protection du quai contre l'élévation du niveau de la mer et les ondes de tempête, peuvent mener à un changement positif pour les activités de pêche (figure 10b).

4.9.3.3 Mesures d'adaptation potentielles et évaluation des impacts environnementaux

Lors de cette étude, les communautés ont longuement discuté des changements qui sont survenus au fil du temps dans l'écosystème côtier et elles ont mentionné la perte de caractéristiques naturelles de protection comme les dunes, les marais et les quais (souvent endommagés ou détruits par les tempêtes). Il y a déjà eu de tels impacts par le

passé alors que le climat changeait naturellement. Cependant, dans les dernières décennies, ils se sont produits en plus grand nombre pour deux raisons : les impacts du changement climatique sont plus manifestes et le développement humain impose aux zones côtières des pressions accrues. Cet état de choses a mené à d'autres questions, qui n'ont pas été examinées ici, comme le problème de la disponibilité de l'eau douce et le changement des régimes de pollution lié à la prolifération des chalets et des maisons permanentes sur la côte. Il demeure des incertitudes et un certain scepticisme quant aux causes réelles de ces changements, et les intervenants croient souvent qu'ils ont besoin davantage de données pour prévoir les effets et prendre une décision.

Jusqu'à tout récemment, le manque de compréhension des impacts et l'intégration limitée des communautés et des questions de changement climatique dans les discussions sur les projets de développement et la planification ont infligé des dommages et des pressions aux régions côtières, qui sont devenues plus vulnérables au changement climatique. Face aux impacts du changement climatique et principalement faute de connaissances et d'outils pour les évaluer, le premier réflexe des répondants est de résister et de réparer les dommages. Ils ont peur de perdre leurs projets, leurs attractions ou leurs maisons. Bien qu'il s'agisse d'une réaction normale, elle n'enlève rien au fait que, à plus long terme, les impacts du changement climatique augmenteront et feront croître la vulnérabilité de la communauté, à moins que sa capacité d'adaptation ne soit renforcée.

Pour la plupart des communautés, passer du cadre actuel de prise de décisions et de planification à un système de gestion plus adaptative est un processus exigeant. La plupart sont d'avis qu'il faut améliorer les liens entre la solidarité communautaire, la coopération, l'aide mutuelle, les services de soutien et l'aide gouvernementale pour faire face aux effets du changement climatique et des phénomènes extrêmes. Pour les promoteurs et les décideurs, il s'agit de disposer d'outils mieux intégrés, tels que les modèles décisionnels participatifs ou l'évaluation intégrée des impacts environnementaux, assortie de considérations relatives au changement climatique, pour accroître la durabilité et la capacité d'adaptation de la communauté à long terme.

4.9.3.3.1 Évaluation des impacts environnementaux (EIE) en tant que moyen d'accroître la capacité d'adaptation

Le changement climatique demeure un concept difficile à saisir pour la plupart des gens, non seulement pour le grand public, mais également pour les promoteurs, les décideurs et l'industrie. Les répondants ont avancé plusieurs raisons, y compris la difficulté de penser au changement à long terme et à l'ampleur de ces changements (certains se produisant lentement et d'autres ont un effet catastrophique rapide). Lors d'une EIE, bien que la plupart des consultants prennent en compte les impacts du changement climatique, leur intégration dans le processus demeure limitée. Comme le signale Lee (2001), la communication à la population des scénarios et des impacts potentiels demeure difficile, et il est souvent plus facile pour les intervenants des EIE et les promoteurs de projets d'examiner les données historiques que de travailler avec les tendances du climat et des écosystèmes. La plupart des prévisions se fondent sur des données à court terme ou historiques, avec un taux de récurrence constant des tempêtes, même s'il a changé au cours de la dernière décennie. Il n'est donc pas surprenant que la plupart des projets nécessitant une évaluation des impacts environnementaux n'incluent pas les impacts du changement climatique et l'adaptation

de ce changement. La vision à long terme du projet devrait déjà en partie être prise en compte dans une analyse cumulative mais, par manque de temps, de financement ou de connaissances, le changement climatique en est souvent omis ou se limite à de vagues possibilités. Il n'est donc alors pas surprenant si les considérations sociales à long terme du changement climatique ne sont pas prises en compte car cette étape demanderait une meilleure compréhension des gens et une meilleure participation publique. Comme on le décrit ici, l'intégration des considérations sociales aux composantes biophysiques exige que le promoteur du projet et l'évaluateur non seulement comprennent les impacts du changement climatique et les intègrent dans l'évaluation, mais aussi veillent à ce que la communauté dans laquelle le projet doit être réalisé comprenne ces mêmes problèmes et puisse contribuer par des discussions, des entrevues, des enquêtes et des tables rondes à l'établissement d'un équilibre entre les gains économiques et les impacts sur l'écosystème et la communauté.

Les intervenants de l'EIE ont grandement besoin de principes directeurs et de protocoles pour l'évaluation du changement climatique et l'inclusion de considérations sociales. Bell *et al*. (2002) ont recommandé des principes directeurs pour intégrer le changement climatique dans le processus d'évaluation des impacts environnementaux. Les lignes directrices vont de l'évaluation de la nécessité de prendre en compte le changement climatique à l'évaluation des risques des impacts potentiels en fonction des scénarios de changement climatique disponibles pour la région. L'intégration des considérations sociales pourrait être ajoutée à ces lignes directrices de différentes façons. La figure 11 décrit les phases représentatives d'une EIE; elle comprend les différentes composantes qui pourraient être intégrées afin de mieux tenir compte des perceptions sociales et des réactions des communautés, ainsi que des impacts du changement climatique dans le développement d'un projet. Étant donné les résultats obtenus dans la présente étude, il pourrait être important de rappeler à tous les décideurs et promoteurs l'importance de tenir une assemblée publique avant même de soumettre le projet, ce qui signifie que, dès la première étape de la planification et de la décision d'un projet (n^{o} 1 dans la figure 11), la meilleure approche pourrait être de consulter le public et de comprendre ses préoccupations, ce qui devrait être fait non seulement pour le changement climatique, mais également pour tous les autres aspects qui pourraient influer sur la durabilité du projet et sur ses impacts environnementaux. Par ailleurs, une telle première étape peut aider à accroître la capacité d'adaptation de la communauté.

Lors des séances habituelles de consultations publiques tenues pour déterminer la portée et pour identifier et définir les composantes environnementales potentielles, si le changement climatique est envisagé, les considérations sociales devraient également être incluses. Il s'agirait d'abord d'évaluer le degré de compréhension et les perceptions de ce que pourraient être les impacts du changement climatique sur la région dans laquelle le projet est prévu (n^{o} 2 dans la figure 11). Puisqu'il est très probable que les impacts du changement climatique entraînent des problèmes de planification, les prochaines étapes (effets cumulatifs, atténuation et surveillance) devraient également prendre en compte le changement climatique et la capacité de la communauté à réagir à ses impacts (n^{o} 3 et n^{o} 4 dans la figure 11).

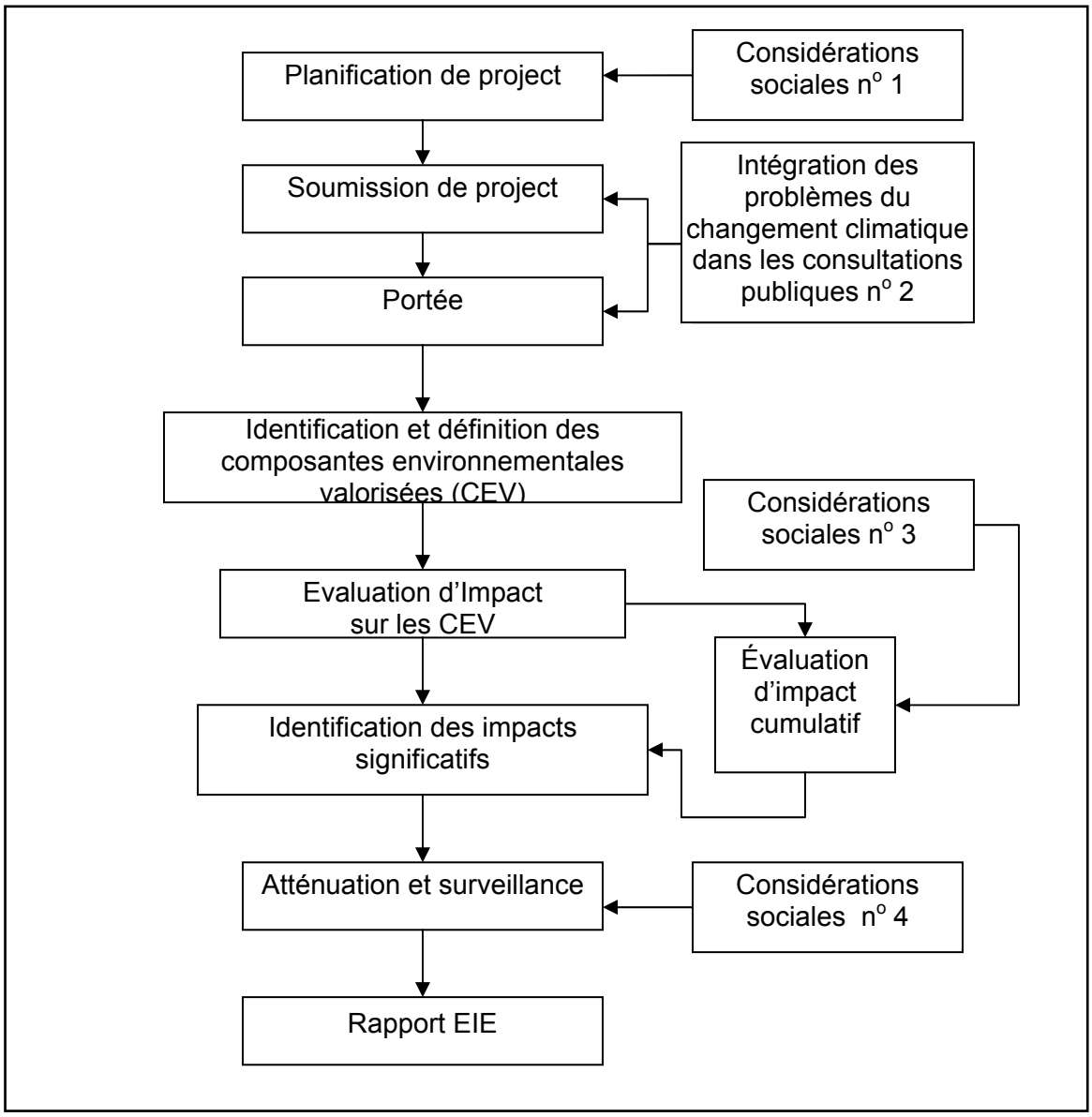


Figure 11. En matière de changement climatique, intégration de quelques considérations sociales dans un processus typique d'évaluation d'impact environnemental. La question principale est d'augmenter la capacité adaptative et de réduire la vulnérabilité des nouveaux projets de développement dans les communautés côtières.

Ces étapes peuvent être facilitées si les différents intervenants participent au projet dès sa planification. Comme on l'a mentionné précédemment, les personnes qui vivent depuis plusieurs années dans une région comprennent mieux les changements passés. Elles sont habituellement mieux préparées à s'adapter aux changements. Par exemple, dans cette étude, les citoyens plus âgés ont fait remarquer que, au cours des derniers siècles, sinon des dernières décennies, les nouvelles familles établissaient leurs maisons à l'extrémité du terrain la plus éloignée de la côte, afin d'éviter les tempêtes, les inondations et l'erosion des côtes (à un minimum de 200 à 300 mètres de la côte). Ces connaissances ont leur utilité dans l'élaboration de nouvelles stratégies ou façons de

diminuer les problèmes liés au changement climatique. À cette étape-ci, le savoir local traditionnel pourrait être précieux.

Cependant, comme les considérations sociales sont très exigeantes, elles ont été réduites à un minimum dans la plupart des projets, souvent à cause de contraintes financières ou par manque de temps. Le processus décisionnel comporte plusieurs niveaux de participation publique (Hance *et al*., 1990). Certains types de consultations publiques ne montrent que les intentions écologiques des promoteurs, mais ils ne tiennent habituellement pas beaucoup compte des préoccupations du public. À l'autre extrême, ils pourraient devoir consulter la population à chaque étape du processus. Dans ce cas-ci, la population a reçu les informations pertinentes et a été informée de toutes les solutions de rechange disponibles pour étudier le projet et les effets que le changement climatique pourrait avoir sur lui. Ce type de participation publique sera probablement coûteux et pourrait être très lent. Surtout, il n'est pas approprié pour la résolution immédiate d'un problème. Le principal défi consiste à définir une stratégie dans laquelle le processus décisionnel et les mesures durables seraient bien équilibrés. De plus, il est essentiel de définir les enjeux des communautés. Il est clair que différents projets pourraient nécessiter des niveaux différents de considérations sociales. Dans le même ordre d'idées, il pourrait être efficace d'intégrer les résultats actuels aux lignes directrices et à la stratégie déjà utilisées par Bell *et al*. (2002).

Bien que le changement climatique soit un phénomène mondial, les mesures environnementales (atténuation et adaptation) devront être prises à l'échelle locale. Les systèmes biophysiques, y compris les ressources et les services environnementaux naturels, devront changer ou s'adapter, ce qui aura des conséquences directes et indirectes sur la société. Les conditions climatiques auront un effet direct sur les réactions sociales, culturelles et économiques et sur la capacité potentielle des populations humaines (Mendis *et al*., 2003) à faire face aux influences du climat sur les nouveaux projets de développement. L'intégration complète des considérations socioéconomiques aux impacts biophysiques dans l'évaluation des projets est donc un ingrédient nécessaire de l'élaboration de mesures à l'échelle locale. Il importe d'aller au-delà des soucis qui nous assaillent en matière de changement climatique et d'en faire une évaluation sociale. Cette limitation tient en partie au fait que, même si les considérations sociales et culturelles devraient être intégrées aux scénarios, la plupart des données et des mesures demeurent superficielles. Il y a eu de nombreuses études de cas en recherche sur le changement climatique au Canada (p. ex. Cohen, 1994, 1995; Etkin, 2001; Riedlinger, 2001, Berkes *et al*., 2002, etc.) mais, comme l'ont constaté nombre de participants aux ateliers et aux conférences, nous devons passer de la recherche sur les effets du changement climatique au développement de la capacité des communautés à faire face à de nouveaux projets et à leur intégration dans la vie des citoyens, pendant la longue période sur laquelle le changement climatique aura des conséquences importantes.

4.9.3.3.2 Adaptation : considérations financières et temporelles

L'analyse actuelle vise différentes périodes entre 2020 et 2100. Cette approche est très commune dans la plupart des études sur le changement climatique, et l'évaluation nationale a ses limites. Ce serait une erreur pour les communautés de croire qu'après 2100 les problèmes liés au changement climatique vont disparaître. Au contraire, même dans un scénario modéré, on s'attend à ce qu'après 2100 les effets du changement

climatique puissent se manifester à plus grande échelle encore. Même si les stratégies d'adaptation actuelles examinées dans cette étude sont importantes et pourraient nécessiter un fort degré d'engagement humain et financier, on peut imaginer qu'à plus long terme, pour les communautés côtières, d'importantes questions économiques vont surgir. L'avenir de nos communautés côtières est-il durable? Cette question doit être sérieusement étudiée par les planificateurs, les promoteurs et les décideurs. Ni les perspectives de gains financiers à court terme de la plupart des promoteurs et planificateurs ni les visées politiques actuelles ne se prêtent à l'amélioration continue de la capacité d'adaptation des communautés au changement climatique. L'évaluation des coûts des options d'adaptation est plus générale que l'estimation des coûts d'immobilisations associés à l'option à court terme. Les coûts supplémentaires, qu'ils soient sociaux, environnementaux ou économiques, doivent également être pris en compte. De plus, les avantages des mesures proposées devraient également être pris en considération et intégrés dans le cadre décisionnel. La section 4.8 de la présente étude (Stratégies d'adaptation) aborde plus en détail les coûts et les bénéfices dont il faudrait tenir compte pour choisir une stratégie d'adaptation.

Les figures 6 et 10 de ce chapitre indiquent que de nombreuses options s'offrent aux communautés. Cependant, les figures de ce genre n'abordent pas certaines questions comme l'horizon temporel, les intérêts de la population et les limites financières ou réglementaires auxquelles sont confrontées les communautés. Les diagrammes montrent un modèle linéaire, mais il est important de noter que les figures devraient être considérées comme itératives et dépendantes des impacts; il faudrait donc amorcer un nouveau cycle d'itérations analytiques, dans lequel certaines des stratégies d'adaptation pourraient être privilégiées. Par exemple, à la Dune de Bouctouche, il a été décidé en 2005 que la reconstruction de la passerelle à un autre endroit était la meilleure stratégie pour s'adapter à l'augmentation de fréquence des ondes de tempête (les impacts du changement climatique ont-ils été examinés dans l'EIE, si l'on en a fait une?). Cette approche est financièrement réalisable dans les conditions actuelles, avec les indemnisations des compagnies d'assurance et un écosystème qui semble assez stable pour supporter cette infrastructure. Il n'est cependant pas certain que, dans vingt ans, la reconstruction soit encore une option. Il faut donc dès maintenant tenir compte des types de stratégies d'adaptation qui peuvent être mises en œuvre à long terme pour ces systèmes.

4.9.3.3.3 Intégration avec la Politique de protection des zones côtières pour le Nouveau- Brunswick

Dans la dernière décennie, le gouvernement du Nouveau-Brunswick a élaboré une politique de protection des zones côtières, destinée à protéger plus de 5 500 kilomètres de côtes dans l'intérêt des 60 % de la population du Nouveau-Brunswick qui habitent dans les communautés côtières. Les secteurs économiques dont dépendent ces communautés sont axés sur les ressources, comme la pêche et l'aquaculture, et sur le tourisme. Le gouvernement provincial est conscient que la dernière décennie a vu croître les pressions exercées pour le développement des zones côtières, qui menacent la survie des écosystèmes naturels où sont présentes de nombreuses espèces indigènes, dont des espèces en péril. De plus, grâce à une meilleure connaissance des marais salés et d'autres composantes de l'écosystème côtier, il est clair que la protection est un élément essentiel de leur résilience et de la capacité des communautés à rester durables. La politique inclut deux zones pour la protection des régions côtières. La

zone A représente les zones situées le plus près de l'eau (zone centrale). La zone B est composée d'une zone tampon de 30 mètres située immédiatement après la zone A.

L'expression *changements climatiques* figure dans la raison d'être de la politique mais son intégration reste faible. La présente étude peut contribuer grandement à la discussion sur l'intégration des scénarios de changement climatique, les impacts et les futures stratégies d'adaptation dont le gouvernement provincial devra tenir compte pour améliorer la politique proposée.

À partir des résultats présentés ici, il est clair que la zone tampon de 30 mètres ne sera pas suffisante pour assurer la protection des écosystèmes naturels tels que les marais salés et les systèmes dunaires à moins que celle-ci puisse bouger en fonction du niveau de la mer et non à partir d'une base établie dans les années 2000. Selon l'étude présente, pour certaines zones, la politique devrait être modifiée afin d'intégrer le phénomène, qui touche plus la côte sud-est du Nouveau-Brunswick que sa côte nord-est. Il est donc recommandé que la politique proposée et le zonage soient réexaminés à la lumière de ces nouveaux résultats. De plus amples discussions devraient être initiées afin de définir quel type de stratégies d'adaptation pourrait être adopté avec le changement de location de la zone. Bien que, dans certaines régions où les développements côtiers sont faibles, la retraite soit possible (mais il faudra déterminer qui paiera la facture), dans d'autres cas, cette option ne sera vraisemblablement pas possible et de nouvelles adaptations devront être établies pour assurer l'implantation de solutions justes et équitables. Il importe de bien appliquer la politique pour mieux intégrer la communauté de l'EIE, tout en tenant compte de l'effet du changement climatique et de l'adaptation à celui-ci. Cela devrait contribuer à mettre en perspective les futures stratégies.

Il est maintenant bien établi par cette étude qu'en réagissant au changement climatique, le scénario de maintien du statu quo est insuffisant et que le risque social doit être intégré dans les projets de développement afin d'éviter les problèmes socioéconomiques à moyen et à long terme. De même, le scénario de maintien du statu quo pour la politique ne pourrait pas aider à protéger les écosystèmes naturels à long terme. Malgré l'incertitude qui les entoure, les prévisions à long terme du changement climatique ne devraient pas restreindre la possibilité de se pencher sur les impacts environnementaux potentiels. Des méthodologies telles que l'EIE, qui permettent d'intégrer les données sur les écosystèmes et les scénarios de changement climatique à l'échelle des communautés, peuvent aider à réduire ces défis et à mieux atténuer les effets possibles du changement climatique et à mieux préciser l'engagement envers les stratégies de surveillance au fil du temps, une fois un projet approuvé.

4.9.4 Sommaire et conclusions

4.9.4.1 Résumé des conclusions et des tendances communes de ces études de cas

Dans la zone côtière choisie pour cette étude, différents scénarios, de l'écotourisme aux projets de développement suburbain, fournissaient des exemples de la façon dont le changement climatique peut perturber leur durabilité. L'intégration, dans l'évaluation environnementale, de la dimension humaine sous l'angle des risques sociaux et

économiques pourrait aider les planificateurs et les décideurs de ces communautés face aux projets futurs. Par le passé, peu de projets ont intégré ces aspects dans un MAN de haute précision. Cependant, tel que démontré ici, une telle approche peut permettre de mieux comprendre les liens entre les différentes composantes de l'écosystème et les communautés humaines. Son principal avantage était également de donner naissance à des recommandations sur les façons d'accroître la capacité d'adaptation des communautés et de réduire les vulnérabilités au changement climatique grâce à des outils proposés tels que l'EIE et à des stratégies telles que la protection, l'évitement ou le retrait.

Une des explications fréquentes du peu d'inclusion des impacts du changement climatique et de l'adaptation de celui-ci dans le processus de prise de décisions et de planification de la communauté est le manque de méthodes et d'orientations claires sur la façon d'intégrer ces paramètres dans le processus de planification. On en veut pour exemple le fait que la plupart des communautés ne comprennent pas entièrement les questions de changement climatique et leurs conséquences possibles sur les communautés. Parmi les outils qui peuvent aider les communautés, le processus d'EIE devrait être renforcé pour que les considérations de changement climatique soient incluses avant le lancement de nouveaux projets de développement. De même, on devrait tenir des discussions sur le besoin d'améliorer la souplesse et la gestion adaptative de la politique relative à la zone côtière du Nouveau-Brunswick en vue de trouver de meilleures réponses d'adaptation aux impacts du changement climatique.

La capacité d'adaptation est liée aux mesures que les communautés pourraient adopter pour favoriser les projets de développement durables et rationnels. Certaines des composantes de l'écosystème peuvent être contrôlées et gérées alors que, pour d'autres composantes, les communautés ne peuvent que s'adapter aux changements vu que le contrôle des impacts n'est pas possible. De plus, les impacts du changement climatique sont complexes puisqu'ils peuvent influer, soit directement soit indirectement, sur certaines composantes de l'écosystème. Dans ce projet, le degré de vulnérabilité variait grandement selon l'emplacement, l'exposition, la capacité d'adaptation et la résilience de l'infrastructure. Pour la dune et le village de Bouctouche, le tourisme le long de la côte est certainement plus à risque que de nombreuses autres activités socioéconomiques de la région comme l'agriculture. D'un autre côté, les résultats de Pointe-du-Chêne ont montré que les infrastructures humaines (logements et quai) ont toutes été rendues plus vulnérables par l'augmentation des pressions exercées par les projets de développement dans la dernière décennie. Il est dans ce cas nécessaire d'améliorer la planification, puisque davantage d'activités socioéconomiques peuvent être menacées par les impacts du changement climatique dans un proche avenir.

Ce projet de recherche a notamment révélé que, en l'absence de données pertinentes, les politiques et les plans d'adaptation risquent de perdre de leur efficacité. Il est question ici aussi bien d'informations sur les changements climatiques et le forçage que de renseignements sur les impacts biophysiques observés dans les secteurs côtiers. Il est tout aussi crucial d'obtenir suffisamment d'informations pour pouvoir intégrer les facteurs sociaux dans les plans d'adaptation ainsi que dans les politiques et plans généraux qui tiennent compte de l'impact possible des changements climatiques. Dans le contexte de la planification communautaire, les changements climatiques sont rarement l'enjeu principal, mais, en tenant compte des impacts possibles et en prenant des mesures

d'adaptation proactives dans toutes les activités d'évaluation environnementale, de planification et d'aménagement, il est possible d'éviter des erreurs coûteuses. Dans de nombreux cas, cette façon de procéder donne également lieu aux stratégies d'adaptation les plus rentables.

Même si l'information n'est toujours pas complète, la visualisation de scénarios à l'aide de cartes illustrant différents résultats permet aux participants des collectivités d'évaluer leurs propres risques en regard d'une éventuelle réalité future. Les modèles descriptifs peuvent être progressivement quantifiés à l'aide du niveau de risque, d'exposition, de capacité d'adaptation et de vulnérabilité des composantes des communautés, ce qui aiderait à définir les degrés réels de capacité d'adaptation et de vulnérabilité des communautés et de leurs écosystèmes naturels.

4.9.4.2 Enseignements tirés de ces exemples

En résumé, ce projet a grandement contribué à l'élaboration de méthodes et de recommandations permettant d'intégrer les considérations sociales et environnementales des impacts du changement climatique dans la planification, le développement et la durabilité futurs de ces communautés. Cependant, ces études ont des limites. Il faut admettre que, celle-ci s'inscrivant dans un important projet de recherche qui fait intervenir plusieurs collaborateurs et diverses subventions, le degré de raffinement de l'acquisition et de l'analyse des données a pu dépasser celui d'une analyse ou d'une étude de cas normale. Les détails et l'avantage des données MAN LiDAR et leur intégration aux scénarios de changement climatique ne sont cependant pas à la portée de toutes les communautés. On pourrait toutefois recommander, pour les projets de développement côtier, surtout ceux comportant d'importantes répercussions socioéconomiques, d'envisager une telle approche plus détaillée, comportant non seulement des considérations sociales, mais également l'acquisition et l'analyse de données plus ciblées. Sans ces données, les résultats de la présente étude auraient pu être limités. Les défis de l'intégration peuvent également limiter certaines recommandations pendant ce processus puisqu'elle nécessite davantage de connaissances ou d'expertise de la part de l'équipe. Par exemple, des questions telles que l'infiltration de l'eau de mer dans la nappe phréatique n'ont pas été examinées par manque de financement et de temps. Cependant, de même que, dans les années 1990, la plupart des sociétés d'experts-conseils en évaluation ont commencé à utiliser les modèles SIG à des fins de cartographie et d'analyse, on peut raisonnablement s'attendre à ce que les aspects socioéconomiques et biophysiques de l'évaluation y seront progressivement intégrés. L'intégration est toutefois une étape difficile à réaliser, et nombre de communautés, d'évaluateurs, de décideurs et de planificateurs reculent devant la complexité de l'analyse des données et de la modélisation. De plus, l'intégration des données en vue de l'élaboration de modèles cause-effet exhaustifs est souvent réalisée à la dernière minute sous prétexte que ce n'est pas si important et / ou qu'il n'y a pas assez de temps et de ressources. Les résultats peuvent cependant être utilisés par les communautés pour mieux visualiser les différents problèmes, ainsi que les décisions à prendre.

4.9.4.3 Défis et questions concernant la mise en œuvre de mesures et de stratégies d'adaptation

La plupart des projets sur le changement climatique se sont concentrés sur les sciences biophysiques et, le plus souvent, sur des données récemment recueillies sur le terrain ou tirées de la documentation. Avec le changement climatique, il devient difficile de savoir

où trouver et comment utiliser les informations pertinentes pour mieux évaluer les impacts du changement climatique sur un projet de développement. Dans la plupart des cas, on utilise des données historiques et météorologiques et des extrapolations pour prévoir les impacts potentiels. Les données provenant du gouvernement fédéral comprennent des cartes de scénarios de changement climatique, mais il faut disposer d'une formation minimale pour comprendre les tendances et les menaces réelles pour les communautés. Cependant, ce n'est peut-être pas la solution la plus appropriée lorsque de nouveaux renseignements deviennent accessibles et montrent que les impacts du changement climatique pourraient être plus complexes que prévus. Par exemple, on pensait que, sur la côte, l'intensité des tempêtes était le principal facteur de changement, mais nous croyons que le nombre de tempêtes plus petites pourrait être davantage un problème. Les communautés (et leurs dimensions socioéconomiques) pourraient donc être davantage touchées par la fréquence des tempêtes que par les conséquences des tempêtes plus fortes mais plus rares. Les incertitudes imposent aux décideurs des limites quant à la façon d'interpréter les données. De plus, la plupart du temps, les analyses sont restreintes et n'incluent que les structures physiques, l'environnement aquatique, la faune et la flore, ou, à l'inverse, que les composantes socioéconomiques des communautés. Les deux aspects sont rarement entièrement pris en compte et intégrés ensemble dans le processus, même s'ils peuvent jouer des rôles cruciaux dans le processus décisionnel et l'acceptabilité sociale des aménagements proposés.

Les considérations sociales des impacts du changement climatique sur un projet de développement devraient faire intervenir le degré de sensibilisation de la communauté à l'égard du changement climatique. De plus, l'éducation, le mode de vie et la classe sociale sont tous des facteurs qui peuvent influer sur les résultats de l'évaluation. Comme le mentionnent d'autres études (Barrow, 2000), ces données démographiques devraient être soigneusement consignées, puisqu'elles peuvent influer sur le degré de compréhension et donc sur les plans des projets. Dans cette étude, les nouveaux arrivants et les citoyens aisés des communautés étaient souvent moins influencés par les résultats que les gens dont la famille y vit depuis des générations et croyaient qu'ils pouvaient tout de même donner suite à des projets sur la côte même si les coûts devaient en être plus élevés à long terme. La possibilité de compter sur les assurances et d'autres subventions donne à certaines catégories de citoyens l'impression que l'homme peut toujours surmonter les impacts du changement climatique. Cette perception et cette assurance peuvent se transmettre aux promoteurs ou venir d'eux, influant sur la planification et l'évaluation et sous-estimant graduellement le besoin de prendre en compte les considérations sociales ou biophysiques du changement climatique.

Les résultats de ces activités montrent qu'en matière de perceptions et de considérations sociales, et à partir des informations issues de l'analyse des entrevues et de la présentation dans les trois groupes de discussion, cinq défis ou questions ont été soulevés pendant la discussion :

- besoin de croissance et de développement économiques (élément moteur de l'absence de réaction);
- compréhension erronée des impacts potentiels et de leur gravité pour les communautés côtières (c.-à-d. risques réels du changement climatique);

- résistance des promoteurs, des nouveaux arrivants et des décideurs face aux nouvelles informations (surtout en ce qui concerne les impacts et l'adaptation au changement climatique);
- restrictions et fardeau supplémentaire imposés par la nouvelle politique relative à la zone côtière;
- peur du changement en raison des dommages à l'infrastructure.

4.9.5 Références

Adger, W.N. 2003. Social aspects of adaptive capacity. *In* J.B. Smith, R.J.T. Klein & S. Huq (dir. de publ.). Climate change, adaptive capacity and development. Imperial College Press, Londres, R.-U. : 29-50.

Allen Consulting Group. 2005. Climate Change Risk and Vulnerability: Promoting an efficient adaptation response in Australia. Rapport à l'Australian Greenhouse Office, ministère de l'Environnement et du Patrimoine. Canberra. 159 p.

Barrow, C.J. 2000. Social Impact Assessment. An Introduction. London : Éditions Arnold et New York : Éditions Oxford University.

Bell, A., Collins, N., Duncan, S. et Young, R. 2002. Practitioner's guide to incorporating climate change into the environmental impact assessment process. Rapport. Nova Scotia Climate Change Initiative. 23 p.

Berkes, F., *Colding, J. et Folke, C.* 2002. Navigating social-ecological systems: building resilience for complexity and change. Cambridge University Press, Cambridge, R.-U.

Bowles, R.T. 1992. Single-industry resource communities in Canada's north. Oxford University Press, Oxford, R.-U.

Cohen, S. 1994. Development of the MBIS Program. *In* Cohen, S. (dir. de publ.) Rapport provisoire n° 2 de l'étude d'impact sur le bassin du Mackenzie #2 : 35-38.

Cohen, S. 1995. The potential effects of climate change in the Peace, Athabasca and Salve River basins: a discussion paper. Rapport n° 65 du projet d'étude des bassins des rivières du Nord . Edmonton, Alberta.

Costanza, R.; Costanza, R.; Villa, F.; Villa, F. 2000. Design of multi-paradigm integrating modelling tools for ecological research Environmental Modelling & Software, 15 (2): 169-176,

Danard, M., Munro, A. et Murty, T. 2003. Storm surge hazard in Canada. Natural Hazards, # 28 (2-3): 407-434.

Etkin, D. 1999. Planning in a climate of change: choices under uncertainty. *In* Wall, G. (dir. de publ.) Impacts of climate change on resource management in the north. Université de Waterloo. Waterloo, Ontario.

Etkin, D., Soren E. Brun; Amir Shabbar; Paul J. 2001. Tornado climatology of Canada revisited: tornado activity during different phases of ENSO. International Journal of Climatology 21 (8): 915-938.

Forbes, B.C., Fresco, N., Shvidenko, A., Danell, K. et Chapin, F.S. III. 2004. Geographic Variations in anthropogenic drivers that influence the vulnerability and resilience of social-ecological systems. Ambio 33: 377-382.

Giangioppi, M. 2004. Étude du transport des sédiments sur la Dune de Bouctouche, Nouveau-Brunswick. Mémoire de maîtrise, Université de Moncton, Moncton, Nouveau-Brunswick.

Hance, B.J., Chess, C. et Sandman, T.M. 1990. Industry risk communication manual: improving dialog with community. Boca Raton, FL : Lewis Publishers. 119 p.

Hewitt, P. (1997). Games in instruction leading to environmentally responsible behaviour. *The Journal of Environmental Education, 28*(3), 35-37.

Hungerford, H.R. et Peyton, R. B. (1976). *Teaching environmental education.* Portland, ME : Weston Walch.

Johnson, D.E., et Dagg, S. 2003. Achieving public participation in coastal zone environmental impact assessment. J. Coastal Conserv. 9: 13-18.

Kusel, J. 2001. Assessing well being in forest dependent communities. *In* Gray, G.J., M.J. Enzer et J. Kusel (dir. de publ.). Understanding community-based forest ecosystem management. Haworth Press, New York: 359-382.

Lee, R.J. 2001. Changement climatique et évaluation environnementale. Partie 1: Examen des facteurs de changement climatique dans des évaluations environnementales antérieures choisies . Collection de monographies en recherche et développement, Recherches appuyées par l'Agence canadienne d'évaluation environnementale. Ottawa. 87 pages.

Mendis, S., Mills, S. et Yantz, J. 2003. Building community capacity to adapt to climate change in resource-based communities. Service canadien des forêts, Saskatchewan. 85 pages.

MEGLNB, 1998. Politique de protection des zones côtières pour le Nouveau-Brunswick, 15 p

Nadeau, S. 2002. Characterization of community capacity in a forest-dependent community: the case of the Haut-St.-Maurice. Thèse de doctorat, Oregon State University, Corvallis, OR.

Nicholls, R.J. 2002. Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. Physics and Chem of the Earth 27: 1455-1466.

Ouranos. 2004. S'adapter aux changements climatiques. Ouranos, Montréal (aussi www.ouranos.ca). 83 p.

Paillé, P. 1996. De l'analyse qualitative en général et de l'analyse thématique en particulier. *In* Archambault, J., et P. Paillé (dir. de publ. La recherche qualitative dans la santé, Recherches qualitatives, 15:181-194.

Prescott-Allen, R. 2001. The wellbeing of nations: a country-by-country index of quality of life and the environment. Island Press, Washington, DC. USA.

Riedlinger, D. 2001. Community-based assessment of change: contributions of Inuvialuit knowledge to understanding climate change in the Canadian Arctic. Natural Resource institute, Winnipeg, Manitoba.

Smit, B., et Pilifosova, . O. 2001. Adaptation to climate change in the context of sustainable development and equity. *In*. McCarthy, J., O. Canziana, N. Leary, D. Dokken et K. White (dir. de publ). Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press, Cambridge, R.-U: 877-912.

Statistique Canada. 2001. *Profil pour le Canada, les provinces, les territoires, les divisions de recensement, les subdivisions de recensement et les aires de diffusion, recensement de 2001.* Catalogue No. 95F0495XCB01002.

Vasseur, L., Leblanc, S., Mazerolle, D. et Tremblay, É. en préparation. Long term salt marshes community assessment in Kouchibouguac national Pak of Canada. Soumis dans journal of Protected Areas. (avril 2006).

5.0 Annexes

Quatres series de cartes, telles que décrites plus bas, se retrouvent sur le CD.

Annexe A Cartes des périodes de récurrence pour les ondes de tempête sur la baie de Shediac

Cette section contient une série séquentielle de cartes de la zone côtière, de Cap-des-Caissie jusqu'à Bas-Cap-Pelé. Les cartes représentent l'étendue des inondations pour les périodes de recurrence de 2, 5, 10, 40 et 100 ans pour le niveau de la mer actuel (ligne bleu), et dans un scenario d'élévation de 60 cm du niveau de la mer (ligne rouge).

Annexe B Cartes d'inondation pour l'onde de tempête de janvier 2000

Cette section contient une série séquentielle de cartes de la zone côtière dans la région d'étude, du parc national Kouchibouguac jusqu'à Shemogue. Les cartes représentent les étendues d'inondation de la tempête du 21 janvier 2000, pour le niveau de la mer actuel (ligne bleue) et dans un scénario d'élévation de 60 cm du niveau de la mer (ligne rouge).

Annexe C Cartes d'érosion des côtes

Cette section contient une série de cartes démontrant les taux de déplacement du trait de côte dans le passé récent afin de mieux prévoir ses déplacements futurs, utilisant des photographies aériennes géocodée multidates (1944, 1971/1973 et 2001). D'autres séries ont été utilisées en fonction de besoins précis (1938, 1953, 1963, 1967, 1970, 1973, 1982 et 1995).

Annexe D Cartes d'habitat côtier

Cette section contient une série de cartes démontrant les changements dans la distribution des habitats côtiers, utilisant les photographies aériennes telles que décrites à l'Annexe C, ci-haut.