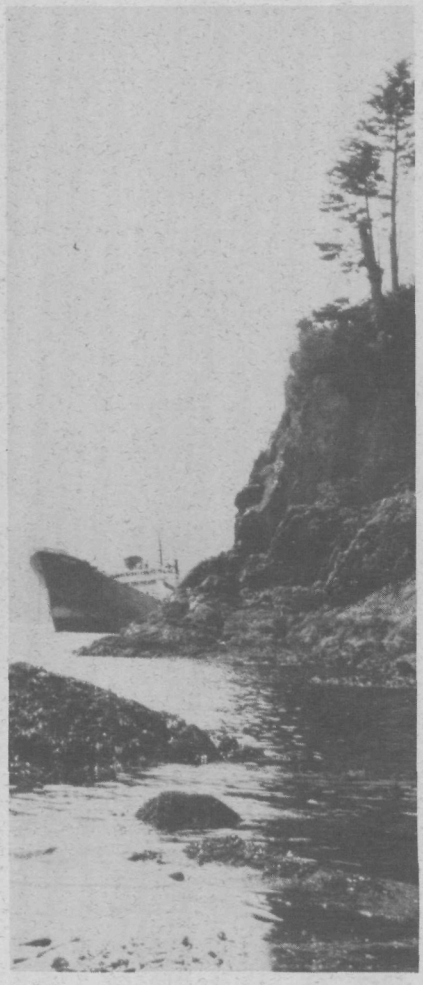
145924

Série de la Protection de l'environnement



Milieux côtiers canadiens, processus littoraux et nettoyage à la suite de déversements d'hydrocarbures

ENVIRONNEMENT CANADA
BIBLIOTHÈQUE
RÉGION DE QUÉBEC

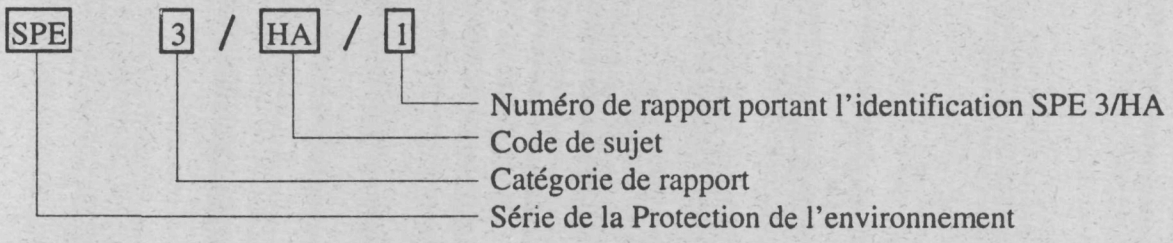
Rapport SPE 3/SP/5
Mars 1994

Canada

Environnement Canada Environment Canada

SÉRIE DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

Exemple de numérotation :



Catégories

1 Règlements/Lignes directrices/ Codes de pratiques
2 Évaluation des problèmes et options de contrôle
3 Recherche et développement technologique
4 Revues de la documentation
5 Inventaires, examens et enquêtes
6 Évaluations des impacts sociaux, économiques et environnementaux
7 Surveillance
8 Propositions, analyses et énoncés de principes généraux
9 Guides

Sujets

AG Agriculture
AN Technologie anaérobie
AP Pollution atmosphérique
AT Toxicité aquatique
CC Produits chimiques commerciaux
CE Consommateurs et environnement
CI Industries chimiques
FA Activités fédérales
FP Traitement des aliments
HA Déchets dangereux
IC Produits chimiques inorganiques
MA Pollution marine
MM Exploitation minière et traitement des minéraux
NR Régions nordiques et rurales
PF Papier et fibres
PG Production d'électricité
PN Pétrole et gaz naturel
RA Réfrigération et conditionnement d'air
RM Méthodes de référence
SF Traitement des surfaces
SP Déversements de pétrole et de produits chimiques
SRM Méthodes de référence normalisées
TS Transports
TX Textiles
UP Pollution urbaine
WP Protection et préservation du bois

Des sujets et des codes additionnels sont ajoutés au besoin. On peut obtenir une liste des publications de la SPE en s'adressant aux Publications de la Protection de l'environnement, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, Ottawa (Ontario) K1A 0H3.

Printed on recycled paper

Imprimé sur du papier recyclé

36084435F
Hz 145924

Milieux côtiers canadiens, processus littoraux et nettoyage à la suite de déversements d'hydrocarbures

par

E.H. Owens
OCC Ltd.

pour la

Division des urgences (Science)
Direction générale du développement technologique
Environnement Canada
Edmonton (Alberta)

et la

Direction des urgences environnementales
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)

TD
182
R46
3-SP-5

Rapport SPE 3/SP/5
Mars 1994

DONNÉES DE CATALOGAGE AVANT PUBLICATION (CANADA)

Owens, E.H.

Milieux côtiers canadiens, processus littoraux et nettoyage à la suite de déversements d'hydrocarbures

(Rapport ; SPE 3/SP/5)
Publ. aussi en anglais sous le titre : Canadian coastal environments, shoreline processes, and oil spill cleanup.
Comprend des références bibliographiques.
ISBN 0-662-99882-0
N° de cat. En49-14/3-5F

1. Déversements de pétrole -- Aspect de l'environnement -- Canada. 2. Mer -- Pollution par les hydrocarbures -- Canada. 3. Littoral -- Aménagement -- Canada I. Canada. Environnement Canada. II. Centre de technologie environnementale (Canada). Division des urgences-sciences. III. Coll.: Rapport (Canada. Environnement Canada) ; SPE 3/SP/5.

TD899.P408314 1994 363.73'82'0971 C94-980150-X

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1994
No de catalogue En 40-215/13-F
ISBN 0-662-98213-4
IMPRIMERIE BEAUREGARD LIMITÉE

Commentaires

Les personnes qui désirent faire part de leurs commentaires sur la teneur du présent rapport sont priées de s'adresser à :

Gary Sergy
Direction générale du développement technologique
Environnement Canada
4999, 98e Avenue, bureau 210
Edmonton (Alberta)
T6B 2X3

This publication is also available in English under the title *Canadian Coastal Environments, Shoreline Processes, and Oil Spill Cleanup.*

On peut s'en procurer d'autres exemplaires à l'adresse suivante :

Publications
Service de la protection de l'environnement (SPE)
Environnement Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0H3

Avis de révision

Le contenu du présent rapport a été revu par la Direction générale du développement technologique d'Environnement Canada, qui en a approuvé la publication. Cette approbation ne signifie pas nécessairement que son contenu soit conforme aux vues et aux politiques d'Environnement Canada. Toute mention d'une marque déposée ou d'un produit commercial ne constitue nullement une recommandation de la part d'Environnement Canada.

Le module français des publications du SPE, de la Section de la mise en valeur de la technologie, a assuré la rédaction-révision de ce rapport.

Résumé

*La zone côtière est un milieu dynamique; il est donc nécessaire, lors de l'élaboration de stratégies d'intervention pratiques et efficaces en cas de déversement, de comprendre les forces qui contribuent aux processus littoraux. Les côtes canadiennes comptent une grande variété de milieux, allant du 45e parallèle Nord à l'Extrême-Arctique, caractérisés par divers types de littoraux, notamment les falaises résistantes exposées de la partie est de Terre-Neuve et les marais abrités de la mer de Beaufort ou du lac Huron. L'approche adoptée dans le présent rapport vise à faire comprendre la dynamique et les processus physiques propres aux différentes côtes du Canada, y compris celles des Grands Lacs. Un aperçu régional du caractère général et des processus fournit une description des milieux côtiers et une introduction à la documentation que l'on peut consulter pour obtenir plus d'information sur un site ou un sujet donné. On y traite du devenir probable et de la persistance des hydrocarbures qui atteignent le littoral afin de fournir un cadre nécessaire à l'élaboration de stratégies d'intervention et au choix de mesures appropriées de nettoyage ou de traitement du littoral. Les expériences récentes lors des déversements de l'*Exxon Valdez *et du* Nestucca *et les études connexes du projet de déversement de pétrole à l'île de Baffin (BIOS, d'après «*Baffin Island Oil Spill*») et du déversement de l'*Arrow *en 1970, en particulier, ont permis d'enrichir nos connaissances sur toute la gamme des conditions possibles de mazoutage du littoral à la suite de déversements au Canada. Ces leçons sont intégrées dans l'étude du devenir des hydrocarbures échoués et des diverses options en matière d'intervention sur le littoral.*

Abstract

The coastal zone is a dynamic environment so that in developing practical and effective spill response strategies it is necessary to understand the forces that contribute to shore-zone processes. The coasts of Canada encompass a wide range of environments from 45°N to the high arctic and are characterized by a variety of shoreline types that include the exposed, resistant cliffs of eastern Newfoundland and the sheltered marshes of the Beaufort Sea or Lake Huron. The approach taken in this report is to provide an understanding of the dynamics and physical processes as they vary on the different coasts of Canada, including the Great Lakes. An outline of the general character and processes, on a regional basis, provides a description of the coastal environments and an introduction to the literature that can be consulted for more site- or topic-specific information. The likely fate and persistence of oil that reaches the shoreline is discussed to provide the framework for development of spill response strategies and for the selection of appropriate shoreline cleanup or treatment countermeasures. Recent experiences on the Exxon Valdez *and* Nestucca *spills and studies associated with the Baffin Island Oil Spill (BIOS) experiment and the 1970* Arrow *spill, in particular, have improved our understanding of the range of shoreline oiling conditions that may be experienced following spills in Canada. These lessons are integrated into the discussion on the fate of stranded oil and shoreline response options.*

Avant-propos

La mise en oeuvre de mesures d'intervention appropriées en cas de déversement d'hydrocarbures sur les côtes ou en mer repose sur une combinaison de connaissances environnementales, logistiques et opérationnelles. Avant l'échouement du Torrey Canyon *en 1967, qui a causé une importante marée noire, on n'avait guère accordé d'attention aux problèmes associés aux effets et au nettoyage de déversements accidentels majeurs. Au cours de la décennie qui a suivi cet incident, un effort considérable a été concentré sur l'élaboration d'une base de connaissances permettant à la fois de prévoir le devenir et les effets des hydrocarbures déversés et de choisir et appliquer les mesures d'intervention appropriées en mer et à terre. Au Canada, ces initiatives ont pris une nouvelle dimension à la suite du déversement causé par l'échouement du pétrolier* Arrow *dans la baie de Chedabucto, Nouvelle-Écosse, en 1970.*

Afin de faciliter la planification de mesures d'urgence en cas de déversement d'hydrocarbures au Canada, un rapport, préparé pour Environnement Canada en 1977, faisait le point sur l'état des connaissances relatives aux milieux côtiers et aux types de littoraux au Canada ainsi qu'aux méthodes de protection et de nettoyage du littoral (Owens, 1977a). Depuis la publication de ce rapport, les connaissances se sont considérablement enrichies, particulièrement en ce qui a trait aux régions côtières les plus reculées du Canada. Les secteurs privé et public ont effectué des levés (géologiques et biologiques) des littoraux, des expériences en laboratoire ou sur le terrain concernant les techniques d'intervention en cas de déversement et ont préparé des énoncés des incidences environnementales et des plans d'urgence en cas de déversement d'hydrocarbures, principalement en réponse aux activités prévues ou actuelles de forage exploratoire.

En ce qui concerne la base de connaissances sur les côtes canadiennes, de nombreuses reconnaissances aériennes régionales ont été effectuées, généralement sous forme de bandes vidéo, pour fournir des données utilisées dans les manuels d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures. Au cours de la période de 1978 à 1983, ces levés aériens ont couvert 40 000 km de littoral, notamment les côtes de la Nouvelle-Écosse, de l'Île-du-Prince-Édouard, de la partie est de Terre-Neuve, du Labrador, du nord-est de l'île de Baffin, du passage du Nord-Ouest, du golfe Amundsen, de la mer de Beaufort, du sud de la Colombie-Britannique et des Grands Lacs. Bon nombre de sections de ces côtes n'avaient encore jamais fait

l'objet d'études, de sorte que les levés vidéo constituent un relevé unique qui, pour la majeure partie, n'a pas encore été mis à jour.

L'étude originale constituait un compte rendu précis de l'état des connaissances concernant les déversements d'hydrocarbures et les mesures d'intervention à cette époque. Plusieurs études menées dans le cadre des opérations d'intervention après déversements, et associées à des expériences en laboratoire ou sur le terrain, ont considérablement modifié cette base de connaissances. En particulier, l'expérience de déversement de pétrole à l'île de Baffin (BIOS), le déversement du Nestucca *sur la côte pacifique de la Colombie-Britannique et le déversement de l'*Exxon Valdez *en Alaska, qui ont fourni de nouvelles données sur le devenir et le comportement des hydrocarbures déversés et sur les diverses options d'intervention.*

Étant donné les connaissances acquises au cours de ces levés et autres levés côtiers, et celles découlant d'études expérimentales et pratiques sur les techniques d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures, l'étude originale est maintenant fort dépassée. Le présent document cherche donc à fournir un bilan plus précis du caractère des côtes canadiennes que celui du premier rapport et à présenter une revue à jour des techniques disponibles de protection et de nettoyage du littoral. Il est impossible de condenser l'énorme bagage de connaissances qui ont été acquises et produites au cours des dix dernières années, et ce genre de compilation n'a pas été jugé nécessaire. Le présent rapport se veut principalement un bilan et un aperçu de l'état actuel des connaissances ainsi qu'une source de référence et un guide pour d'autres sources d'informations et de données plus détaillées.

Les incidences d'un déversement majeur d'hydrocarbures sur les littoraux canadiens varient considérablement et dépendent principalement du type de littoral et du caractère du milieu côtier de la région touchée. Les opérations d'intervention et de nettoyage efficaces des littoraux contaminés dépendent surtout de l'élaboration de plans d'urgence adéquats et de méthodes appropriées pour la remise en état de littoraux en particulier. Étant donné la grande diversité des types de littoraux et de milieux côtiers au Canada, il est nécessaire de disposer d'un large éventail de plans d'intervention. La préparation de ces plans nécessite des informations sur la nature et la variabilité des principaux milieux côtiers au Canada et une évaluation des techniques de remise en état.

Dans le présent rapport, on caractérise les principaux milieux côtiers du Canada en répartissant les quelque 250 000 km de côtes

selon des paramètres géologiques et océanographiques, qui peuvent servir de base à une étude plus approfondie de la documentation. Plusieurs régions côtières ont été subdivisées et décrites plus en détail dans d'autres rapports, par exemple :

- *la Colombie-Britannique (Harper et Owens, 1983);*
- *les Grands Lacs (Owens, 1979a);*
- *les provinces Maritimes (Owens et Bowen, 1977);*
- *l'Île-du-Prince-Édouard (Owens, 1979b);*
- *la baie de Fundy (Owens, 1977b).*

Les études des côtes du Canada ont puisé à une série de conférences qui a débuté en 1978 (McCann, 1980). Ces réunions générales et spécialisées sont organisées sous l'égide du Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales (maintenant, l'Association canadienne pour la science et le génie du littoral). La réunion la plus récente a été la Conférence canadienne de 1993 sur le littoral tenue à Vancouver, en mai 1993. Les comptes rendus des réunions annuelles et autres réunions spéciales organisées par l'Association contiennent les détails concernant les régions ou les sujets propres à chaque site. Bien que la technologie en matière de déversement d'hydrocarbures ait été stimulée par de nombreux groupes au pays [p. ex., l'Arctic Petroleum Operators Association (APOA), l'Association canadienne de recherche sur les déversements de pétrole en mer, l'East Coast Spill Response Association (ESRA), le Petroleum Industry Training School (PITS), et le comité consultatif régional des Prairies pour la limitation et la récupération des déversements de pétrole (PROSCARAC), etc.], le Service de la protection de l'environnement, d'Environnement Canada, a été le pôle de nombreuses activités. En particulier, ce service organise le Colloque technique annuel du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP) et publie régulièrement le Bulletin de la lutte contre les déversements. *Les comptes rendus de l'AMOP, le Bulletin et les rapports publiés par Environnement Canada ont été une source importante d'information pour le présent rapport.*

Les objectifs du présent rapport consistent à :

1. *fournir un guide compréhensible des processus côtiers, des types de littoral et des milieux côtiers du Canada;*

2. *donner un aperçu de l'état actuel des connaissances concernant les hydrocarbures, les incidences et la persistance des hydrocarbures échoués ainsi que la protection et le nettoyage du littoral.*

Remerciements

J'ai eu le plaisir de travailler avec bon nombre de personnes et d'organismes au cours des 15 dernières années, depuis la préparation de cette première étude des côtes du Canada et du nettoyage des littoraux. Une grande partie des connaissances que j'ai acquises au cours de cette période est le fruit de ces associations ainsi que du soutien et du financement fournis par le gouvernement et l'industrie; une simple formule de remerciement me semble donc insuffisante.

Les rapports les plus stimulants et les plus fructueux ont probablement été ceux établis avec mes collègues présents et anciens chez Woodward-Clyde Consultants : Bob Castle, Tom Cooke, Ken Critchlow, Carl Foget, John Harper, David Little, Rich Marty, Shea Penland, Doug Reimer, Gordon Robilliard, Jim Sartor, Elliott Taylor, Eric White, Ted Winfield et Jenni Young. Je tiens particulièrement à remercier Blair Humphrey d'Enviroed, de Victoria, pour les innombrables discussions et débats que nous avons eus au cours de plusieurs projets conjoints.

Toute une gamme de clients ont apporté leur soutien aux études du littoral et aux projets de recherche et d'intervention en cas de déversement. Dans tous les cas, les interactions bilatérales ont rendu ces projets agréables et enrichissants. Mes remerciements sincères vont en particulier à Gary Sergy (Environnement Canada) et Don Howes (ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie-Britannique) pour leur collaboration constante et leur participation au cours des ans. Je remercie également Andy Teal (Esso) qui a fourni le véhicule nécessaire pour mettre en oeuvre les nombreux procédés de documentation et de surveillance qui ont depuis été adoptés par le programme de Technique d'évaluation pour la restauration des rives (TERR) d'Environnement Canada.

Le contenu du présent rapport et les opinions qui y sont émises n'engagent que ma propre responsabilité; toutefois, je tiens à exprimer ma reconnaissance à Bob Taylor, Carl Amos, Don Forbes et Arnaud Hequette pour le temps qu'ils ont consacré à une révision informelle de certaines sections portant sur les milieux côtiers dans une première version, et pour leurs critiques constructives qui ont permis d'améliorer la forme et le contenu, ainsi qu'à Don Wilson qui a revu et amélioré cette version.

Le financement nécessaire à la préparation du présent rapport a été octroyé par la Division des urgences (Science), d'Environnement Canada, à Edmonton, dans le cadre du programme de R-D des urgences en pollution du Centre de technologie environnementale, à Ottawa. Des fonds additionnels ont été fournis par la Direction des urgences environnementales d'Environnement Canada, à Ottawa.

Table des matières

Résumé v
Abstract vi
Avant-propos vii
Remerciements xi
Liste des tableaux xvi
Liste des figures xix

Section 1
Les processus physiques et la dynamique des côtes 1
1.1 Introduction 1
1.2 Processus à l'échelle régionale 3
1.2.1 Vagues et vents 3
1.2.2 Glace 8
1.2.3 Variations du niveau de l'eau : marées, ondes de tempête et tsunamis 9
1.2.4 Milieux soumis aux processus des vagues et marées 11
1.3 Matériaux 12
1.3.1 Forme et morphologie des continents 12
1.3.2 Affleurements de la roche en place et approvisionnement en sédiments 12
1.4 Processus côtiers et dynamique des littoraux 13
1.4.1 Vagues et brisants 14
1.4.2 Processus maréaux 16
1.4.3 Processus éoliens 18
1.4.4 Action et rôle de la glace 18
1.4.5 Dynamique cyclique du littoral 19
1.4.6 Processus littoraux non cycliques 28
1.4.7 La plage, un milieu dynamique 31
1.5 Types de littoraux 31

Section 2
Hydrocarbures, déversements d'hydrocarbures et littoraux 38
2.1 Propriétés physiques et chimiques des hydrocarbures 38
2.2 Le devenir des hydrocarbures déversés 43
2.2.1 Hydrocarbures en mer 45
2.2.2 Le déplacement des hydrocarbures en mer 48
2.2.3 La marée noire 50
2.3 Types d'hydrocarbures et de littoraux 67
2.3.1 Côtes rocheuses 68

2.3.2 Côtes meubles 78
2.3.3 Littoraux de l'Arctique canadien 95

Section 3
Intervention en cas de déversement d'hydrocarbures 100
3.1 Planification et intervention d'urgence en cas de déversement d'hydrocarbures 100
3.2 Priorités en matière d'intervention 104
3.2.1 Indices de sensibilité du littoral 106
3.3 Logistique et contraintes opérationnelles 109
3.4 Collecte des données et documentation sur les littoraux mazoutés 113
3.4.1 Objet du programme TERR (Technique d'évaluation pour la restauration des rives) 117
3.4.2 Levés sur le terrain 118
3.4.3 Termes et définitions normalisés 118
3.5 Protection du littoral 119
3.5.1 Barrages flottants 120
3.5.2 Méthodes de protection sur le rivage 121
3.6 Nettoyage et traitement du littoral 126
3.6.1 Choix des méthodes de nettoyage ou de traitement appropriées 126
3.6.2 Incidences géologiques du nettoyage 130
3.6.3 Incidences écologiques du nettoyage 132
3.6.4 Méthodes de nettoyage 133
3.6.5 Méthodes de nettoyage et types de littoral 142
3.7 Gestion et élimination des déchets 145
3.7.1 Traitement *in situ* 145
3.7.2 Méthodes de nettoyage et production de déchets . . . 146
3.7.3 Types de déchets produits lors du nettoyage 147
3.7.4 Élimination des déchets 148
3.8 Restauration 149

Section 4
Les côtes du Canada 150
4.1 Introduction 150
4.2 Milieux côtiers et subdivisions 153
4.3 Milieux côtiers du Pacifique 153
4.3.1 Vue d'ensemble de la côte du Pacifique 157
4.3.2 Delta du fleuve Fraser 162
4.3.3 Détroit de la Reine-Charlotte - détroit de Georgia . . . 165
4.3.4 Détroit Juan de Fuca 168
4.3.5 Les côtes exposées 172
4.3.6 Détroit de la Reine-Charlotte - détroit d'Hécate 174
4.3.7 Est de l'île Graham 176
4.4 Milieux côtiers de l'Arctique canadien 177

4.4.1 Aperçu de l'Arctique canadien 178
4.4.2 Détroit d'Hudson et sud-est de l'île de Baffin 186
4.4.3 Baie d'Hudson - baie James 189
4.4.4 Côte à fjords 192
4.4.5 Détroit de Jones - détroit de Lancaster - détroit de Prince Regent 195
4.4.6 Partie ouest de l'île d'Ellesmere et île Axel Heiberg 197
4.4.7 Plateforme de glace de l'océan Arctique 202
4.4.8 Plaine côtière de l'océan Arctique 202
4.4.9 Îles du centre de l'Arctique (ou côtes à rias) 205
4.4.10 Partie sud de l'archipel - continent 210
4.4.11 Péninsule de Tuktoyaktuk - baie Liverpool 212
4.4.12 Delta du Mackenzie 223
4.4.13 Côte du Yukon 224
4.5 Milieux côtiers des provinces atlantiques 228
4.5.1 Vue générale de la côte atlantique 228
4.5.2 Labrador et côte extérieure de Terre-Neuve 233
4.5.3 Ouest de Terre-Neuve - secteur nord du golfe du Saint-Laurent 241
4.5.4 Estuaire du Saint-Laurent 245
4.5.5 Partie sud du golfe du Saint-Laurent 248
4.5.6 Côte atlantique de la Nouvelle-Écosse 254
4.5.7 Baie de Fundy 261
4.5.8 Île de Sable 266
4.6 Milieux côtiers des Grands Lacs 272
4.6.1 Aperçu des Grands Lacs 275
4.6.2 Sud de l'Ontario 282
4.6.3 Comté de Prince Edward 292
4.6.4 Le Saint-Laurent et les voies interlacustres 294
4.6.5 Sud-est du lac Huron 297
4.6.6 Nord-est du lac Huron 300
4.6.7 Côte est de la péninsule Bruce 302
4.6.8 Baie Nottawasaga 303
4.6.9 Îles Thirty Thousand - chenal Nord 303
4.6.10 Rive nord du lac Supérieur 306

Références 312

Bibliographie 349

Liste des tableaux

1	Types de littoraux	35
2	Classification des côtes	37
3	Caractéristiques de pétroles bruts canadiens et d'autres pétroles bruts choisis	39
4	Comparaison des caractéristiques physiques types de produits pétroliers raffinés et de pétroles bruts choisis	39
5	Classification et constituants du pétrole brut	41
6	Vitesses estimatives de l'élimination naturelle des hydrocarbures à la surface de la mer	45
7	Données généralisées sur le volume d'hydrocarbures déversés et les longueurs de littoral touché	51
8	Facteurs physiques modifiant la dégradation des hydrocarbures	53
9	Évolution de la marée noire - site de l'expérience du déversement de pétrole à l'île de Baffin (BIOS) de 1981 à 1989	64
10	Longueur du mazoutage de surface des rivages dans le détroit du Prince-William, par catégorie d'intensité de mazoutage de 1991, entre 1989 et 1992	65
11	Exemple des exigences en matière d'information et de données pour les activités de nettoyage	105
12	Priorités en matière d'intervention basées sur les incidences du déversement	108
13	Niveaux d'intérêt relativement aux opérations d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures	109
14	Exemple de niveaux d'intérêt en termes d'activités humaines	110

15 Exemple de niveaux d'intérêt en termes de facteurs biologiques 111

16 Possibilités en matière de protection du littoral 119

17 Méthodes de protection sur le rivage et types de littoral 124

18 Techniques de nettoyage et de traitement du littoral 134

19 Équipement utilisé pour mélanger les sédiments de la plage, mis à l'essai lors du déversement de l'*Arco Anchorage* 139

20 Déchets produits par les méthodes de nettoyage du littoral 147

21 Longueur du littoral 151

22 Fréquence relative estimée des types de littoraux . . . 152

23 Caractéristiques des principales unités côtières du Canada 154

24 Caractéristiques des milieux de la côte du Pacifique . . 156

25 Fréquence des principaux types de littoraux de la Colombie-Britannique et du sud de l'île de Vancouver 158

26 Données sur la hauteur des vagues pour la région du Pacifique 160

27 Caractéristiques des milieux côtiers de l'Arctique 179

28 Marnages : sud-est de l'île de Baffin et détroit d'Hudson 185

29 Types de littoraux de la mer de Beaufort 220

30 Caractéristiques des milieux de la côte atlantique . . . 230

31 Banquise côtière à Botwood 235

32 Labrador : fréquence des principales caractéristiques du littoral 236

33 Nord-est de Terre-Neuve : fréquence des principaux types de littoraux 242

34 Sud-est de Terre-Neuve : fréquence des principaux types de littoraux 244

35 Données sur les hauteurs de vagues, section nord du golfe du Saint-Laurent 245

36 Caractéristiques des vagues de la partie sud du golfe du Saint-Laurent 251

37 Distribution des types de littoraux, sud-est de l'île du Cap-Breton 261

38 Caractéristiques des milieux côtiers des Grands Lacs 274

39 Protection des rives des Grands Lacs 284

Liste des figures

1 Forces principales régissant la distribution régionale des processus littoraux 3

2 Rapport entre les facteurs géologiques et les caractéristiques du littoral 4

3 Combinaison de processus et de formes à l'origine des caractéristiques d'un milieu côtier 5

4 Circulation atmosphérique régionale dans l'hémisphère nord 5

5 Formation de vagues forcées et de houles 6

6 Données pour certaines périodes sur les vagues mesurées au large de Tofino, Colombie-Britannique, et de Western Head, Nouvelle-Écosse 7

7 Niveaux de l'eau du lac Érié à Buffalo, New York, et Toledo, Ohio, illustrant le passage d'une onde de tempête engendrée par le vent suivie d'une seiche . . . 10

8 Variations de la largeur du brisant et types de vagues déferlantes 15

9 Les trois principaux types de vagues déferlantes 16

10 Courbes représentant les niveaux de l'eau des marées semi-diurnes types d'un milieu microtidal et macrotidal 17

11 Crêtes de poussée glacielle formées par l'échouage de floes glaciels dans la baie Allen, près de Resolute, Territoires du Nord-Ouest 19

12 Crête de poussée glacielle échouée dans la zone intertidale dans la partie nord de l'île Somerset, Territoires du Nord-Ouest 20

13 Glace chevauchant la plage jusqu'à la haute-plage soulevée dans le sud de la péninsule Wollaston, détroit de Dolphin and Union, Territoires du Nord-Ouest 20

14 Effets du frasil littoral sur l'atténuation des vagues à Homer, Alaska 21

15 Stades du début de la formation du pied de glace . . . 22

16 Courbes de la profondeur du front de gel à des dates choisies dans la baie Peard, Alaska 23

17 Érosion et accrétion à petite échelle dans la zone intertidale durant le cycle des marées 24

18 Migration d'une crête littorale sur une période de 10 jours, lac Michigan 26

19 Crête se soudant au rivage, Îles-de-la-Madeleine, Québec 26

20 Érosion hivernale d'une levée de plage et cordons littoraux et bermes formées en été 27

21 Gros delta de tempête soudé à une île-barrière sableuse, île Hog, rive nord de l'Île-du-Prince-Édouard 29

22 Coupe d'une plage de galets et de cailloux, baie de Fundy 29

23 Plages à Advocat Harbour, baie de Fundy, et à Scots Bay, baie de Fundy 30

24 Modèle tridimensionnel schématique des stades de formation d'une plage 32

25 Opérations types de raffinage 40

26 Facteurs de dégradation (altération et persistance) des hydrocarbures déversés 44

27 L'altération et la dynamique des hydrocarbures déversés à la surface de la mer 46

28 Processus d'altération en fonction du temps écoulé depuis un déversement 46

29 Vitesses d'évaporation du diesel arctique et du pétrole brut de Prudhoe Bay 47

30 Évolution (temps et longueur) de la nappe d'hydrocarbures en fonction des processus physiques 49

31 Résumé des principaux facteurs de persistance des hydrocarbures échoués 52

32	Littoral abrité mazouté dans le passage Lennox, nord de la baie de Chedabucto, Nouvelle-Écosse . . .	56
33	Distribution des hydrocarbures dans la baie de Chedabucto, Nouvelle-Écosse	56
34	Anse Black Duck, Nouvelle-Écosse	57
35	Hydrocarbures dans la zone intertidale, du côté de la lagune de la flèche littorale dans l'anse Black Duck, Nouvelle-Écosse	58
36	Anse Black Duck, Nouvelle-Écosse	59
37	Revêtement bitumineux résiduaire dans la lagune Black Duck, Nouvelle-Écosse	60
38	Espaces interstitiels remplis d'hydrocarbures, anse Black Duck, Nouvelle-Écosse	60
39	Pétrole échoué huit jours après un déversement expérimental de 15 m^3 de brut moyen sur une plage abritée au nord de l'île de Baffin	62
40	Cartes de la couverture superficielle de pétrole mesurée sur le site de l'expérience de déversement de pétrole à l'île de Baffin (BIOS)	63
41	Rapport entre la morphologie de la plage, le type de sédiments et la couverture superficielle de pétrole	64
42	Revêtement bitumineux à proximité du profil 5	65
43	*a*) Falaise rocheuse verticale, près de St. Anthony, dans le nord de Terre-Neuve; *b*) littoral rocheux à faible pente à marée basse près de Chebucto Head, en Nouvelle-Écosse	69
44	Processus d'érosion des falaises	70
45	Encoche érodée à la laisse de haute mer moyenne, bras Gascoyne, sud-ouest de l'île Devon, Territoires du Nord-Ouest	71
46	*a*) Cap Ricketts sur l'île Devon, Territoires du Nord-Ouest; *b*) cap Admiral M'Clintock au nord-est de l'île Somerset, Territoires du Nord-Ouest	72

47 Réflexion des vagues sur une falaise rocheuse presque verticale dans la baie Etagaulet, rive sud du lac Melville, Labrador 74

48 Algues intertidales sur les rochers près de Chebucto Head, Nouvelle-Écosse 74

49 *a*) Plateforme rocheuse intertidale, baie de Fundy, à l'est de Digby Gut;
b) côte à falaises à l'est de Digby Gut 76

50 L'érosion d'une falaise entraîne la formation d'une plateforme dans la zone littorale à moins que la vitesse de l'érosion soit extrêmement faible en raison de la résistance du rocher 77

51 Mélange d'hydrocarbures et de sédiments dans les crevasses rocheuses intertidales, 3,5 ans après le déversement de l'*Arrow*, île Crichton, Nouvelle-Écosse 78

52 Hydrocarbures sur une plage de sable du détroit de Magellan 79

53 Vue aérienne de canaux de débordement sur un cordon littoral sablonneux des Îles-de-la-Madeleine, Québec 80

54 Changements dans la distribution des hydrocarbures dans les limites d'une plage de sable lors du déversement de l'*Eagle Creek* 81

55 Effet d'un cycle érosion-dépôt sur une plage de sable après le dépôt d'hydrocarbures sur la partie supérieure de la plage 82

56 Hydrocarbures exposés dans la zone intertidale supérieure sur une plage sablonneuse soumise à l'action des vagues de tempête, pointe Michaud, Nouvelle-Écosse 82

57 *a*) Anse Black Duck, Nouvelle-Écosse;
b) île Crichton, Nouvelle-Écosse 84

58 Double couche d'hydrocarbures exposés sur une plage de sable et de gravier d'Hadleyville, Nouvelle-Écosse 85

59 *a*) Sédiments de graviers mixtes (sable, galets, cailloux) sur une plage;
b) plage de galets et cailloux sans fraction sablonneuse 86

60 *a*) Effets de l'activité des vagues de tempête sur des hydrocarbures échoués sur une plage de cailloux;
b) couche d'hydrocarbures enfouis, exposée sur l'estran d'une plage de cailloux, baie de Chedabucto, Nouvelle-Écosse 88

61 Érosion le long de la crête supérieure d'un «revêtement» d'hydrocarbures par l'action du retour des vagues dans un milieu abrité, sur une plage de sable et de galets mixtes, rive sud, détroit de Magellan 89

62 Baie de Fundy
a) larges slikkes exposées à marée basse sur la rive nord du bassin Cumberland;
b) ouest du cap McCoy sur la rive nord 90

63 Baie de Fundy
a) à l'est de l'estuaire de la rivière Avon dans le bassin Minas;
b) rive sud du bassin Annapolis 92

64 Hydrocarbures emprisonnés dans les canaux et en lisière du marais à marée haute, marais Miguasha, baie des Chaleurs, Québec 93

65 Vue au sol du marais Espora, détroit de Magellan, Chili 94

66 Hydrocarbures sur la partie supérieure d'une prairie marécageuse du marais Espora, détroit de Magellan, Chili, 12,5 ans après le mazoutage 94

67 Cicatrices laissées par les coulées de dégel régressif dans les sédiments côtiers de la baie Theseiger, sud de l'île Banks 96

68 *a*) Sapement près de l'île Baillie, dans le sud de la mer de Beaufort, Territoires du Nord-Ouest;
b) sud-ouest de l'île Baillie, dans le nord-est de la baie Liverpool, Territoires du Nord-Ouest . . . 97

69 Organisation des opérations d'intervention du CANUSLAK 101

70 Exemple d'un guide de décision pour le nettoyage d'un littoral 102

71 Exemple d'une approche précoce de sensibilité du littoral 107

72 Exemple d'une description de sensibilité saisonnière 112

73 Exemple de données environnementales 114

74 Accumulation de grumes au-dessus de la laisse de haute mer à Long Beach, ouest de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique 115

75 Contraintes environnementales et culturelles sur les opérations sur le terrain 115

76 Déploiement d'un écrémeur à disques à l'intérieur de la zone confinée par un barrage flottant lors d'un exercice de nettoyage portuaire . . . 120

77 Utilisation d'un barrage flottant pour dériver les hydrocarbures sur un littoral en vue de leur récupération 122

78 Barrière perméable type 123

79 Système de digue-fossé pour la récupération des hydrocarbures 125

80 Méthodes de nettoyage recommandées pour différents milieux et différents types de littoral 128

81 Progression des différentes méthodes de nettoyage suite au déversement de l'*Amoco Cadiz* . . . 129

82 Efficience du nettoyage et incidences du retard des opérations de nettoyage 131

83 Petite plage abritée dans l'anse Indian, Nouvelle-Écosse, recontaminée après l'enlèvement de sédiments 132

84 Séquence de profils de plage à l'anse Indian, Nouvelle-Écosse, contaminée par le déversement de l'*Arrow* 132

85 Lavage d'une plage après le déversement de l'*Exxon Valdez* 135

86 Récupération manuelle des hydrocarbures sur une plage de sable, pointe Michaud, Nouvelle-Écosse . . . 135

87 Niveleuses en échelon décapant la surface de la plage pour former des bermes à Galveston, Texas, à la suite du déversement de l'*Alvenus* 137

88 Chargeur frontal récupérant soigneusement une mince couche d'hydrocarbures et de sédiments dans l'anse Indian, Nouvelle-Écosse 137

89 Déplacement des sédiments de surface pour exposer et déplacer les sédiments de subsurface mazoutés de l'arrière-plage, île Ushagat, Alaska 140

90 Pulvérisation de dispersants à l'aide d'un appareil monté dans un havresac, Cape Hatt, île de Baffin, Territoires du Nord-Ouest 141

91 Principales subdivisions des côtes du Canada 152

92 Milieux côtiers du Pacifique 155

93 Principales formes de relief côtier de la Colombie-Britannique 159

94 Moyenne des données mensuelles moyennes sur les vagues, Tofino, Colombie-Britannique, et Western Head, Nouvelle-Écosse 160

95 Grumes empilées dans la zone intertidale supérieure d'une plage de sable à Clo-oose, Colombie-Britannique 162

96 Carte géologique du delta du fleuve Fraser, Colombie-Britannique 163

97 Embouchure du chenal Middle Arm, delta du Fraser, Colombie-Britannique 164

98 Embouchure du chenal Canoe Pass, delta du Fraser, Colombie-Britannique 164

99 Cordons sablonneux intertidaux exposés à mi-marée entre la jetée du chenal North Arm et le pont-jetée Iona du delta du Fraser, Colombie-Britannique 165

100 Slikkes intertidales adossées à des marais endigués et mis en valeur du banc Sturgeon, delta du Fraser, Colombie-Britannique 166

101 Le lac Buttle, un ancien fjord, aujourd'hui séparé de la mer, près de Campbell River dans la partie est de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique 167

102 Les îles Chain dans le port de Ganges, île Saltspring 167

103 Côte rocheuse basse dans les îles Gulf, détroit de Georgia, Colombie-Britannique 168

104 Milieu littoral abrité et plage de galets, de cailloux et de blocs, près de Courtenay, île de Vancouver, Colombie-Britannique 169

105 Falaise verticale juste au nord de la pointe Nose, île Saltspring 169

106 Plateforme rocheuse intertidale horizontale au nord-est de l'île Saltspring 170

107 Plage de galets et de cailloux près du cap Keppel, île Saltspring 170

108 Petit delta fluviatile à marée basse, passage Samsum, île de Vancouver 171

109 Pointe Pachena, partie ouest du détroit Juan de Fuca 171

110 Endroits du sud-ouest de la Colombie-Britannique où l'on a signalé une forte activité de tsunamis 173

111 Côte élevée à fjords, sud-ouest de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique 173

112 Section de la plage de Long Beach dans le parc national Pacific Rim, ouest de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique 174

113 Vue à l'intérieur des terres près de Tofino, ouest de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique . . 175

114 Bras Cascade, près d'Ocean Falls, Colombie-Britannique 176

115 Milieux côtiers de l'Arctique 178

116 Distribution de la glace dans les eaux du sud-est de l'Arctique et de la mer du Labrador 182

117 Distribution de la glace sur les eaux de l'Extrême-Arctique en été 183

118 Carte géologique généralisée de l'Arctique canadien 185

119 Côte sud du détroit d'Hudson, vue vers le cap Wolstenholme 187

120 Rive sud de la baie Cumberland, Territoires du Nord-Ouest, près du fjord Nettilling, au début de juillet 188

121 Caractéristiques du littoral de la région de la baie d'Hudson, de la baie James, du bassin Foxe et de la baie d'Ungava 190

122 Relief élevé, côte rocheuse, sud de l'île Bylot 193

123 Falaises élevées à glacier suspendu et talus d'éboulis coalescents recouvrant les sections inférieures, sud de l'île Bylot 193

124 Delta à la tête d'un petit fjord tributaire, près du bras Milne, rive sud du détroit d'Éclipse . . . 194

125 Large plaine littorale, au nord de Clyde, est de l'île de Baffin 195

126 Front glaciaire peu élevé, sud-est de l'île Devon 196

127 Côte est du détroit de Prince Regent, péninsule Brodeur 198

128 Falaises quasi verticales, côte nord, île Prince Leopold 198

129 Falaises et cônes d'éboulis, cap Hurd, sud de l'île Devon 199

130 Plaine côtière, est du cap Admiral M'Clintock, nord-est de l'île Somerset 199

131 Delta arqué anastomosé et plages de front de delta formées par l'action des vagues, nord-ouest de l'île Somerset, ouest du cap Anne 200

132 Côte nord, île Griffith, détroit de Barrow 200

133 Plage de sable et de galets à marée basse, cap Ricketts, sud-ouest de l'île Devon 201

134 Stabilité des plages et processus littoraux, nord de l'île Somerset 201

135 Région de milieux côtiers dominés par la glace dans les îles du nord-ouest de l'Arctique et dans l'est de l'île Melville 203

136 Large plage sablonneuse, détroit Danish, sud-ouest de l'île Ellef Ringnes 204

137 Morphologie irrégulière d'une côte à modelé glaciaire, sud de l'île Lougheed 205

138 Milieux côtiers de l'île King Christian et effet des processus glaciels sur les plages 206

139 Milieux côtiers de l'île Cameron et effet des processus glaciels sur les plages 207

140 Côte du sud-ouest de l'île Banks à l'embouchure de la rivière Big 208

141 Cordon littoral, lagune et promontoire au nord de la pointe Haswell, sud-ouest de l'île Banks 208

142 Flèche littorale recourbée près de Sachs Harbour, sud de l'île Banks 209

143 Hautes falaises de sédiments meubles à l'ouest de Sachs Harbour, sud de l'île Banks 209

144 Bras Bracebridge sur la côte ouest de l'île Bathurst 210

145 Côte basse à plages soulevées et large zone intertidale près de la pointe Ross, sud-est de l'île Melville 211

146 Côte élevée à falaises près du cap Nelson, sud-est de l'île Banks 213

147 Côte élevée à falaises et cônes d'éboulis, cap Vesey Hamilton, nord-est de l'île Banks 213

148 Falaises verticales, îles Albert, détroit Prince Albert, sud-ouest de l'île Victoria 214

149 Brûlage de dépôts de charbon dans les collines Smoking Hills, est de la baie Franklin, sud du golfe Amundsen 214

150 Baie Shepherd, sud-est du golfe Reine-Maud 215

151 Cicatrices de poussée glacielle sur les plages soulevées et sur la plage vive à l'ouest du cap Hardy, au nord de l'île Prince of Wales 215

152 Vagues moutonnantes sur un large cordon littoral, au nord du cap Caldwell, rive ouest du détroit de Prince of Wales 216

153 Formations dunaires, sud-est de l'île Banks, ouest de la baie de Salis 216

154 Delta de la rivière Horton, est de la baie Franklin, sud du golfe Amundsen 217

155 Côte élevée au sud de la pointe Treadwell, sud-est de l'île Banks 217

156 Plage soulevée sur une côte basse, pointe Lady Franklin, golfe Coronation 218

157 Basse côte inondée, rivière Brock, sud-est de la baie Darnley, sud du golfe Amundsen 218

158 Relief peu élevé et haute-plage à lacs de toundra, Whitefish Summit 220

159 Formes côtières et directions du transport des sédiments, sud de la mer de Beaufort 221

160 Cordons littoraux de vase et de silt, rive sud de la baie Kittigazuit 221

161 Grumes échouées dans une baie abritée près de Tuktoyaktuk 222

162 Falaises sableuses peu élevées, rive nord de la baie Liverpool 222

163 Les chenaux occidentaux de l'embouchure du delta du Mackenzie 223

164 Falaise élevée à haute teneur en glace et soumise à un recul rapide, nord de l'île Pelley 224

165 Vaste réseau hydrographique anastomosé, baie Phillips, côte du Yukon 225

166 Système de flèches littorales édifiées par un courant de dérive littorale intermittent, à l'ouest de la pointe Kay 226

167 Falaises à haute teneur en glace, en recul, présentant un sol structuré, plaine côtière du Yukon, à l'est de la pointe Demarcation 227

168 Falaises de sédiments meubles, côte ouest de l'île Herschel 227

169 Milieux de la côte atlantique 229

170 Caractéristiques des marées, des vagues et de la glace de mer dans l'Atlantique canadien 231

171 Données mensuelles d'observation des hauteurs d'ondes significatives pour certains mois d'hiver et d'été, baie Logy, Terre-Neuve 234

172 Extension moyenne de la glace de mer au large : Labrador, Terre-Neuve et secteur nord-est du golfe du Saint-Laurent 235

173 Côte élevée, accidentée et résistante du cap Bluff, baie St. Michaels 237

174 Large plage de sable dans la baie Trunmort près de Cartwright 237

175 Zone intertidale jonchée de blocs, près de la laisse de basse mer, partie nord-ouest de la baie Sandwich 238

176 Profils schématiques des plages présentant des levées de blocs, baie Makkovik, Labrador 238

177 Levée de blocs près de la laisse de basse mer, baie Sandwich 239

178 Plage de sédiments grossiers près de Cartwright 239

179 Large plateforme rocheuse intertidale adossée à une falaise rocheuse verticale, entre Big Brook et Boat Harbour, détroit de Belle-Isle 240

180 Littoral complexe de chenaux et d'îles près de Boyd's Cove dans le passage Dildo Run, baie des Exploits 241

181 Falaises de matériaux non résistants près de Jersey Harbour, baie Fortune 243

182 Sédiments de plage de galets et de blocs et bras à Great Barasway, secteur est de la baie Placentia . . . 243

183 Distribution moyenne de la glace sur cinq ans, golfe du Saint-Laurent 246

184 Littoral rocheux résistant, péninsule de Port-au-Port, côte ouest de Terre-Neuve 247

185 Cap et plage, port de Trout River, Terre-Neuve 247

186 Cordon littoral à l'embouchure de la rivière de Fox Island, Terre-Neuve 248

187 Motte de marais transportée par la glace sur les vasières intertidales, rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent, Berthier, Québec 250

188 Variations saisonnières 250

189 Géomorphologie côtière de la partie sud du golfe du Saint-Laurent 252

190 Falaises élevées et plages étroites, à l'ouest de Percé, Gaspésie, Québec 253

191 Basses falaises de grès peu résistants, côte ouest des Îles-de-la-Madeleine, Québec 253

192 Îles-barrières de sable et chenaux, Tracadie, Nouveau-Brunswick 255

193 Plage de Cavendish, côte nord, Île-du-Prince-Édouard 255

194 Cordon littoral sableux orienté vers l'ouest, Îles-de-la-Madeleine, Québec 256

195 Plateforme intertidale et falaise découpées dans des grès peu résistants, entrée du port de Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard, détroit de Northumberland 256

196 Cordons littoraux sableux, baie Hillsborough, sud de l'Île-du-Prince-Édouard 257

197 Carte géologique des provinces Maritimes 258

198 Dépôts glaciaires meubles en cours d'érosion reposant sur une plateforme intertidale de roche en place résistante, cap La Have, Nouvelle-Écosse 260

199 Plage de blocs, de galets et de cailloux, pointe Larry's, baie Tor, côte est de la Nouvelle-Écosse 260

200 Plage de gravier, île Crawley's, sud-ouest de la Nouvelle-Écosse 262

201 Cordon littoral de gravier en travers de l'estuaire de la rivière Necum Teuch, côte est de la Nouvelle-Écosse 262

202 Vasières intertidales à marée basse, rivière Tukset, sud-ouest de la Nouvelle-Écosse 263

203 Marais, côte ouest du port de Chebogue, sud-ouest de la Nouvelle-Écosse 263

204 Côte élevée et roche en place dans la zone intertidale, cap Smokey, île du Cap-Breton, Nouvelle-Écosse 264

205 Basse côte de roche en place résistante, île Paddy's Head, partie est de la baie St. Margarets, Nouvelle-Écosse 264

206 Marnage moyen dans la baie de Fundy 266

207 Îles Five, Nouvelle-Écosse 267

208 Géomorphologie côtière de la baie de Fundy 268

209 Plateforme d'abrasion près de Margaretsville, côte sud de la baie de Fundy 269

210 Côte rocheuse avec plateforme d'abrasion et plage de galets et de cailloux à la base de falaises en recul, côte sud de la baie Chignecto, baie de Fundy 269

211 Vasières intertidales à mi-marée, côte nord, bassin Annapolis, baie de Fundy 270

212 Histogramme des taux de recul des falaises, bassin Minas 270

213 Extrémité est de l'île de Sable 271

214 Vue vers le sud à partir d'une section de l'est de l'île de Sable 272

215 Milieux côtiers des Grands Lacs 273

216 Profil idéalisé des Grands Lacs représentant les dénivellations et les profondeurs relatives 275

217 Fréquence calculée des hauteurs d'ondes significatives pour chacun des lacs 276

218 Limites maximales moyennes de la glace et dates de couverture maximale 277

219 Pied de glace, rive sud du lac Ontario, près de Burlington 278

220 Niveaux d'eau mensuels moyens, de 1916 à 1986 . . . 279

221 Fluctuations du niveau des eaux du lac Érié durant la tempête du 2 décembre 1985 280

222 Géologie simplifiée de la région des Grands Lacs représentant la distribution des roches du Bouclier canadien et les affleurements de dolomie de Niagara 281

223 Coupe transversale du bassin du Michigan 282

224 Le bassin des Grands Lacs 283

225 Lac Ontario : falaises, directions du transport des sédiments et caractéristiques des dépôts 286

226 Lac Érié : falaises, directions du transport des sédiments et caractéristiques des dépôts 286

227 Falaises au cap Bond près de Newcastle, rive nord du lac Ontario 287

228 Plage sablonneuse protégée par un brise-lames côtier, côte sud de la flèche du port de Toronto 287

229 Falaise de till (silt-argile) à l'ouest de Grimsby, rive sud du lac Ontario 288

230 Plateforme rocheuse précédant un promontoire avec haute-plage de galets et de cailloux, pointe Abino, nord-est du lac Érié 288

231 Large plage de sable prolongée par de basses dunes, côte ouest de la pointe Abino, nord-est du lac Érié 289

232 Île-barrière basse, isolant une lagune et des marais; parc provincial Holiday Beach, ruisseau Big, sud-ouest du lac Érié 289

233 Barre de Burlington, sud-ouest du lac Ontario 290

234 Pointe Pelée, rive ouest du lac Érié 291

235 Falaises verticales festonnées à l'ouest du port Stanley, lac Érié 293

236 Falaise de sable et dunes perchées, parc de Sand Hills, Jacksonville, lac Érié 293

237 Plateforme rocheuse exposée près de la baie Wellington, comté de Prince Edward, lac Ontario 294

238 Cordons littoraux dans la baie Wellers qui isolent les baies North et Pleasant 294

239 Cordon littoral sableux de faible altitude, cordon West Bay, comté de Prince Edward 295

240 Petit marais d'une côte ouverte, rive nord, chenal Bateau, au nord de l'île Howe, comté de Prince Edward 295

241 Côte rocheuse résistante, de bas relief, sur l'île Treasure, à l'est de Kingston, région des Mille-Îles 296

242 Rive en cours de recul, bras principal de la rivière Sainte-Claire 297

243 Milieu de marais, nord de la baie Mitchell, lac Sainte-Claire 298

244 Basse côte et plage étroite, sud-ouest du lac Sainte-Claire 298

245 Vue vers le sud, cours inférieur de la rivière Sainte-Claire 299

246 Basse falaise en recul, rivière Sainte-Claire près de Sarnia 299

247 Large plage sablonneuse se prolongeant par un vaste système de dunes endommagé par les véhicules tout terrain, parc provincial Ipperwash, lac Huron 300

248 Falaise en cours d'érosion au nord de Goderich, lac Huron 301

249 Plage de Sauble, lac Huron 301

250 Affleurements de la roche en place recouverts d'un mince placage de sédiments grossiers précédant des marais, entre Kincardine et Southampton, lac Huron 302

251 L'escarpement du Niagara, rive nord de la baie Colpoys, côte est de la péninsule Bruce 303

252 Plage de cailloux et de blocs et large zone littorale jonchée de blocs, près de la pointe Valil, à l'ouest du cap Rich, est de la baie Nottawasaga . . . 304

253 Embouchure de la rivière Nottawasaga, déviée vers l'est par l'expansion d'un système de cordons et de flèches au fond de la baie 304

254 Falaises de roches sédimentaires non résistantes en cours d'érosion, est de Meaford, ouest de la baie Nottawasaga 305

255 Large plateforme rocheuse près de Craigleith, ouest de Collingwood, baie Georgienne 305

256 Îles rocheuses peu élevées près du chenal Muskosh, îles Thirty Thousand, nord-est de la baie Georgienne 306

257 Plage de blocs et de cailloux avec large zone littorale peu profonde près de Thunder Bay, nord-est de la baie Georgienne 306

258 Côte accore à l'ouest de Terrace Bay, nord du lac Supérieur 307

259 Falaises verticales et zone littorale rocheuse, Rocher Agawa, nord-est du lac Supérieur 308

260 Côte rocheuse exposée, peu élevée, près de la pointe Theane, nord-est du lac Supérieur 309

261 Plage de cailloux et débris de grumes, sud-ouest de la rivière Montréal, nord-est du lac Supérieur . . . 309

262 Plage de sable, de galets et de blocs peu battue par les vagues dans une anse abritée au sud de la pointe Mamainse, sud-est du lac Supérieur 310

263 Large plage sablonneuse précédant des dunes peu élevées, parc provincial Pancake Bay, baie Whitefish, sud-est du lac Supérieur 310

264 Plage exposée de galets et de cailloux dans la baie Hubbard près de Mamainse, sud-est du lac Supérieur 311

Section 1

Les processus physiques et la dynamique des côtes

1.1 Introduction

Les caractéristiques physiques et dynamiques de la zone littorale influent sur le devenir des hydrocarbures qui atteignent la côte. Les mesures de protection ou de nettoyage du littoral doivent être choisies en fonction des conditions locales, propres au site. On comprendra donc qu'il est impossible de traiter de tous les aspects des opérations de nettoyage et de protection des côtes du Canada en un seul volume. On décrira ici les éléments importants des processus qui s'exercent sur les littoraux et les principales caractéristiques des côtes. Ce cadre d'analyse permettra de décrire des secteurs précis du littoral et d'expliquer comment ils se modifient.

Les facteurs qui déterminent la variabilité des côtes, tant spatiale que temporelle, sont présentés dans la présente section. L'examen initial d'une vaste gamme de conditions environnementales permet de procéder à une analyse plus détaillée des processus et des modifications du littoral au niveau local.

La majorité des côtes du Canada n'ont fait l'objet que de levés de reconnaissance. Une grande partie des côtes n'a été que superficiellement étudiée de telle sorte que, pour la plupart des sections du littoral, il n'existe pas d'informations détaillées sur les tendances à court terme ou à long terme (taux d'érosion ou d'engraissement). Les caractéristiques physiques de base (géologiques et océanographiques) de la plupart des régions ont été déterminées à partir de levés régionaux, mais des études pluriannuelles, qui fournissent de l'information sur les variations normales à court terme et à long terme, n'ont été effectuées qu'à quelques endroits. La base de connaissances est bien sûr plus vaste pour les secteurs densément peuplés, où l'activité humaine est touchée par les modifications du littoral (c.-à-d. le sud de la Colombie-Britannique, les lacs Érié et Ontario, le Nouveau-Brunswick, l'Île-du-Prince-Édouard et la Nouvelle-Écosse).

Les résultats des études détaillées menées dans ces milieux et dans d'autres milieux côtiers du monde ont été utilisés pour mettre au point des modèles théoriques ou empiriques qui sont ensuite appliqués, tels quels ou après modification, à d'autres endroits comportant une combinaison semblable de conditions environnementales. Bien qu'il n'existe pas encore de modèle universel permettant d'expliquer complètement certains événements et certains cycles, on connaît quand même assez bien l'ampleur et l'importance des variations potentielles du littoral et des changements cycliques des plages.

Le rythme et l'importance des processus qui s'exercent sur les côtes ainsi que la variabilité normale des caractéristiques des plages ou des niveaux d'énergie qui s'exercent sur les littoraux constituent des variables importantes pour l'évaluation des incidences et du devenir des hydrocarbures échoués. Ainsi, l'hydrodynamisme exerce un contrôle marqué sur l'altération et la persistance de ces hydrocarbures. L'évolution des plages ou le recul du littoral

peuvent aussi entraîner l'enfouissement ou l'altération des dépôts d'hydrocarbures échoués. De même, la configuration du transport des sédiments détermine la vitesse à laquelle les sédiments contaminés enlevés sont remis en place naturellement. Il faut tenir compte de tous ces facteurs avant d'utiliser les ressources disponibles et de mettre au point des stratégies de nettoyage.

Pour tous les types d'études, les deux principaux facteurs qui déterminent des caractéristiques de la côte sont :

- les processus qui s'exercent sur le littoral,
- les matériaux sur lesquels s'exercent ces processus.

La zone côtière constitue probablement le milieu physique terrestre le plus complexe et le plus dynamique. En effet, dans cette zone, des forces marines, atmosphériques et terrestres se combinent pour produire un milieu dans lequel le changement est normal. Les facteurs de changement les plus facilement identifiables sont les vagues, les marées et les glaces. S'y ajoutent les processus physiques associés aux cours d'eau, à la gravité et aux vents ainsi que les processus biologiques qui gouvernent la formation des marais (et, dans les régions tropicales, ceux des mangroves et des récifs coralliens).

L'influence dominante d'un ou de plusieurs processus physiques sur un milieu côtier donné dépend de la température et des marées. Les variations des températures de surface du globe influent sur les variations régionales des configurations de vents, telles l'alizé ou les bandes de perturbations associées au front polaire, ainsi que sur la distribution de la glace de mer. Les processus littoraux associés aux vents, aux vagues et à la glace sont tous fonction de l'évolution des températures de la planète (figure 1). Le deuxième facteur de changement est celui des marées. Les mouvements périodiques de l'eau sont contrôlés par les forces d'attraction qui s'exercent entre des corps célestes adjacents, notamment la lune et le soleil. Un troisième facteur, relativement peu important, est celui de l'énergie produite par les séismes qui engendrent des tsunamis sous l'effet du déplacement à grande échelle de l'eau des océans et autres bassins. Bien qu'ils soient peu fréquents dans la plupart des régions du monde, on ne saurait ignorer leur rôle.

Les matériaux sur lesquels s'exercent les processus littoraux peuvent être examinés, à l'échelle régionale, sous l'angle de l'histoire tectonique (Inman et Nordstrom, 1971). À l'exception des côtes polaires bordées de marges glaciaires comme les plateformes flottantes ou les glaciers de marée, les affleurements rocheux ou dépôts de sédiments des côtes sont liés à une série d'événements tectoniques et sédimentologiques qu'il faut replacer dans l'échelle stratigraphique (figure 2). La forme des continents, et donc celle des océans limitrophes, les profondeurs des plateformes continentales, le relief et la physiographie de la zone côtière, la taille des bassins de drainage intérieurs et la résistance des affleurements rocheux à l'érosion forment l'armature sur laquelle s'exercent les processus littoraux pour façonner et modifier la bordure des terres (figure 3). Les effets de la glaciation du Pléistocène et l'histoire récente des variations relatives du niveau de la mer des derniers 10 000 à 20 000 ans sont aussi des facteurs importants permettant de comprendre et d'expliquer les caractéristiques actuelles des côtes canadiennes. L'influence de ces deux facteurs fait l'objet de la division 1.3.2 et de la sous-section 4.1.

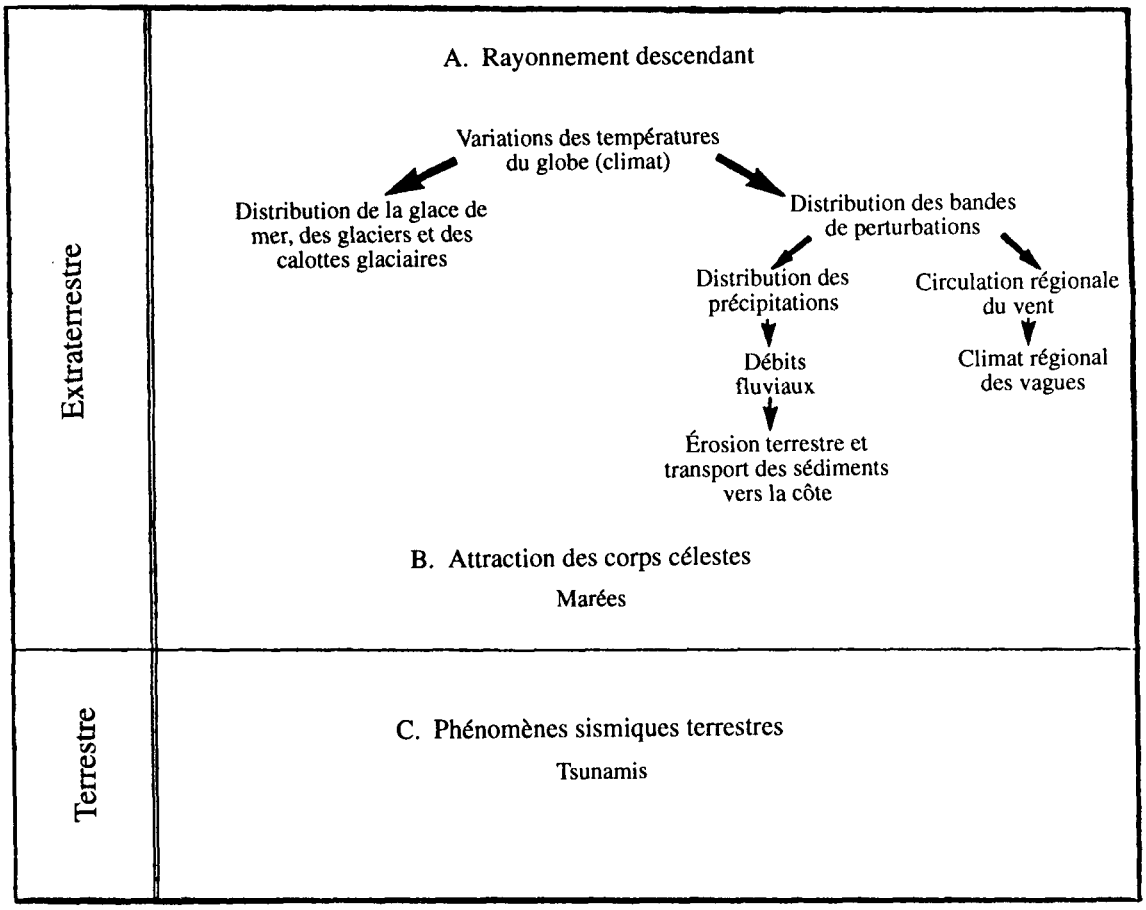


Figure 1 Forces principales régissant la distribution régionale des processus littoraux

1.2 Processus à l'échelle régionale

1.2.1 Vagues et vents

Le simple transfert de chaleur des régions équatoriales aux régions polaires par le mouvement des masses d'air est compliqué par la rotation de la terre, l'inclinaison de l'axe de rotation et la distribution des masses continentales et océaniques. Ces facteurs expliquent la variation constante de la configuration des circulations de masses d'air. Sous sa forme la plus simple, cette configuration se compose d'une série de bandes alternées de hautes et de basses pressions qui produisent la circulation atmosphérique régionale présentée à la figure 4. Cette circulation est caractérisée par une distribution de zones, dans lesquelles les systèmes de vents sont relativement stables. Ces systèmes, tels les alizés du nord-est ou les vents d'ouest, se déplacent selon les saisons et varient en intensité sous l'effet des variations des gradients de pression régionaux. Malgré ces perturbations, la configuration de la circulation à l'échelle planétaire est relativement constante.

Se superposent à cette configuration simplifiée les effets modificateurs du déplacement des masses d'air générales. Des zones frontales se développent entre des masses d'air de caractéristiques physiques distinctes. Il s'agit de régions à conditions instables et à gradients de pression élevés. Les dépressions typiques, caractérisées par des configurations circulaires des vents, se forment le long de ces fronts. Une zone frontale typique de ces conditions est le front

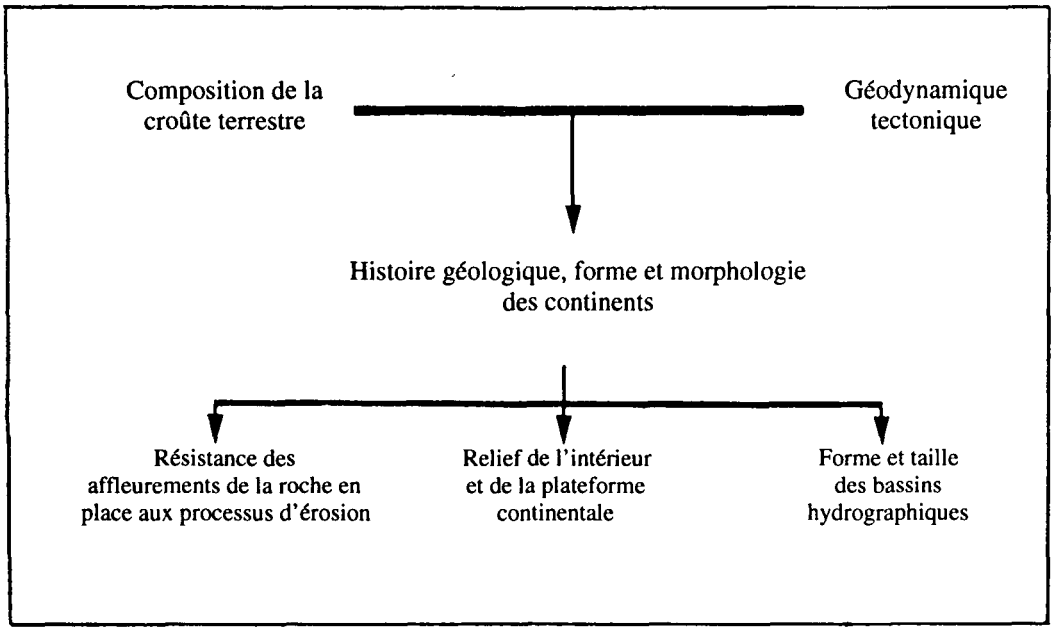


Figure 2 Rapport entre les facteurs géologiques et les caractéristiques du littoral

polaire de l'hémisphère nord qui se trouve entre l'anticyclone polaire, masse d'air froide (vents du nord-est), et le cyclone plus chaud situé au sud (vents de l'ouest). Le front polaire se déplace entre le 30e et le 60e degré de latitude N. et produit des dépressions fréquentes qui traversent d'ouest en est le nord de l'Europe, l'Amérique du Nord et le nord des océans Pacifique et Atlantique.

Le Canada s'étend du 45e au 80e degré de latitude N. Les configurations de la circulation et les vents du sud du Canada sont dominés par des masses d'air instables de part et d'autre du front polaire ondulant. L'Arctique canadien, toutefois, est sous l'influence de l'anticyclone polaire, plus stable.

Localement, sur les côtes élevées, la topographie peut exercer un effet de canalisation des vents. En outre, les brises de mer, dont l'existence est liée aux différences de températures en surface entre la terre et la mer, soufflent souvent à plusieurs mètres par seconde (m/s) dans la zone côtière. Ces brises de mer peuvent dépasser 5 m/s (10 noeuds) dans le détroit de Georgia. Dans tous les cas, qu'ils soient associés aux alizés, aux cyclones, à une brise de mer ou à un ouragan, les systèmes de vents entraînent un transfert d'énergie. Ainsi, les vents soufflant sur un lac, une mer ou une rivière ont pour effet principal de produire des ondes de gravité dans les couches superficielles du plan d'eau.

Les facteurs qui déterminent la formation de vagues sont la vitesse du vent, la durée du vent dans une direction donnée et la distance ou le fetch du plan d'eau sur lequel souffle le vent. Il existe deux principaux types de vagues : les vagues qui se forment dans l'aire de génération (vagues forcées) et les

Les processus physiques se combinent de manière unique	et agissent sur	la roche en place ou les sédiments d'une section de côte	pour produire	un milieu côtier dynamique

vents
vagues
glace
marées
tsunamis

configuration du continent
morphologie continentale
roche en place
sédiments meubles

Figure 3 **Combinaison de processus et de formes à l'origine des caractéristiques d'un milieu côtier**

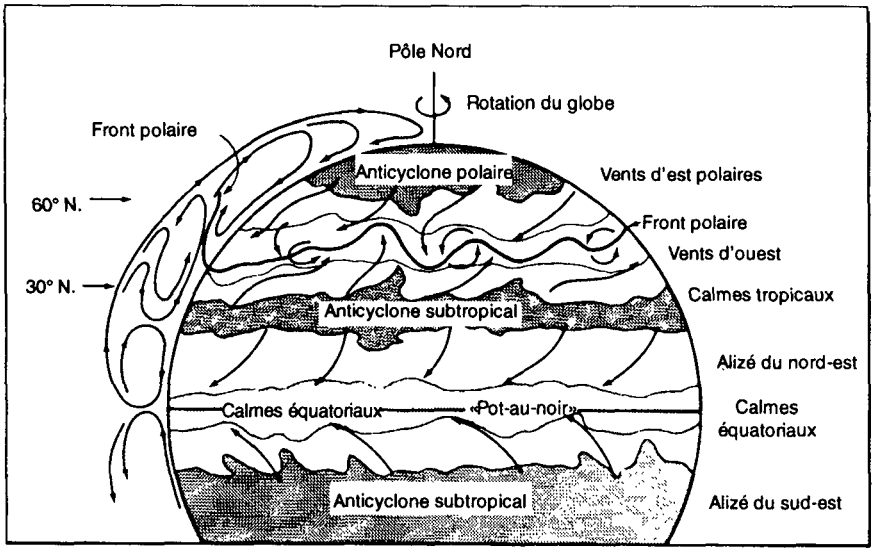
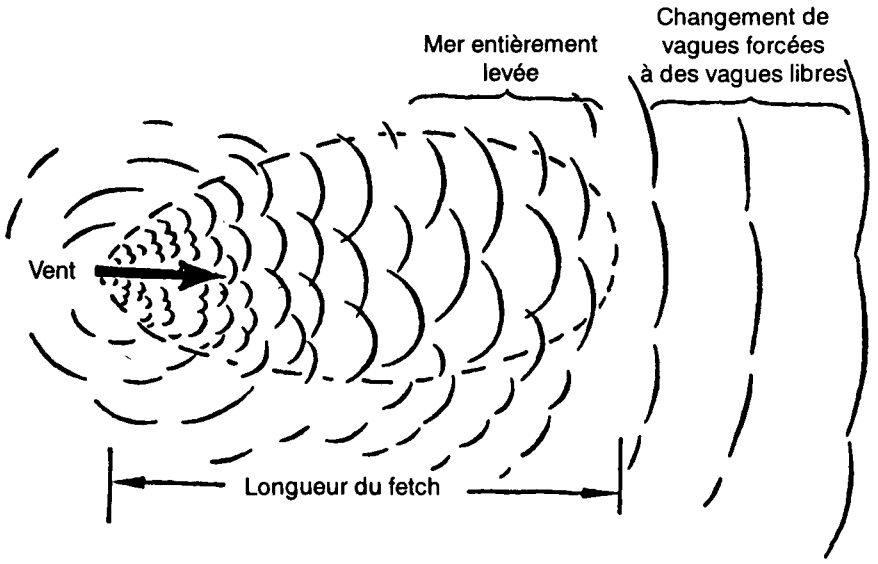


Figure 4 **Circulation atmosphérique régionale dans l'hémisphère nord**

ondes qui se propagent au dehors de la zone de génération (houle) (figure 5). À mesure que le vent souffle sur un fetch donné, la hauteur et la longueur des vagues augmentent pour atteindre un maximum limité par la vitesse du vent, la longueur du fetch et, dans les zones peu profondes, la profondeur de l'eau. Sur les côtes exposées à des vents violents, comme par exemple les bandes de dépression des moyennes latitudes (sud de la Colombie-Britannique, est de Terre-Neuve et ouest de la Nouvelle-Écosse), l'hydrodynamisme est généralement très élevé. Les autres côtes océaniques du monde sont caractérisées surtout par des vagues libres (p. ex., la Californie, l'Afrique de l'ouest et le sud-est de l'Australie) ou par un hydrodynamisme faible (p. ex., le golfe du Saint-Laurent, la baie d'Hudson et le golfe du Mexique). Les Grands Lacs appartiennent aussi à cette dernière catégorie.

Davies (1972) présente une description régionale des milieux de vagues côtières à l'échelle du globe, qu'il divise en fonction



Le fetch, indiqué ci-dessus, consiste en l'aire d'un plan d'eau sur laquelle le vent souffle et produit des vagues. Lorsqu'elles quittent l'aire de génération, les vagues forcées deviennent des houles.

Figure 5 Formation de vagues forcées et de houles (tiré de Bascom, 1964)

des ondes de tempête, des houles, des zones de dépressions cycloniques et des secteurs abrités. À l'échelle générale, cette approche contribue à mieux comprendre les différences régionales des niveaux d'énergie appliqués aux littoraux. Il est entendu que cette description des caractéristiques mondiales des vagues est simpliste et doit être utilisée avec précaution pour tenter de comprendre une section donnée d'une côte. Toutefois, cette classification constitue une description régionale précieuse des principales composantes des vagues.

Dans les milieux battus par les ondes de tempête, les vagues sont généralement produites localement, et les vents sont généralement associés à des systèmes frontaux (perturbations dépressionnaires). Les bandes de perturbations s'étendent à peu près entre 30° et 60° N. et entre 45° et 60° S. Dans ces zones tempérées, les vents dominants sont de l'ouest, de telle sorte que l'hydrodynamisme est plus élevé sur les façades occidentales des continents que sur les côtes face à l'est. Les différences saisonnières des caractéristiques des masses d'air sont généralement à l'origine des gradients de pression maximaux en hiver, d'où des maximums dans la fréquence et l'intensité de la formation de cyclones. L'énergie des vagues qui frappent les littoraux est généralement d'un niveau de base faible mais ponctuée de niveaux élevés liés aux ondes de tempêtes lorsque des dépressions traversent la région. Comme l'hydrodynamisme est surtout fonction de la hauteur des vagues, les enregistreurs de vagues peuvent servir à illustrer les caractéristiques physiques d'un milieu à ondes de tempête. La figure 6b présente des données sur la hauteur des vagues pour certains mois d'hiver au large de la côte du Pacifique, où l'hydrodynamisme de base est élevé à cause de la présence constante de houles. Au large de la côte atlantique du Canada, la houle est absente et on note une périodicité marquée des perturbations (figure 6*b*). Par contre, des données mensuelles semblables pour l'été (figure 6*a*) illustrent une distribution d'énergie plus uniforme, en termes de hauteurs de vagues observées sur les deux côtes à cause de l'absence de forts vents de tempête. Aux latitudes moyennes tempérées, les perturbations se forment tous les trois à

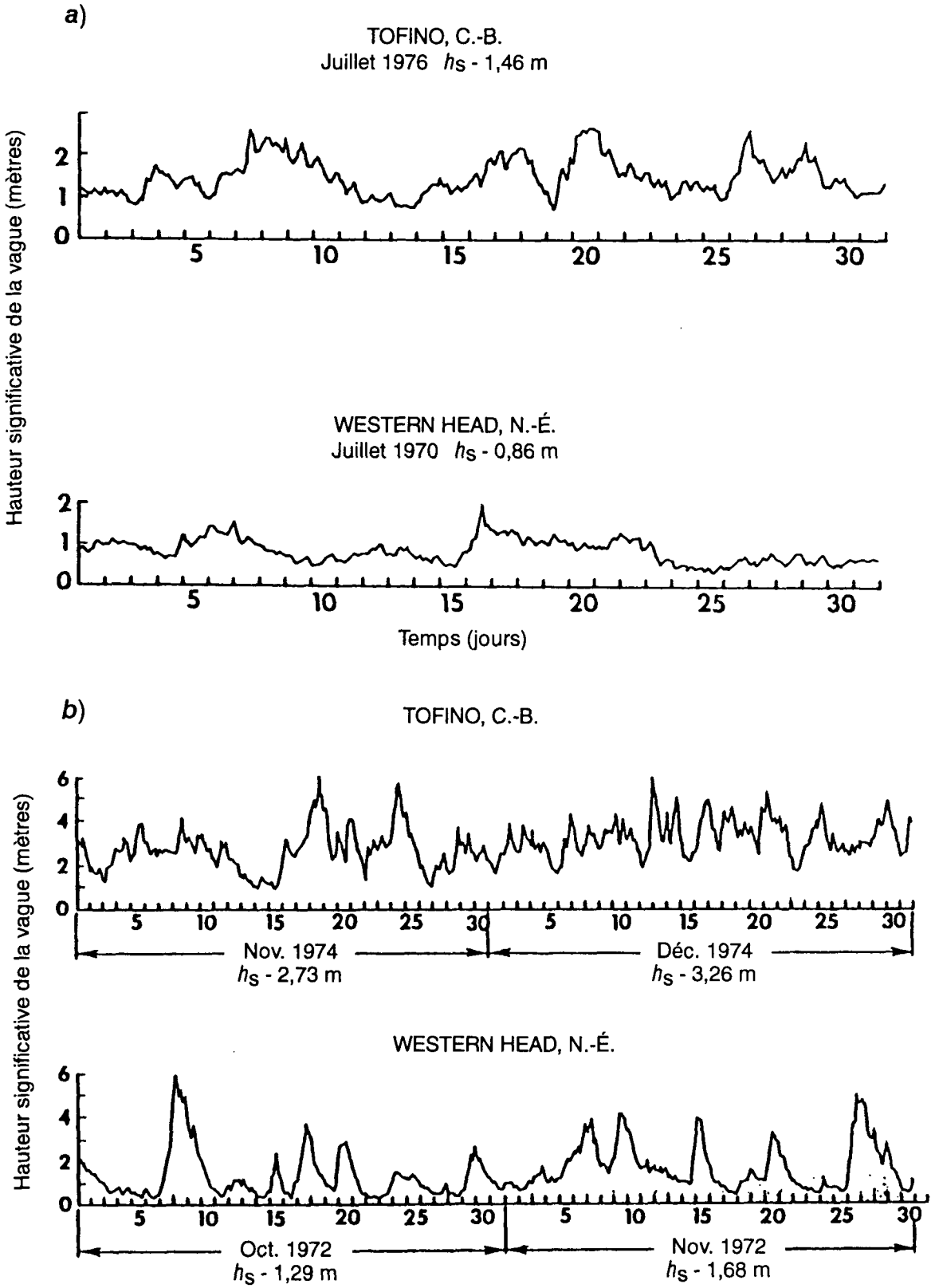


Figure 6 **Données pour certaines périodes sur les vagues mesurées au large de Tofino, Colombie-Britannique, et de Western Head, Nouvelle-Écosse** (tiré du Service sur les données marines, Ottawa)

cinq jours en hiver, de telle sorte que les poussées d'énergie sont fréquentes et relativement régulières.

Les milieux de houles sont divisés en deux types selon qu'il s'agisse de côtes ouest ou est. Dans le premier cas, les vents de tempête sont rares et les vents locaux sont généralement de terre. Les houles arrivantes ont généralement une fréquence et une direction constantes. L'hydrodynamisme est fréquemment élevé et peu variable. Dans le cas des côtes est où prévaut la houle, les vents sont généralement de mer et l'hydrodynamisme est généralement constant. Dans tous les milieux de houles, le passage de cyclones tropicaux (ouragans) entraîne un hydrodynamisme très élevé pour une courte période à intervalles peu fréquents et irréguliers.

De par sa situation septentrionale dans la zone des ondes de tempête, le Canada risque peu que ses côtes soient souvent battues par la houle, mais ce type de vagues constitue parfois une composante importante du régime des vagues tant sur les côtes du Pacifique que sur celles de l'Atlantique.

Les milieux marins dits protégés sont abrités de la houle, situés à l'extérieur des bandes de perturbations tempérées ou protégés par la glace de mer. Dans la plupart des cas, il s'agit de mers bordières, telles la baie d'Hudson, le golfe du Saint-Laurent, la mer de Beaufort ou les Grands Lacs. Comme il s'agit de côtes où l'hydrodynamisme est généralement faible, des poussées occasionnelles d'énergie, comme sous l'effet d'ondes de tempête, sont des événements imprévisibles mais extrêmement importants.

1.2.2 Glace

Dans la plupart des cas, la glace elle-même n'agit pas directement sur les côtes; elle constitue toutefois un important facteur de modification du régime régional des vagues. Ainsi, la glace peut avoir un effet local très important sur le transport des sédiments (Dionne, 1984) ou sur la formation de modelés côtiers, tels les levées de blocs (Rosen, 1979). La présence de la glace de mer a pour principal effet d'empêcher ou de limiter la formation des vagues. La mesure dans laquelle les vagues sont modifiées dépend de la durée de la présence de la glace et de la distribution de celle-ci (puisqu'elle constitue un facteur limitant le fetch). Dans l'hémisphère nord, les régions côtières exposées du sud de l'Alaska (60° N.) et du nord de la Norvège (65° N.) sont généralement libres de glace toute l'année. D'autre part, les processus exercés par les vagues sur les côtes abritées de l'Amérique du Nord peuvent être modifiés par la présence de glace littorale jusque assez loin au sud, par exemple à Cape Cod ou au lac Érié (45° N.). Cette variation régionale est due essentiellement aux variations du climat et des courants océaniques.

L'hydrodynamisme à la hauteur du littoral est aussi modifié par la croissance de la banquise côtière ou d'un pied de glace qui absorbent ou réfléchissent les vagues arrivantes. Ces glaces littorales se forment généralement avant la glace de mer et persistent après la fonte de celle-ci, ce qui réduit d'autant la période d'eau libre.

Le rôle de la glace ne présente guère d'importance pour de nombreux milieux côtiers du monde; il est donc fréquemment négligé ou traité brièvement. Même si on considère que la glace de mer est généralement un phénomène simplement arctique (ou antarctique), les navigateurs qui sillonnent les eaux des Grands Lacs, du golfe du Saint-Laurent ou des Grands Bancs de Terre-Neuve estiment que la formation de glace en hiver est un facteur environnemental majeur dont l'importance

dépasse souvent celle des vents et des vagues.

1.2.3 Variations du niveau de l'eau : marées, ondes de tempête et tsunamis

Les variations du niveau de l'eau à la ligne de rivage constituent un facteur important des processus côtiers, qu'il s'agisse de changements périodiques prévisibles ou de changements irréguliers et peu fréquents. Les principales caractéristiques de ces variations sont la fréquence et l'ampleur. Les périodes des marées sont généralement diurnes ou semi-diurnes, mais peuvent aussi être mixtes, c'est-à-dire présenter une combinaison de ces deux types. Cette variabilité est attribuable aux dimensions du plan d'eau sur lequel agissent les forces génératrices de marée. Parfois à l'intérieur d'un même océan, il existe un certain nombre de bassins différents sur lesquels s'exerce la marée, chacun présentant sa propre période naturelle d'oscillation; cela explique pourquoi une partie d'un océan peut présenter un type de marée différent de celui d'une autre partie du même océan. À l'échelle du globe, les océans Arctique et Atlantique sont caractérisés par des marées semi-diurnes, tandis que le golfe du Mexique, la mer de Java et les océans Pacifique, Indien et Antarctique ont des marées mixtes ou semi-diurnes (Davies, 1972).

La période de la marée est importante en ce qui a trait aux processus côtiers puisqu'elle détermine la période de temps durant laquelle la zone intertidale est exposée ou submergée chaque jour ainsi que la période de temps au cours de laquelle les processus exercés par les vagues peuvent agir à différentes hauteurs sur le littoral.

Le marnage présente aussi une grande importance puisqu'il contrôle la distribution de l'énergie des vagues sur le littoral. L'efficacité de l'action des vagues diminue à mesure qu'augmente le marnage étant donné que l'énergie disponible est dissipée sur une section verticale de plus en plus haute (Hayes, 1975). En pleine mer, les variations maréales du niveau de la mer sont généralement faibles mais, sur la côte, les intervalles de 2 m ou plus sont fréquents. En général, le marnage s'accroît lorsque la composante semi-diurne est importante ou lorsque les marées pénètrent dans des échancrures en entonnoir (la baie de Fundy, la baie d'Ungava et les principaux bras du sud de l'île de Baffin). Dans les mers bordières, telles que le golfe du Saint-Laurent et la mer de Beaufort, le marnage est inférieur à 50 cm et les variations du niveau de l'eau produites par les phénomènes météorologiques (c.-à-d. les ondes de tempête) sont plus importantes. Davies (1972) a décrit les caractéristiques mondiales des marées de la façon suivante :

- macrotidales - semi-diurnes avec marées de vive-eau supérieures à 4 m;
- mésotidales - marées diurnes, semi-diurnes et mixtes avec un marnage de vive-eau de 2 à 4 m;
- microtidales - diurnes ou mixtes, avec marées de vive-eau inférieures à 2 m.

Il existe des exceptions à cette classification générale mais, pour une analyse régionale, cette approche permet de décrire les effets modificateurs des marées sur les vagues.

Le marnage peut varier périodiquement selon les forces d'attraction relatives du soleil et de la lune. Les marées de vive-eau ou grandes marées se produisent deux fois par mois lunaire, lorsque le soleil et la lune sont alignés l'un par rapport à l'autre. À

cette période, les marnages peuvent dépasser de 20 % les niveaux normaux. Les marées de morte-eau à faible marnage se produisent aussi deux fois par mois, lorsque le soleil et la lune sont à angle droit l'un par rapport à l'autre; les marnages peuvent diminuer jusqu'à 20 % de moins que le niveau moyen. Par exemple, le marnage prévu pour la baie Frobisher dans le sud-est de l'île de Baffin varie de moins de 5 m aux marées de morte-eau à plus de 11 m aux marées de vive-eau. Se superposent à ces variations bimensuelles les marées d'équinoxes, où le marnage des vives-eaux est supérieur à la moyenne.

Les ondes de tempête, qui sont liées à de forts vents de mer, entraînent des variations du niveau des eaux du littoral, ce qui peut causer l'inondation des hautes-plages de faible élévation ou une dissipation de l'énergie des vagues au-dessus du niveau normal d'activité. Les lames de plus de 1,0 m sont fréquentes dans la mer de Beaufort, la baie d'Hudson et le golfe du Saint-Laurent et sont fréquemment associées à d'intenses perturbations. De nombreuses études ont été consacrées à une importante perturbation dépressionnaire qui s'est produite en 1953, dans le sud de la mer du Nord, et qui avait provoqué une érosion côtière considérable, des dommages matériels et des morts. Cette perturbation s'est produite lors des marées de vive-eau printanière et a engendré des vents de plus de 250 km/h, avec des lames de plus de 3,0 m au rivage et des vagues de 6,0 m de hauteur (King, 1972). Les ondes de tempêtes météorologiques, où l'on note les caractéristiques de l'oscillation horizontale ou de la seiche, ont fait l'objet de vastes études dans les Grands Lacs; elles sont particulièrement fréquentes lorsque des vents violents soufflent parallèlement aux axes des lacs Érié et Ontario (figure 7).

Les tsunamis sont des ondes déclenchées par un choc sismique du fond marin, généralement causées par des tremblements de terre, qui entraînent des perturbations des eaux à très grande échelle. D'habitude, les tsunamis sont confinés aux côtes de

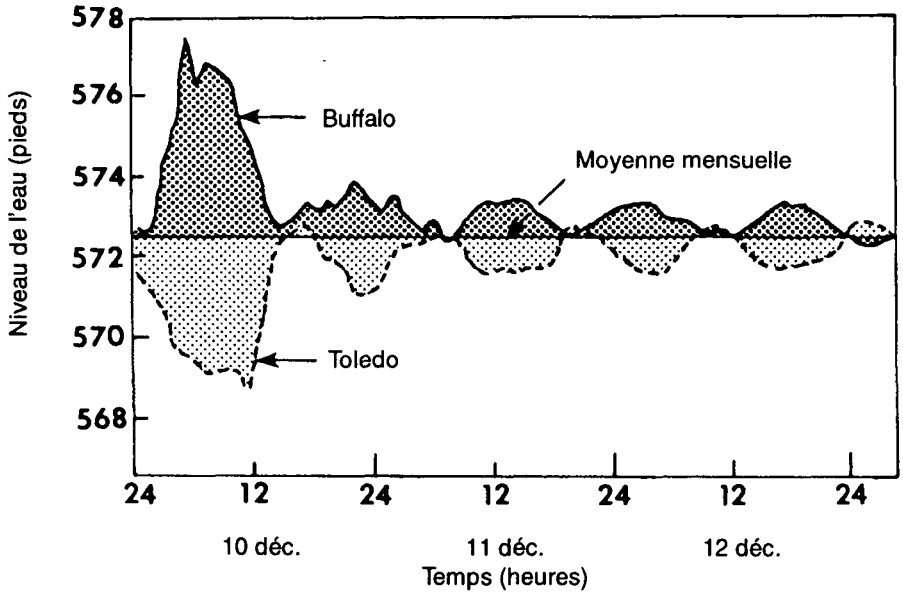


Figure 7 **Niveaux de l'eau du lac Érié à Buffalo, New York, et Toledo, Ohio, illustrant le passage d'une onde de tempête engendrée par le vent suivie d'une seiche** (tiré de Ragotzkie, 1974)

l'océan Pacifique à cause de l'activité volcanique et tectonique qui caractérise cette région. Il se produit un train de grandes vagues qui peuvent causer de très fortes élévations du niveau des eaux et provoquer des dégâts considérables sur la côte. On a enregistré des hausses de niveau de l'eau de plus de 2 m sur la côte extérieure de la Colombie-Britannique (Murty, 1983). L'effet des tsunamis est plus marqué sur les côtes bordant des eaux très profondes, puisque en raison de leur taille, ils dissipent leur énergie sur les fonds marins avant de frapper le rivage.

1.2.4 Milieux soumis aux processus des vagues et marées

La définition par Davies (1972) de tous les milieux du globe où agissent les marées et les vagues fournit un cadre de base permettant de décrire les variations régionales des processus littoraux. Hayes (1975) a modifié cette approche en combinant les éléments vagues et marées et en proposant trois milieux principaux :

Les côtes où prévaut l'action des vagues : milieu généralement microtidal, souvent caractérisé par la présence de deltas et de cordons littoraux, là où il y a des sédiments (p. ex., le sud du golfe du Saint-Laurent et la mer de Beaufort).

Les côtes où prévaut l'action des marées : milieu généralement macrotidal, souvent caractérisé par la présence de wadden ou de marais d'eau salée, là où il y a des sédiments (p. ex., la baie de Fundy, la baie d'Ungava).

Les côtes à énergie mixte : milieu généralement mésotidal; souvent caractérisé par la présence de deltas de marée et d'îles-barrières atrophiées; milieu complexe battu par les vagues et les marées (p. ex., la partie ouest du détroit de Georgia).

Il faut tenir compte de l'importance de la glace de mer et de la glace de rivage. De nombreuses sections de la côte sont caractérisées par une courte saison d'eau libre à cause de la présence de glace, qui modèle les vagues. Sur ces côtes, les rôles des processus fluviaux, des forces de poussée des glaces et à l'occasion des écoulements gravitaires (p. ex., solifluxion) sont importants dans le façonnement du relief côtier et le transport de sédiments littoraux. Dans ces milieux côtiers, la saison d'eau libre est généralement inférieure à trois mois et les littoraux sont fréquemment caractérisés par la présence d'îles-barrières instables peu élevées, par de nombreux deltas et, là où le relief est plus élevé, par de vastes pentes d'éboulis (*cf.* divisions 4.4.5 et 4.4.9).

Un autre facteur dont il faut tenir compte, bien qu'il soit négligeable au Canada, consiste en l'action des communautés biologiques des régions tropicales, notamment, la croissance du corail. Sur ces côtes où domine l'action des agents biologiques, la forme et les caractéristiques d'un rivage sont modifiées par le développement des récifs. Contrairement aux marais d'eau salée, aux dunes ou aux systèmes de mangrove, qui se développent sur des sédiments côtiers existants, un récif corallien est une forme de relief créée par l'activité biologique. Les récifs modifient le régime des vagues côtières en produisant une lagune abritée, à hydrodynamisme faible, qui protège le rivage. Les processus qui forment et façonnent les récifs sont partiellement liés aux paramètres physiques (vagues et marées) mais sont surtout fonction des processus biologiques.

Les variations régionales des processus qui modifient la forme des côtes sont importantes et permettent de comprendre pourquoi les côtes varient de façon différente ou selon des vitesses variables. En dernier lieu, il faut aussi tenir compte des matériaux sur lesquels agissent ces processus.

1.3 Matériaux

1.3.1 Forme et morphologie des continents

Le développement tectonique des masses continentales au cours des périodes géologiques a entraîné la distribution des terres et des eaux et la forme physiographique de base des bordures des compartiments continentaux, telles que nous les connaissons aujourd'hui. La forme des continents et, inversement, la taille et la forme des océans adjacents modifient considérablement les configurations mondiales des courants océaniques et de la circulation des vents. L'absence de terre dans l'hémisphère sud au voisinage de 60° de latitude, dans la zone des vents d'ouest, explique la formation de vents violents et de grandes vagues toute l'année. Ailleurs, les bassins océaniques bien définis constituent des plans d'eau de forme distincte. L'orientation régionale des côtes par rapport aux vents dominants et aux vagues, notamment les côtes occidentales quasi rectilignes des Amériques ou la forme en entonnoir du golfe du Bengale, est un facteur important dans la description des milieux locaux soumis aux processus. Ce n'est pas un hasard que sur les cartes régionales la fréquence des zones à hydrodynamisme élevé soit supérieure sur les côtes qui font face à l'ouest.

Bien que la configuration locale précise des côtes (c.-à-d. fjords, deltas, flèches littorales et estuaires) résulte d'événements géologiques récents, les directions régionales sont toujours liées à des facteurs tectoniques anciens. Les côtes de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Écosse suivent l'axe de la structure des Appalaches et la côte ouest, les directions de la Cordillère. Inman et Nordstrom (1971) ont tenté d'expliquer l'origine et la morphologie des côtes par la tectonique régionale. Là où l'activité tectonique a produit des côtes de collision, le relief côtier est généralement élevé et les plateaux continentaux sont étroits ou absents (p. ex., la Colombie-Britannique). Au contraire, sur les côtes continentales plus stables, qui ont été soumises à l'érosion terrestre, le relief est plus bas et les dépôts de sédiments moins résistants sont fréquents. Les côtes des océans Atlantique et Arctique du Canada sont des exemples de ce type de côte tectonique.

Le relief de l'intérieur des compartiments continentaux détermine, dans une large mesure, la taille des bassins hydrographiques et l'apport de sédiments érodés sur les côtes. Les bassins hydrographiques des côtes de haute montagne sont généralement petits et les apports de sédiments faibles. Au contraire, de grands bassins de drainage associés à une météorisation terrestre active peuvent fournir de grands volumes de sédiments au milieu côtier (p. ex., le réseau du fleuve Mackenzie). De même, de grands volumes de sédiments sont nécessaires pour produire des dépôts côtiers là où les profondeurs d'eau sont importantes, tandis que le développement de deltas ou d'îles-barrières sur les plateaux continentaux peu profonds peut s'effectuer rapidement.

1.3.2 Affleurements de la roche en place et approvisionnement en sédiments

La résistance qu'opposent les matériaux côtiers à l'érosion marine ou autres types de météorisation est un facteur important qui

détermine la rapidité de l'évolution du littoral. Les affleurements de roches précambriennes très anciennes et résistantes (p. ex., Peggys Cove, Nouvelle-Écosse) sont généralement associés à des côtes stables où les vitesses de changement sont de l'ordre de quelques centimètres ou millimètres par siècle. Les affleurements non résistants de roches sédimentaires plus récentes (p. ex., les grès rouges peu résistants de l'Île-du-Prince-Édouard) des côtes exposées peuvent toutefois être érodés par l'action de la mer à des vitesses qui se mesurent en mètres par année. La résistance à l'érosion exercée par les processus marins peut généralement être assimilée à la résistance à d'autres processus de météorisation tels le gel-dégel, l'affouillement fluvial ou glaciel, qui sont liés à des apports d'énergie mécanique exercée sur des surfaces rocheuses. Dans les régions affouillées par les nappes glaciaires du Pléistocène, l'érosion des affleurements de la roche en place et l'accumulation subséquente de sédiments le long des marges glaciaires ont été largement déterminées par les caractéristiques régionales de la roche en place. Les vitesses de météorisation dépendent aussi de processus chimiques liés à la température et aux précipitations.

L'importance globale de ces processus de météorisation ou d'érosion sur les roches exposées permet de déterminer les vitesses d'approvisionnement en sédiments à la zone côtière. Là où les sédiments sont déversés directement par les cours d'eau ou apportés à la côte suite à l'érosion marine de falaises de matériaux meubles ou peu résistants, la zone côtière est fréquemment caractérisée par la présence d'accumulations telles que les plages, les wadden ou les deltas.

Les caractéristiques plus précises d'une section de côte sont en partie gouvernées par son évolution. Davies (1972) souligne la correspondance des côtes soumises à la glaciation pléistocène et la distribution actuelle des galets et des cailloux de plage. La distribution des matériaux littoraux peut donc résulter à la fois de facteurs actuels et de facteurs historiques. Une série de facteurs, notamment les variations du niveau de la mer et les effets des mouvements de la glace du Pléistocène, a modifié l'apport en sédiments ou y a contribué ou, encore, a influé sur le développement de la topographie côtière. Les facteurs historiques aident à comprendre le développement de la côte au fil des années. Forbes et Taylor (1987) ont traité cet aspect de l'évolution du littoral pour la côte atlantique du Canada.

1.4 Processus côtiers et dynamique des littoraux

Les caractéristiques régionales d'une côte sont déterminées par les facteurs principaux considérés précédemment. À l'échelle plus locale, c'est la dynamique d'une plage ou d'une section donnée de littoral qui influe sur le devenir des hydrocarbures échoués. On peut donc avancer des commentaires généraux et affirmer, par exemple, que le nettoyage naturel des littoraux serait plus rapide dans un milieu microtidal, où dominent l'action des vagues et des ondes de tempête, que dans un milieu macrotidal, abrité. Pour certains déversements particuliers, toutefois, la dynamique locale des processus côtiers et des modifications du littoral détermine le sort des hydrocarbures échoués. Il faut donc tenir compte de ces processus, indépendamment des concepts régionaux ou des définitions généralisées des milieux côtiers.

Les processus côtiers peuvent se définir simplement comme étant les forces dont l'action a déterminé le façonnement ou l'évolution d'un littoral. Les principaux

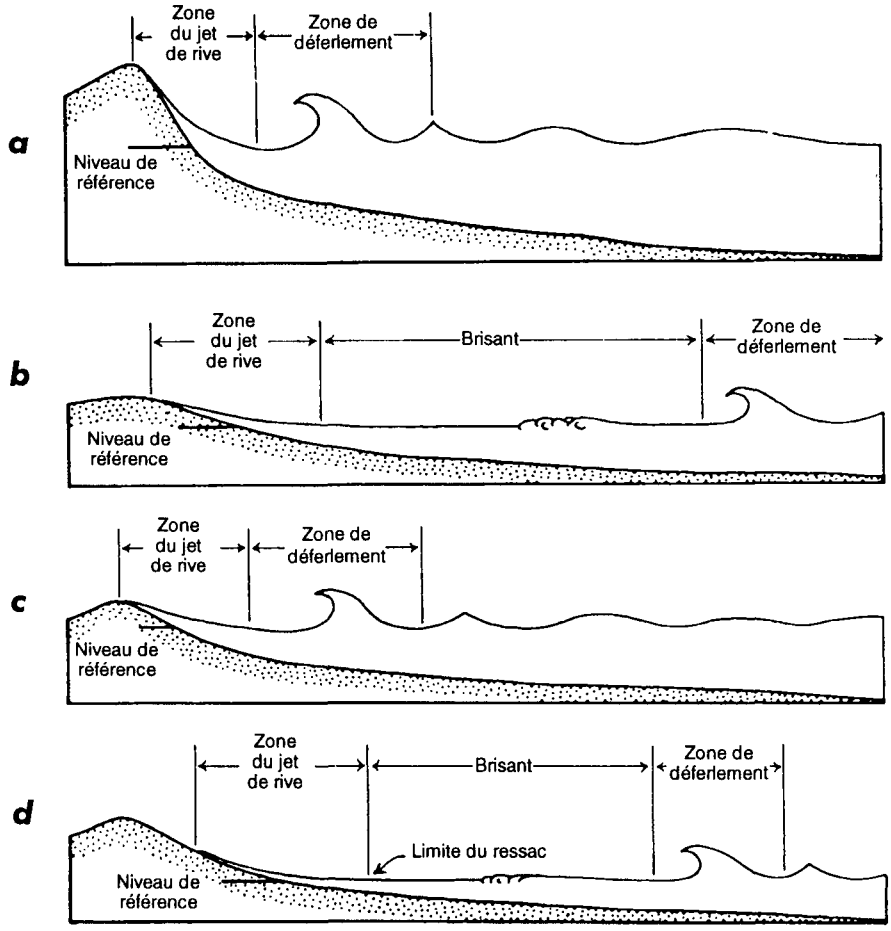
processus physiques sont les vagues, les marées, les vents et la glace. C'est la combinaison précise de ces processus qui donne à chaque section de côte ses caractéristiques physiques uniques. Les auteurs définissent dans la présente sous-section les principaux processus et expliquent leur rôle dans la dynamique de la zone côtière.

1.4.1 Vagues et brisants

La génération de vagues à la surface de l'eau sous l'effet combiné des vents et de la gravité entraîne un transfert d'énergie entre les couches supérieures de l'eau. Cette énergie est en grande partie dissipée en eau peu profonde ou sur le littoral, lorsque les vagues sont déformées sous l'effet du frottement exercé par le fond marin. Les caractéristiques des vagues et les niveaux d'énergie des vagues à la côte, ou hydrodynamisme, sont influencés en grande partie par la vitesse et la durée des vents qui soufflent sur les longueurs de course des secteurs adjacents. L'hydrodynamisme au littoral dépend non seulement des caractéristiques des vagues arrivantes, mais aussi de la profondeur des eaux de l'avant-plage, de la présence de récifs et de la configuration du littoral. À titre d'exemple, sur une côte linéaire où les eaux de l'avant-plage sont profondes, presque toute l'énergie des vagues arrivantes est dirigée directement sur le rivage. Au contraire, sur une côte échancrée présentant de nombreux promontoires rocheux, petites baies abritées et hauts-fonds au-delà du rivage, une large part de l'énergie des vagues se dissipe sur les hauts-fonds avant d'arriver à la côte. Dans ce cas, il s'agit d'un milieu à hydrodynamisme mixte (élevé et faible).

L'énergie des vagues est transmise par le frottement exercé sur le fond, le déferlement des vagues et le jet de rive. Les zones de dissipation maximale de l'énergie sont situées dans la zone de déferlement et dans la zone du jet de rive (figure 8). On distingue trois principaux types de vagues déferlantes (figure 9) (Galvin, 1968). Les vagues du type à déversement, fréquentes sur les pentes faibles, se caractérisent par de la turbulence et par une crête de vague écumante. Le jet de rive est une composante importante de telle sorte que l'énergie des vagues est dissipée vers l'avant. Les vagues en volutes sont plus fréquentes sur les pentes plus raides; le front de la vague devient plus abrupt et la crête s'effondre sur la base de la vague. L'énergie est transmise verticalement vers le bas et de l'air est emprisonné et comprimé lorsque la vague plonge. Les vagues du type à gonflement s'observent surtout sur les pentes abruptes; la crête de la vague demeure relativement uniforme et le jet de rive monte la pente en ne produisant qu'une petite quantité d'écume.

Le type de vague déferlante et la largeur des zones de déferlement, de brisant et de jet de rive dépendent des profondeurs de l'eau et de la topographie de l'avant-plage. Les vagues se brisent fréquemment en mer, à l'endroit d'une barre ou d'un haut-fond près de la côte ou, lorsque les pentes sont faibles (figure 8). Quiconque se tiendrait sur certaines plages lors d'une tempête et regarderait les vagues arrivantes se briser sur l'avant-plage verrait qu'elles perdent leur énergie avant d'atteindre la plage de telle sorte qu'au bord, il n'y a que de petits jets de rive. L'élément clé dans tous les cas est la taille des vagues et la profondeur de l'avant-plage. Toute variation des hauteurs d'eau, liée aux marées ou aux ondes de tempête, peut entraîner une modification dans le type de vagues déferlantes. Sur les côtes où le marnage est élevé (>4 m), les vagues en volutes, se brisant directement sur la plage (figure 8*c*), s'observent plutôt aux périodes de pleine mer. À marée basse toutefois, les eaux recouvrant l'avant-plage



a) Plage raide avec eau profonde à l'avant-plage; les vagues déferlantes en volutes se produisent près du littoral et le brisant est absent ou étroit.

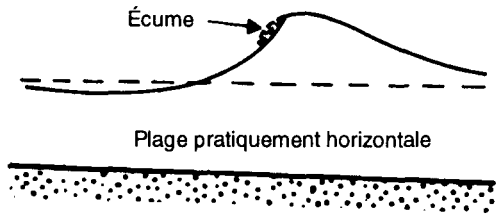
b) Une plage en pente douce comporte toujours un large brisant.

c) Une plage en pente moyenne à la pleine mer; vagues déferlantes en volutes, pas de brisant.

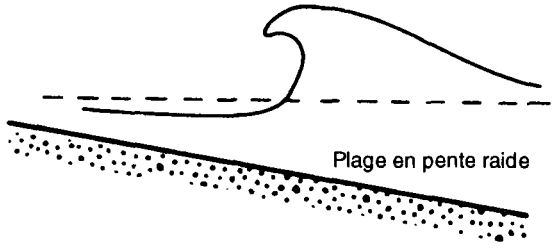
d) Plage en pente moyenne à la basse mer; vagues déferlantes à déversement, large brisant.

Figure 8 **Variations de la largeur du brisant et types de vagues déferlantes** (tiré d'Ingle, 1966)

Déferlement à déversement



Déferlement en volutes



Déferlement à gonflement

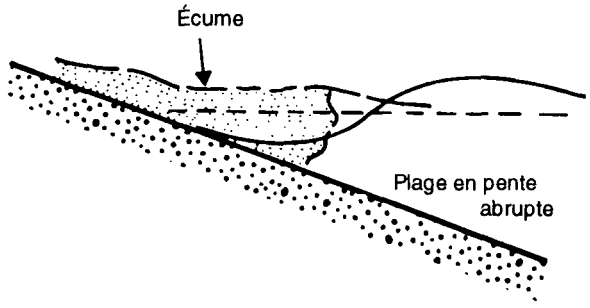


Figure 9 **Les trois principaux types de vagues déferlantes** (le pointillé marque le niveau moyen des eaux) (tiré de Komar, 1976)

étant moins profondes, les vagues se brisent en mer et ce sont les vagues à déversement qui dominent (figure 8*d*).

L'énergie transmise au rivage par les vagues est responsable de l'érosion des affleurements de la roche en place et du transport ou de la redistribution des sédiments. À de nombreux égards, ce sont l'hydrodynamisme et les processus mécaniques du transfert d'énergie qui déterminent la dynamique des changements des côtes. Les vitesses d'érosion et de transport augmentent avec l'accroissement de l'hydrodynamisme, et les variations des niveaux d'énergie des vagues en fonction du temps (qu'il s'agisse de variation saisonnière ou liée à des tempêtes) entraînent différentes vitesses d'érosion ou de transport des sédiments.

Les niveaux d'énergie des vagues sur le littoral et les processus mécaniques qui se produisent lorsque les vagues déferlent et montent sur un rivage ont une influence directe sur la dispersion physique des hydrocarbures à la surface des eaux dans la zone de l'avant-plage ou sur le littoral. Ces processus influent également sur le brassage des hydrocarbures et de l'eau et la formation d'émulsions, telles la «mousse au chocolat». Sur les plages très abruptes ou les littoraux rocheux, il se peut que les vagues arrivantes soient réfléchies. Cette réflexion peut empêcher les hydrocarbures de s'échouer sur cette section du rivage et la turbulence créée par la rencontre des vagues arrivantes et des vagues réfléchies peut entraîner le brassage et la dispersion des hydrocarbures dans l'eau (Owens, 1977a).

1.4.2 Processus maréaux

Les variations périodiques du niveau de la mer résultant des effets gravitationnels du soleil et de la lune ont été expliquées brièvement. Les variations verticales du niveau de la mer entraînent la formation de courants lorsque l'eau se déplace dans un sens, puis dans l'autre, avec le flot et le jusant. Ce mouvement horizontal peut avoir un effet important sur le transport des sédiments de la zone précôtière ou intertidale. Les courants de marée sont particulièrement importants là où le

déplacement horizontal des eaux est restreint, comme dans des chenaux ou des bras, même aux endroits où le marnage est faible. Ce type de resserrement comporte notamment les chenaux qui se trouvent entre des cordons littoraux ou les îles-barrières qui drainent des marais intérieurs et des systèmes de lagunes. Les courants sont également rapides là où le marnage est élevé (>4 m), comme dans le passage Minas de la baie de Fundy, où on a enregistré des vitesses atteignant 5 m/s (Owens et Bowen, 1977).

Sur les côtes peu élevées, lorsque le marnage est fort, de vastes zones peuvent être exposées à marée basse. De telles battures intertidales sont caractéristiques des milieux macrotidaux, tels la baie de Fundy ou la baie d'Ungava. Si les courants engendrés par les mouvements des eaux liés à la marée ont suffisamment de vitesse pour transporter les sédiments présents à ces endroits, de grands volumes de matériaux peuvent être redistribués à chaque cycle de marée. Dans le bassin Minas, de vastes masses de sable sont constamment en mouvement, les rides de sable migrant sur la zone intertidale sous l'effet des courants de marée associés au flot et au jusant (Dalrymple *et al.*, 1975).

Les variations des niveaux de l'eau causées par la marée jouent un rôle particulièrement important dans la distribution de l'énergie des vagues au littoral, étant donné que l'efficacité de l'action des vagues diminue avec l'augmentation du marnage. Dans les milieux où l'action de la marée est nulle ou faible, l'énergie des vagues arrivantes est transmise au rivage le long d'une ligne. C'est ce qu'on observe à la figure 10 où les hauteurs de la marée sont rapportées pour une période de 24 h pour un milieu microtidal à marée semi-diurne (marnage <2 m) et un milieu macrotidal (marnage >4 m) à marée semi-diurne. Dans l'exemple des conditions microtidales (marnage ≈ 1 m), toute l'énergie des vagues arrivantes au cours d'une période de 24 h est concentrée en une bande verticale large seulement de 1 m. Lorsque le marnage est plus grand, 5 m dans cet exemple, la même quantité d'énergie serait répartie sur une bande beaucoup plus large. En outre, le niveau de l'eau change continuellement au cours du flot et du jusant, de telle sorte que

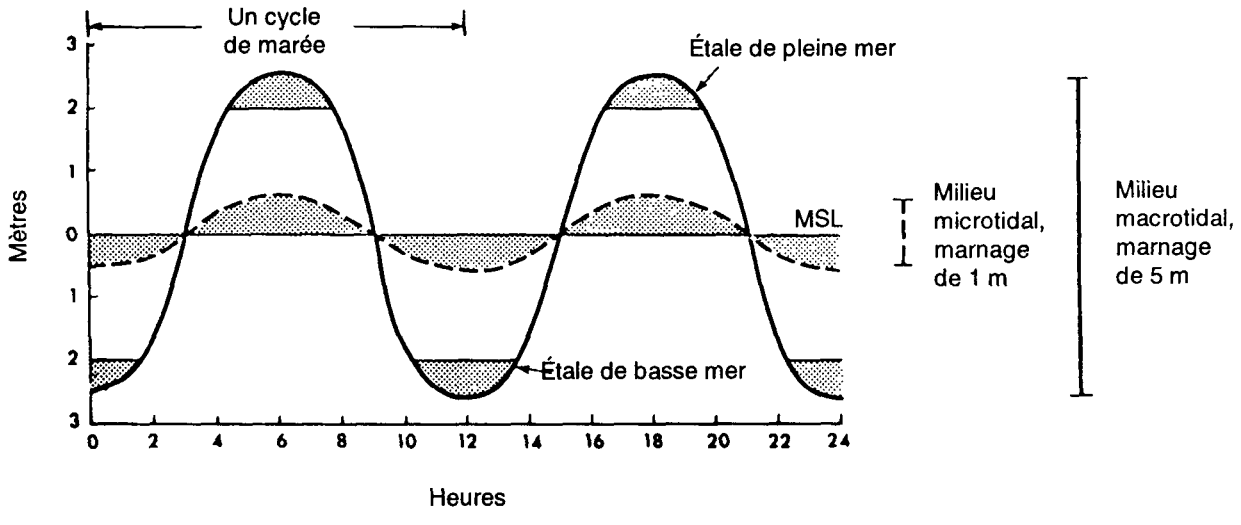


Figure 10 **Courbes représentant les niveaux de l'eau des marées semi-diurnes types d'un milieu microtidal et macrotidal** (les zones ombragées correspondent aux hauteurs auxquelles est concentrée l'énergie des vagues sur le littoral)

l'hydrodynamisme entre en jeu à chaque hauteur seulement pour une courte période de temps. Lorsque la marée passe du flot au jusant et du jusant au flot, il se produit une période où le niveau reste constant pendant trois heures au maximum, il s'agit de l'étale. Durant cette période, le niveau de l'eau est relativement constant et l'hydrodynamisme s'exerce à une hauteur donnée. L'action des vagues, dans les milieux mésotidaux et macrotidaux, est donc maximale à la pleine mer et à la basse mer.

Pour l'analyse des processus qui s'exercent localement sur les côtes, il faut tenir compte des cycles des marées de mortes-eaux et de vives-eaux. Lorsque la différence entre l'amplitude de ces deux marées est importante (>1 m), l'activité des vagues n'est efficace sur les portions les plus élevées de la zone intertidale que quelques heures, au moment de l'étale de pleine mer, quelques jours chaque mois, pour une hauteur de vague constante.

L'amplitude de la marée constitue un élément déterminant pour les processus biologiques intertidaux, puisqu'elle détermine l'exposition et la submersion alternées du substrat intertidal. Comme pour les hydrocarbures échoués, les taux de météorisation physique, chimique et biologique dépendent en partie de la période durant laquelle ces hydrocarbures sont exposés à l'action des vagues, du soleil et des vents. La partie inférieure de la zone intertidale est normalement submergée et soumise aux processus marins durant 75 % de chaque cycle de marée, tandis que la submersion près de la laisse de haute mer ne se produit qu'environ 25 % du temps. Il résulte de ces différences que les processus physiques, surtout l'action des vagues, sont plus efficaces dans les portions inférieures de la zone intertidale.

1.4.3 Processus éoliens

Les vents, qui sont le principal facteur de génération des vagues, jouent aussi un rôle plus direct dans les processus côtiers. Des matériaux de la taille du sable, ou plus petits, peuvent être transportés par le vent; cela apparaît clairement dans la formation de dunes. En période de vents violents, de grands volumes de sable peuvent être déplacés sur les plages et enfouir des hydrocarbures ou autres matériaux échoués (O'Sullivan, 1978). Le vent est aussi un facteur important d'altération des hydrocarbures, puisqu'il peut accélérer l'évaporation des fractions plus légères (p. ex., McMinn et Golden, 1973).

Sous l'effet de vents de mer violents, l'eau peut refouler sur le littoral et produire des ondes de tempête ou *des marées de tempête*. Ce phénomène peut se produire sur toutes les côtes, mais il est particulièrement fréquent dans les rentrants des côtes irrégulières. Durant les périodes de pleine mer, les vagues peuvent agir sur les portions plus élevées du littoral, qui seraient normalement au-dessus de la limite de l'action des vagues. Sous l'action des ondes de tempête, il arrive que la haute-plage soit inondée ou que les cordons littoraux, où les dunes sont basses, soient submergés.

1.4.4 Action et rôle de la glace

La glace est un agent de modification, parfois actif, parfois passif des autres processus qui s'exercent sur la côte. Au sens actif, les floes individuels ou la banquise peuvent être poussés contre les rives par les vents ou les courants et venir buter contre le littoral ou le chevaucher. Les processus de poussée glacielle (figure 11), de formation de crêtes (figure 12) ou de chevauchement par la glace (figure 13) peuvent entraîner la redistribution des sédiments et constituent des éléments dont il faut tenir compte dans

les milieux côtiers dominés par la présence de la glace (Owens et McCann, 1970).

La glace joue aussi un rôle passif, c'est-à-dire que la formation de glace à la surface de l'eau empêche la génération de vagues. La présence de glace à la surface des eaux côtières limite aussi l'action des vagues arrivantes, de telle sorte que l'énergie de ces dernières se dissipe avant d'atteindre le littoral (figure 14). La présence de glace en mer peut aussi limiter le fetch de façon que la génération potentielle de vagues soit modifiée, même si le littoral est libre de glace. À titre d'exemple, mentionnons la mer de Beaufort du nord de l'Alaska et du Canada, dans laquelle la bordure de la banquise polaire en mer limite les longueurs de fetch durant chacune des saisons d'eau libre. L'effet global de tous ces éléments modificateurs des vagues est de réduire l'hydrodynamisme par la présence de glace pendant une année complète ou partielle. Dans les régions polaires, où la saison d'eau libre est limitée à quelques semaines par année, la fréquence d'eau libre et de vents violents correspondant à un long fetch est très faible.

De la glace se forme aussi sur les littoraux, par le gel des langues d'écume et des embruns ainsi que l'accumulation de neige et de bouillie. La formation de cette couche de glace fixée au rivage, qu'on appelle généralement le pied de glace (figure 15), protège efficacement le littoral de l'action des vagues. Ce pied de glace se forme avant la glace de mer et persiste après le dégel; il réduit d'autant la période d'action potentielle des vagues sur les littoraux.

L'eau présente dans les sédiments de plage gèle lorsque les températures descendent sous le point de congélation. La formation de cette glace dans les sédiments comble les vides entre les particules et cimente les sédiments. Sur les plages polaires, l'épaisseur des sédiments non gelés, qu'on appelle la profondeur de la surface de gel ou l'épaisseur de la couche active, peut varier de moins de 10 à 25 cm durant la période d'engel à plus de 100 m durant la période de dégel (figure 16) (Taylor et McCann, 1974; Owens et Harper, 1977; Taylor, 1980a). La présence de cette glace interstitielle contribue non seulement à entraver la redistribution des sédiments, mais également à empêcher la pénétration des hydrocarbures dans les sédiments de plage.

1.4.5 Dynamique cyclique du littoral

Sous l'effet de divers processus, les sédiments côtiers sont érodés, transportés et déposés pour produire une variété de formes

Figure 11 **Crêtes de poussée glacielle formées par l'échouage de floes glaciels dans la baie Allen, près de Resolute, Territoires du Nord-Ouest** (août 1968)

Figure 12 **Crête de poussée glacielle échouée dans la zone intertidale dans la partie nord de l'île Somerset, Territoires du Nord-Ouest** (*cf.* Taylor, 1978b; photo de R. Taylor)

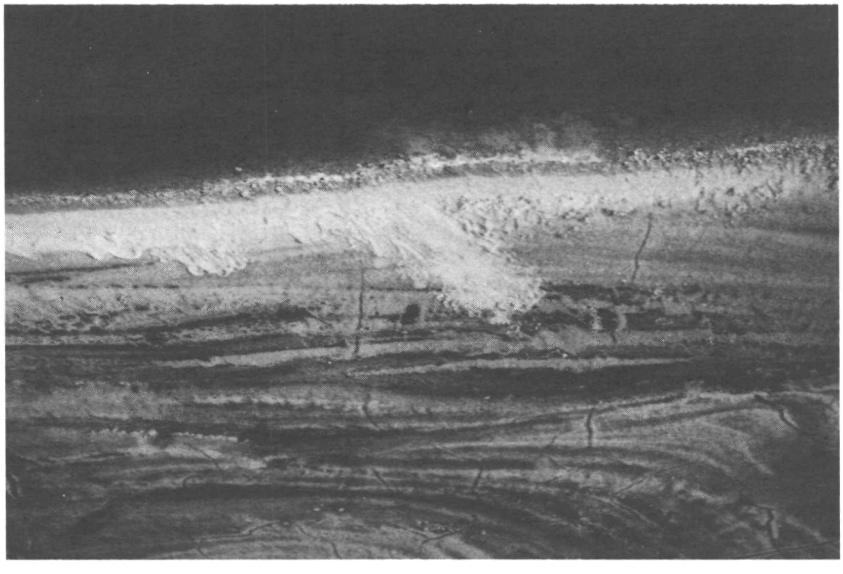
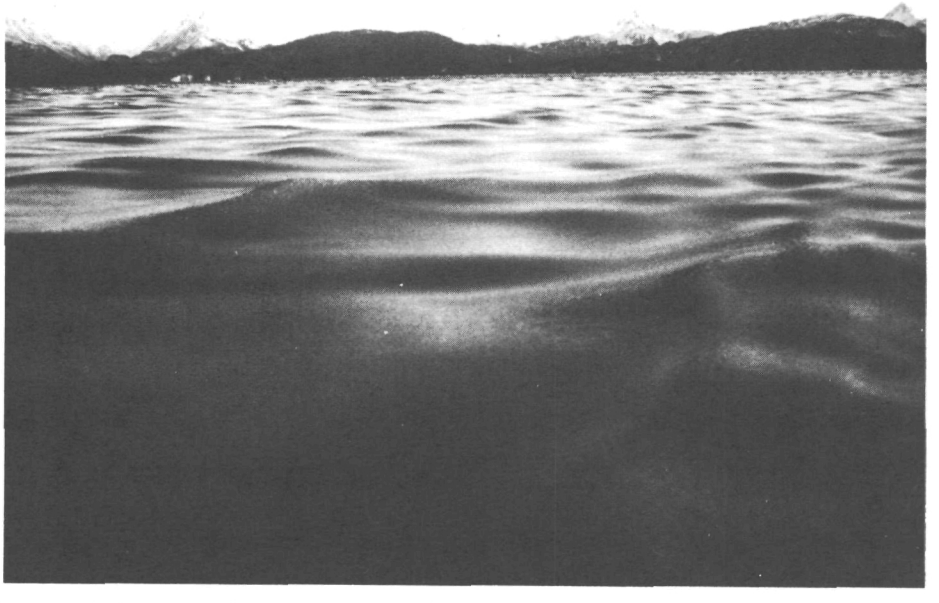


Figure 13 **Glace chevauchant la plage jusqu'à la haute-plage soulevée dans le sud de la péninsule Wollaston, détroit de Dolphin and Union, Territoires du Nord-Ouest** (septembre 1981)

a) Les vagues arrivantes de courte durée produites dans la baie Kachemak sont atténuées et ne se brisent pas à la plage (la flèche indique la ligne des eaux).



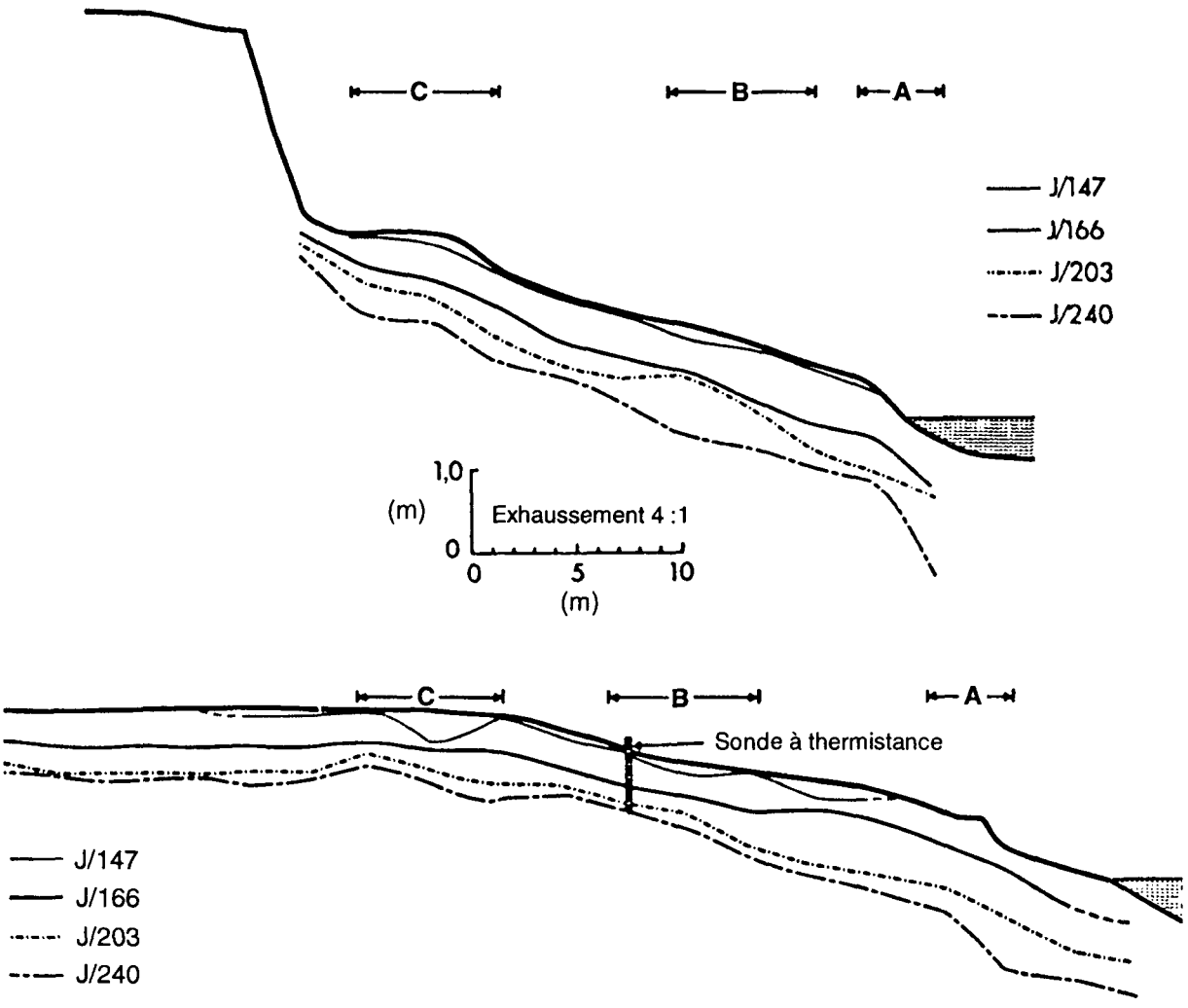
b) Surface de la mer précôtière vue d'un bateau la même journée que la photo *a*). On peut voir du frasil dans la partie inférieure droite de la photo.

Figure 14 **Effets du frasil littoral sur l'atténuation des vagues à Homer, Alaska** (décembre 1979)

a) Richibucto Head, Nouveau-Brunswick (janvier 1974)

b) Cap Ricketts, île Devon, Territoires du Nord-Ouest, photo prise à marée basse (29 juillet 1968)

Figure 15 **Stades du début de la formation du pied de glace,** *a*) ce pied de glace se développe à mesure que les langues d'écume et les embruns gèlent sur la partie supérieure de la zone intertidale; *b*) pied de glace sur une plage arctique après le déglacement



Les zones du schéma sont :
A - estran inférieur
B - estran supérieur
C - gradin de plage
(J/147 = 26 mai; J/166 = 14 juin; J/203 = 21 juillet; J/240 = 27 août)

Figure 16 **Courbes de la profondeur du front de gel à des dates choisies dans la baie Peard, Alaska** (tiré d'Owens et Harper, 1977)

structurales. Certains de ces changements se produisent de façon cyclique en réponse à des variations des marées ou à des variations périodiques de l'hydrodynamisme. Pour la plupart, ces changements touchent les plages de sable ou les sédiments de la taille du sable.

Le changement morphologique le plus fondamental est le processus de creusement et de remblaiement qui se produit à chacune des marées sur les plages sableuses (Strahler, 1966; Schwartz, 1967). Les particules de la taille du sable, quoique relativement compactées, sont espacées les unes par rapport aux autres; le jet de rive peut s'infiltrer dans ces vides. Il en résulte qu'à marée montante, certains grains de sable remontent sur la plage, poussés par le jet de rive et que d'autres grains redescendent la plage, entraînés par le retrait, plus faible (figure 17*a*)) (Duncan, 1964). Durant le reflux, comme la nappe phréatique est élevée sous la plage, les vides sont remplis d'eau de telle sorte que le retrait est alors plus marqué et que du sable est emporté vers la mer (figure 17*b*)). Malgré le faible volume total de sable qui participe à ce cycle de creusement et de remblaiement, le mouvement perpétuel du sable met en évidence la nature dynamique de la plage et l'interaction des divers processus qui s'exercent sur les côtes.

L'un des effets des variations de l'énergie des vagues en fonction du temps est la production de stades périodiques d'érosion

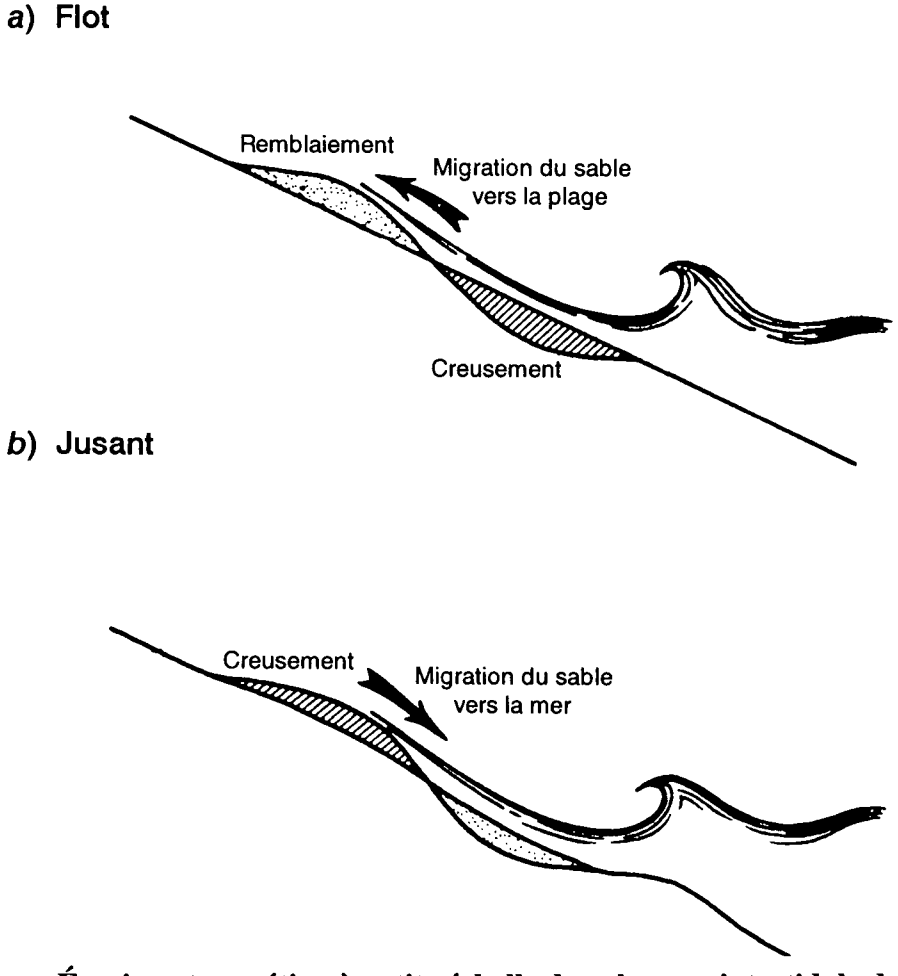


Figure 17 **Érosion et accrétion à petite échelle dans la zone intertidale durant le cycle des marées** (d'après Komar, 1976)

et d'accumulation sur les plages de sable. Durant une période d'ondes de tempête produites localement, du sable est arraché des plages et transporté vers la mer pour former un cordon ou une crête dans la zone littorale adjacente (Hayes et Boothroyd, 1969; Davis *et al.*, 1972). Le sable est remporté sur l'estran sous forme de cordon ou de crête migrant après que des houles de faible hydrodynamisme aient succédé aux ondes de tempête à fort pouvoir d'érosion. La figure 18 illustre ce phénomène; on note la migration d'un cordon ou d'une crête dans le lac Michigan après érosion de la plage par une tempête, le 19 juillet 1970. Ce cycle «tempête-accalmie» est une caractéristique fréquente des plages sableuses des milieux d'ondes de tempête. Dans certains cas, la période entre deux tempêtes est si courte que le cycle ne s'achève pas et qu'un stade d'érosion peut commencer avant que la crête ne soit soudée à la plage. Owens et Frobel (1977) considèrent une restauration après tempête en deux étapes : une réorganisation initiale, très rapide, des sédiments de plage durant le premier ou le deuxième cycle de marée, suivie d'une migration plus lente du cordon ou de la crête vers les terres. Dans l'exemple illustré à la figure 19, la crête ne mesure qu'environ 10 cm d'épaisseur; d'autres exemples tirés des milieux à ondes de tempête violentes indiquent des valeurs supérieures à 1 m. La vitesse à laquelle la crête ou le cordon migre est largement fonction du marnage. Sur les côtes où le marnage est faible, la récupération peut être achevée en quelques jours (figure 18; Owens et Frobel, 1977), tandis que sur les côtes mésotidales, la période de migration peut être de l'ordre de quelques semaines (Hayes et Boothroyd, 1969), l'hydrodynamisme n'étant pas concentré à une hauteur pour une période suffisamment longue puisque le niveau de l'eau change sans cesse. La périodicité de ces cycles «érosion-sédimentation» varie selon la fréquence du passage des tempêtes dans une région donnée. Là où existe une variation saisonnière de fréquence et d'intensité des tempêtes de basse pression, les répercussions se font sentir sur les plages quant à la périodicité des cycles, l'ampleur de l'érosion (Harper, 1980a) et la taille des cordons en migration. Dans les milieux microtidaux, la possibilité qu'un cordon ou crête achève sa migration vers les terres est très supérieure à celle des milieux mésotidaux ou macrotidaux. Il en résulte que dans les milieux d'ondes de tempête mésotidales, comme le sud de la Colombie-Britannique et les côtes occidentales de la Nouvelle-Écosse, la récupération de la plage ne peut se faire totalement l'hiver qu'en de rares occasions. Dans ce cas, ce cycle d'érosion et de récupération est souvent caractérisé par une érosion hivernale et une récupération estivale.

Ce cycle «érosion-sédimentation» à longue période est fréquent sur la plupart des côtes dont l'hydrodynamisme présente une forte composante saisonnière. Par exemple, la côte ouest de l'île de Vancouver est un milieu caractérisé par un niveau élevé d'énergie lié aux ondes de tempête qui se superposent à la houle, l'hiver, et par un plus faible hydrodynamisme, correspondant à la houle, l'été (Harper, 1980a). Shepard (1950) a étudié les variations sur les plages au cours de plusieurs années, dans le sud de la Californie, et a établi une configuration distincte d'érosion hivernale et de récupération ou de sédimentation estivale. Ce cycle été-hiver ou houle-ondes de tempête (figure 20) est caractérisé par le déplacement vers la mer du sable durant les tempêtes et la formation d'un ou de plusieurs cordons littoraux dans la zone subtidale adjacente. Ce sable migre ensuite vers les terres durant la période de houle, plus faible, pour reformer les terrasses de plage de la partie supérieure de la zone intertidale.

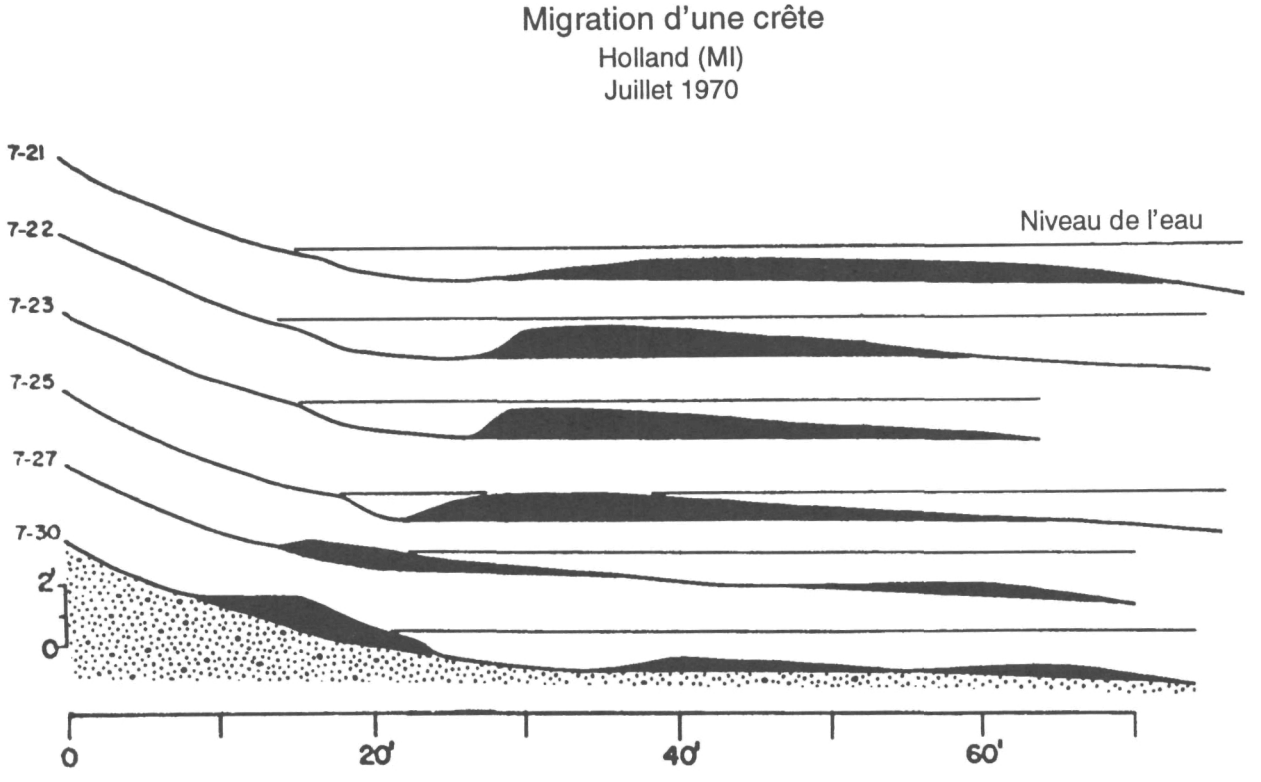


Figure 18 **Migration d'une crête littorale sur une période de 10 jours, lac Michigan** (tiré de Davis et Fox, 1971)

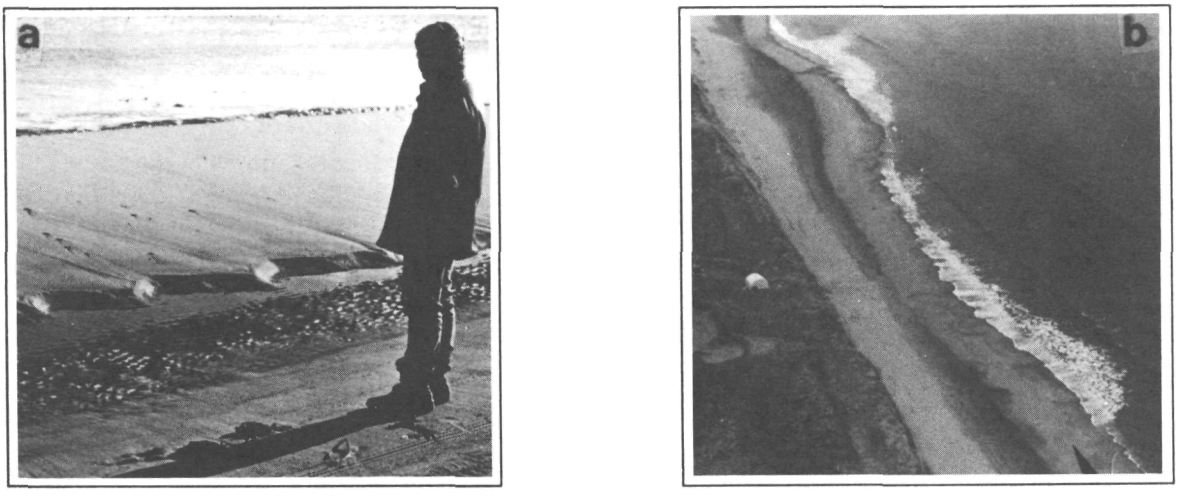


Figure 19 **Crête se soudant au rivage, Îles-de-la-Madeleine, Québec** (novembre 1974), *a*) crête se soudant à la partie supérieure de la plage près de la laisse de haute mer (tiré de Owens et Frobel, 1977) et *b*) vue aérienne de la crête soudée à la plage

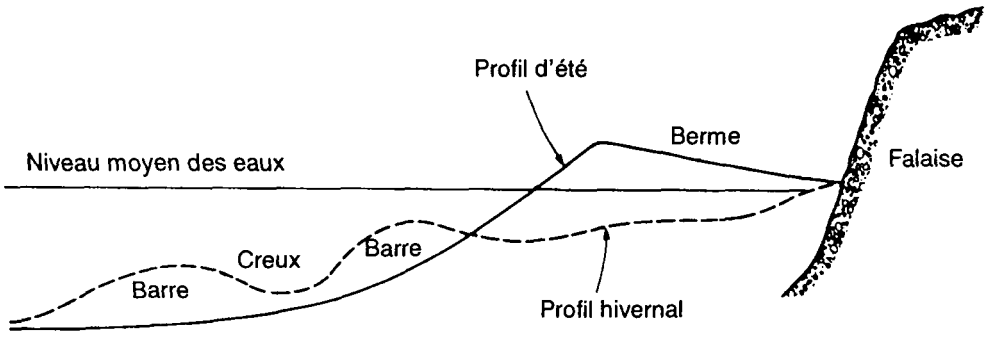


Figure 20 **Érosion hivernale d'une levée de plage et cordons littoraux et bermes formées en été** (tiré de Komar, 1976)

Les processus gouvernant les cycles «tempête-accalmie» et «été-hiver» sont les mêmes (énergie élevée-faible énergie). La différence dans ces cycles se situe uniquement dans le temps. Pour chaque section de côte, les caractéristiques de ces cycles peuvent varier (King et Williams, 1949; Hayes et Boothroyd, 1969; Fox et Davis, 1974; Owens, 1977d), mais les résultats sont semblables.

La périodicité et l'amplitude des marées exercent une influence modificatrice sur les processus liés aux vagues, tels les vitesses de creusement et de remblaiement et de migration des crêtes ou cordons littoraux. En outre, l'action des marées est manifeste sur les larges battures intertidales de sable où les cordons vont et viennent avec les courants. Exposés à marée basse, ces cordons présentent une orientation résultant des courants de jusant. L'étude des cordons à marée haute, au moyen de techniques acoustiques, révèle une réorientation et un déplacement liés aux courants de flot. De même, sur les vasières intertidales, même si la surface y est généralement plane, on note un mouvement continu des sédiments de surface avec le jusant et le flot.

Dans les chenaux de marée, où le lieu de passage des courants est resserré, les sédiments sont redistribués pour former des deltas de marée, composés d'un delta de flot et d'un delta de jusant (Hayes *et al.*, 1973; Finley, 1975; Hine, 1975; Hubbard, 1975). Ces deltas sont généralement situés sous le niveau des marées, mais certaines portions peuvent être exposées à marée basse. La morphologie de ces deltas résulte de l'interaction entre les courants de flot et de jusant ainsi que des effets des vagues sur les deltas de jusant. Cette morphologie reflète les configurations de courants de marée, qu'il est essentiel de connaître dans le cas du déploiement d'un barrage flottant en travers des chenaux de marée (Owens *et al.*, 1985). Les courants de marée ou les jets de rive forment des rides ou des dunes sous-marines, les sédiments superficiels étant continuellement redistribués sur les deltas (Hayes, 1972).

La périodicité des marées est un élément clé de la dynamique des marais d'eau salée. L'intérieur du marais, ou pré-salé, est recouvert d'eau uniquement durant les marées de vives-eaux. D'une importance cruciale pour le développement d'un marais, cette inondation cyclique influe sur les vitesses de dépôt dans le schorre, partie supérieure du marais, et donc, sur la croissance verticale du marais.

1.4.6 Processus littoraux non cycliques

Les variations de taille et de forme des plages résultent essentiellement des fluctuations des niveaux d'énergie des vagues. Ces changements sont généralement les plus manifestes sur les côtes à faible hydrodynamisme où une seule tempête peut entraîner des modifications plus marquées et un transport de sédiments plus important que lors de processus normaux sur une période de quelques mois (p. ex., Nummedal, 1979). Les tempêtes qui se produisent à l'extérieur de la bande de perturbation de la zone tempérée sont peu fréquentes et souvent catastrophiques. Sur de nombreuses côtes, les caractéristiques des systèmes de cordons et d'îles-barrières sont liées au transport de sédiments durant des tempêtes très violentes (Hayes, 1967). On note en particulier que la formation de chenaux et de cônes de déjection dans des deltas de tempête (figure 21) est associée aux effets combinés des niveaux d'eau élevés (ondes de tempête) et des hauteurs de vagues élevées.

Les perturbations peuvent jouer un rôle important dans les modes de sédimentation littorale. Un hydrodynamisme élevé, de courte durée, peut entraîner un déplacement rapide de sable le long du littoral et la formation de levées recourbées près des chenaux. Cela est particulièrement visible sur les côtes arctiques peu battues par les vagues, mais peut aussi se retrouver fréquemment à des latitudes moins élevées (Hine, 1979). L'effet net consiste en l'érosion et la dérive littorale du sable, suivies de la formation d'un nouveau cordon ou d'une crête. À plus long terme, ce processus explique la croissance de flèches ou de cordons en travers d'échancrures, ainsi que la migration littorale des chenaux dans les systèmes d'îles-barrières.

Les systèmes de plages de galets ou de cailloux donnent lieu à des modes de transport très différents, durant les tempêtes, de ceux qui se produisent sur les plages essentiellement sableuses. Les cycles «tempête-accalmie» se traduisent par un mouvement continu de va-et-vient sur les plages de sable, mais l'action des vagues de tempête sur les plages de galets ou de cailloux a plutôt pour effet de faire migrer tout le système vers les terres. Étant donné les larges espaces entre les particules (dans le cas des galets et des cailloux) par rapport aux plages de sable, le jet de rive des vagues arrivantes s'infiltre rapidement dans les sédiments. Il en résulte que le retrait est fréquemment négligeable. Les particules individuelles tendent donc à avancer vers les terres, notamment sur la partie supérieure de la plage, au-dessus du niveau de la nappe phréatique. La formation d'une crête de tempête est une caractéristique fréquente des plages de galets et de cailloux (figures 22 et 23). Même si l'action des ondes de tempête est parfois périodique, celle-ci entraîne une migration lente mais continue du système de plages vers l'intérieur des terres.

On observe fréquemment, tant sur les plages de sable que sur celles de galets et de cailloux, la présence de formations rythmiques, en croissants, dont la longueur varie de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. Il s'agit généralement de séries de croissants de plage de taille et d'espacement uniformes. De nombreux auteurs se sont penchés sur ce phénomène (p. ex., Bowen et Inman, 1969; Davis et Fox, 1971; Dolan, 1971; Evans, 1939; Homma et Sonu, 1962; Johnson, 1910; Sallenger, 1979; Sonu, 1973; et Williams, 1973); toutefois, personne ne parvient à en expliquer exactement l'origine ou les processus qui déterminent leur taille et leur forme. Parmi les formes rythmiques de base, on note les trois types suivants : les festons de plage, les

Figure 21 **Gros delta de tempête soudé à une île-barrière sableuse, île Hog, rive nord de l'Île-du-Prince-Édouard** (octobre 1979)

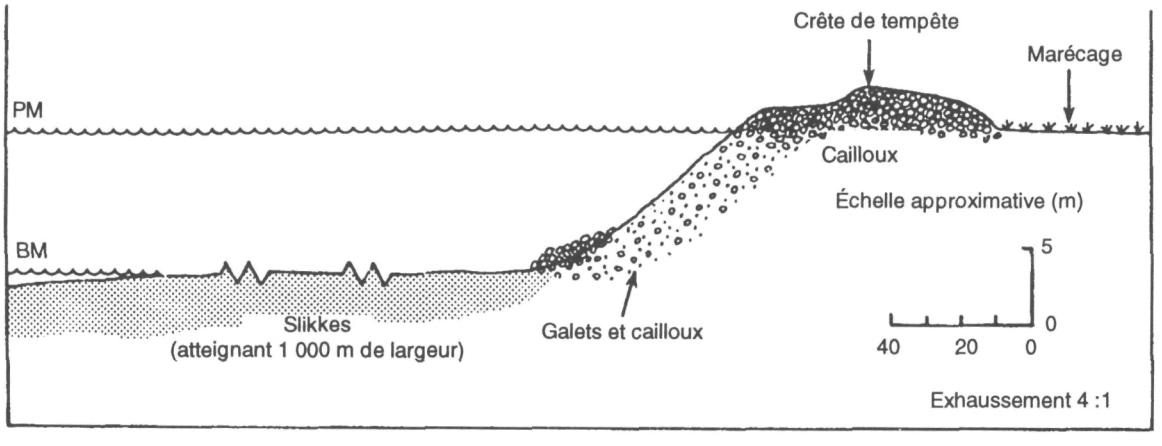
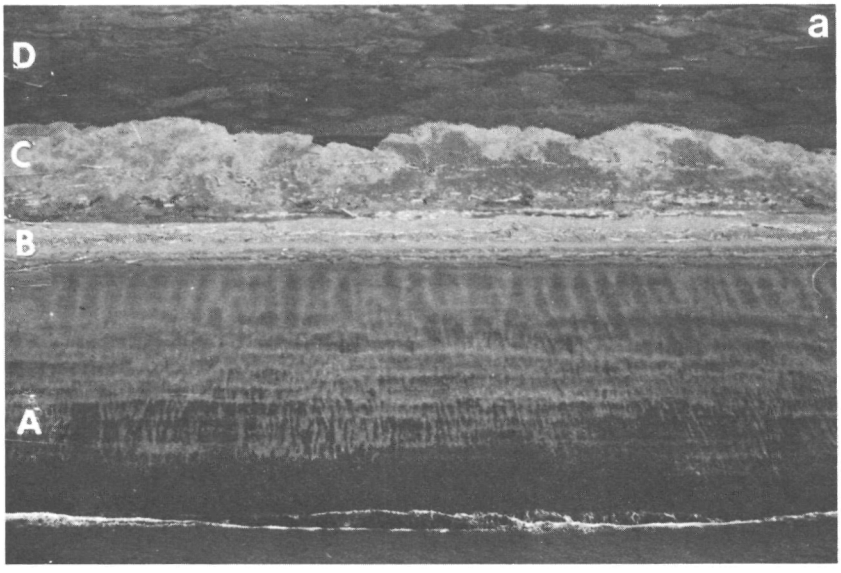


Figure 22 **Coupe d'une plage de galets et de cailloux, baie de Fundy** (Owens, 1977e)

formes associées aux courants d'arrachement de la zone précôtière et les formes liées aux barres en croissant de la zone précôtière (Komar, 1976). Dans certains cas, les formes rythmiques peuvent migrer le long de la rive (p. ex., Bruun, 1955) mais, dans tous les cas, les sédiments sont toujours en déplacement continu, les croissants ou festons se formant, se modifiant, ou disparaissant sous l'effet des vagues.

Le transport littoral des sédiments peut être limité par la présence de promontoires ou d'échancrures. Sur les côtes où ce transport est ininterrompu par la présence d'affleurements rocheux, comme c'est le cas de la côte des États-Unis, de New York à la Floride, le déplacement des matériaux n'est limité que par la présence d'estuaires ou de bras. Si le volume de sédiments à la côte est



A) Plage intertidale de sable et de galets
B) Berme et crête de tempête de galets et de cailloux
C) Delta de tempête
D) Marécages

Cette photo couvre une section de plage de 150 m; la zone intertidale, de la berme à la ligne des eaux, est d'environ 50 m de largeur. La photo a été prise à mi-marée, les slikkes de la zone intertidale inférieure sont sous le niveau de l'eau.

A) Berme et crête de tempête de galets et cailloux
B) Lèches de vague
C) Delta de tempête
D) Chenal de marée
E) Marécage

Figure 23 **Plages à Advocat Harbour, baie de Fundy,** *a*) vue vers les terres (juillet 1978) **et à Scots Bay, baie de Fundy,** *b*) vue le long du rivage (juillet 1978)

suffisant, même ces obstacles peuvent être franchis. Au contraire, sur les côtes découpées par de nombreux affleurements rocheux, le système de transport est fréquemment interrompu par la présence de promontoires et par les eaux profondes dans lesquelles ils plongent. Dans ces cas, typiques de tout le Canada, les systèmes de transport sont compartimentés et l'échange libre de sédiments d'une baie ou d'un compartiment à un autre est impossible. Dans chacun des compartiments, l'apport de nouveaux sédiments au domaine marin est donc lié aux sources locales, par exemple l'érosion des rivières ou des falaises. Sur les côtes où le transport n'est pas limité, il est possible en théorie qu'un grain de sable dérive sur des centaines de kilomètres.

1.4.7 La plage, un milieu dynamique

Sur toute côte où le jeu des vagues, des marées, des vents ou de la glace s'exerce sur les sédiments, on note une redistribution constante des matériaux et un changement perpétuel des caractéristiques des plages. Les tentatives visant à expliquer ces diverses modifications interreliées (p. ex., Davis et Fox, 1971; Wright et al., 1979; Short, 1979b) tiennent généralement compte des séquences d'érosion et de récupération (ou accrétion). Un exemple d'un de ces modèles élaborés pour les plages de sable (figure 24) considère le rapport existant entre l'augmentation et la diminution de l'hydrodynamisme et la formation des caractéristiques des plages et des barres migrantes. Ce type d'approche permet d'établir des rapports entre les étapes de formation d'une plage et les divers processus physiques.

Pour tenter de prédire le devenir des hydrocarbures échoués, il faut tenir compte des conditions dynamiques constantes des plages. Sur les plages abritées peu battues, les rythmes de changement sont généralement faibles. Au contraire, sur les côtes exposées, toutes les caractéristiques d'une plage peuvent changer en quelques jours, voire en quelques heures. La persistance des hydrocarbures échoués peut être estimée si l'on comprend bien les niveaux d'hydrodynamisme d'un endroit donné.

Voici des questions importantes auxquelles il faut répondre pour pouvoir prédire le devenir des hydrocarbures échoués :

- Les sédiments seront-ils érodés et les hydrocarbures dispersés?
- Les sédiments seront-ils déposés sur une plage et viendront-ils enfouir les hydrocarbures échoués?
- Si l'on enlève les sédiments contaminés, seraient-ils remplacés naturellement et, si oui, à quel rythme?

On peut obtenir des réponses à ces questions par l'étude des processus qui agissent sur les côtes et des types de matériaux présents sur le littoral.

1.5 Types de littoraux

La forme d'une côte résulte des matériaux présents et des processus qui agissent sur ces matériaux. Il existe une distinction principale entre les côtes comportant des sédiments littoraux et celles qui n'en ont pas. Dans le premier cas, la principale caractéristique distinctive des types de littoraux est la taille des matériaux et la présence de végétation (tableau 1*a*). Sur les côtes sans sédiments, c'est la nature du matériau qui détermine le type le littoral. Les côtes où les sédiments sont totalement absents sont rares et de nombreuses falaises

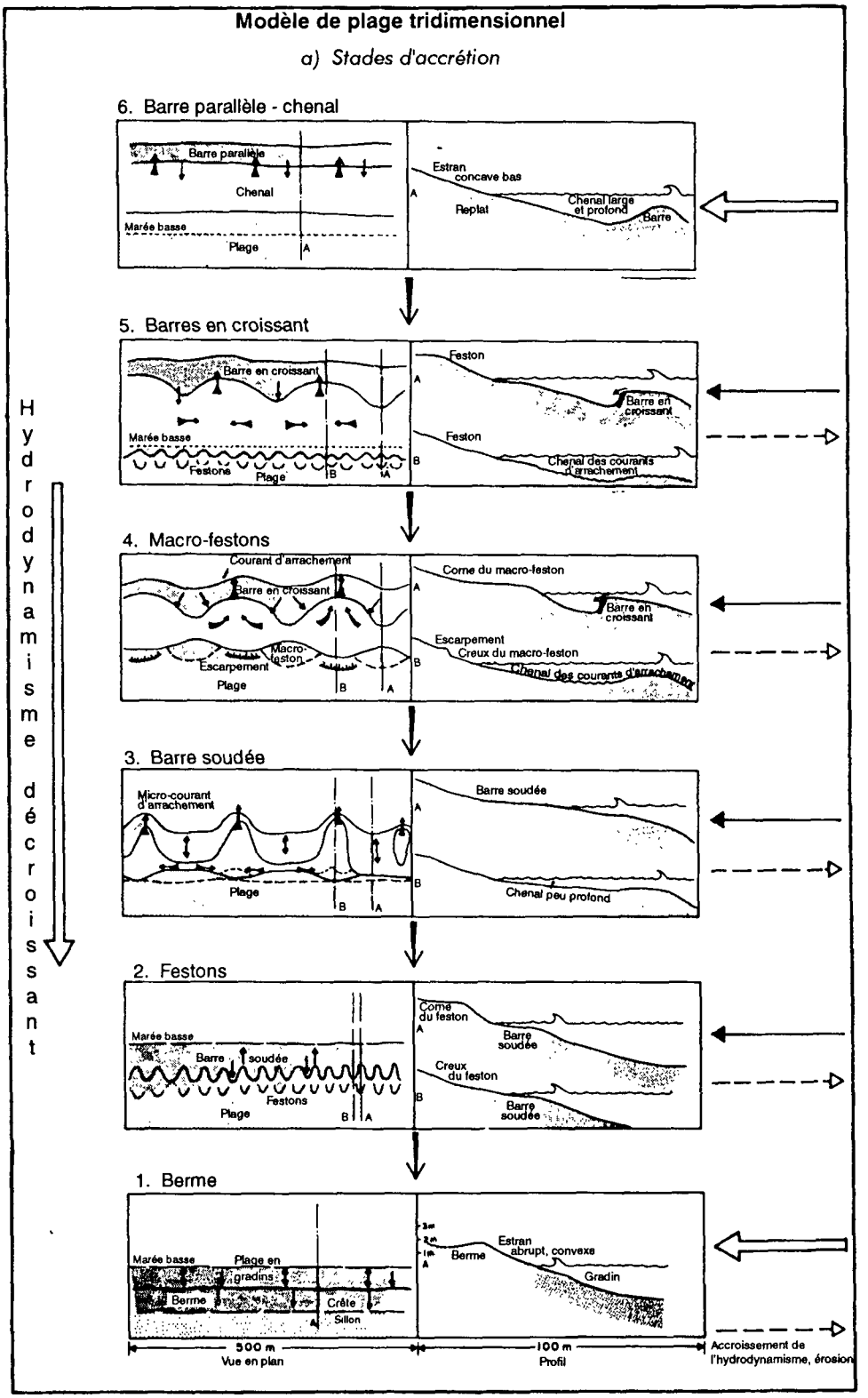


Figure 24 **Modèle tridimensionnel schématique des stades de formation d'une plage** *a*) stades d'accrétion, de 6 à 1, pour un hydrodynamisme décroissant (tiré de Short, 1979b)

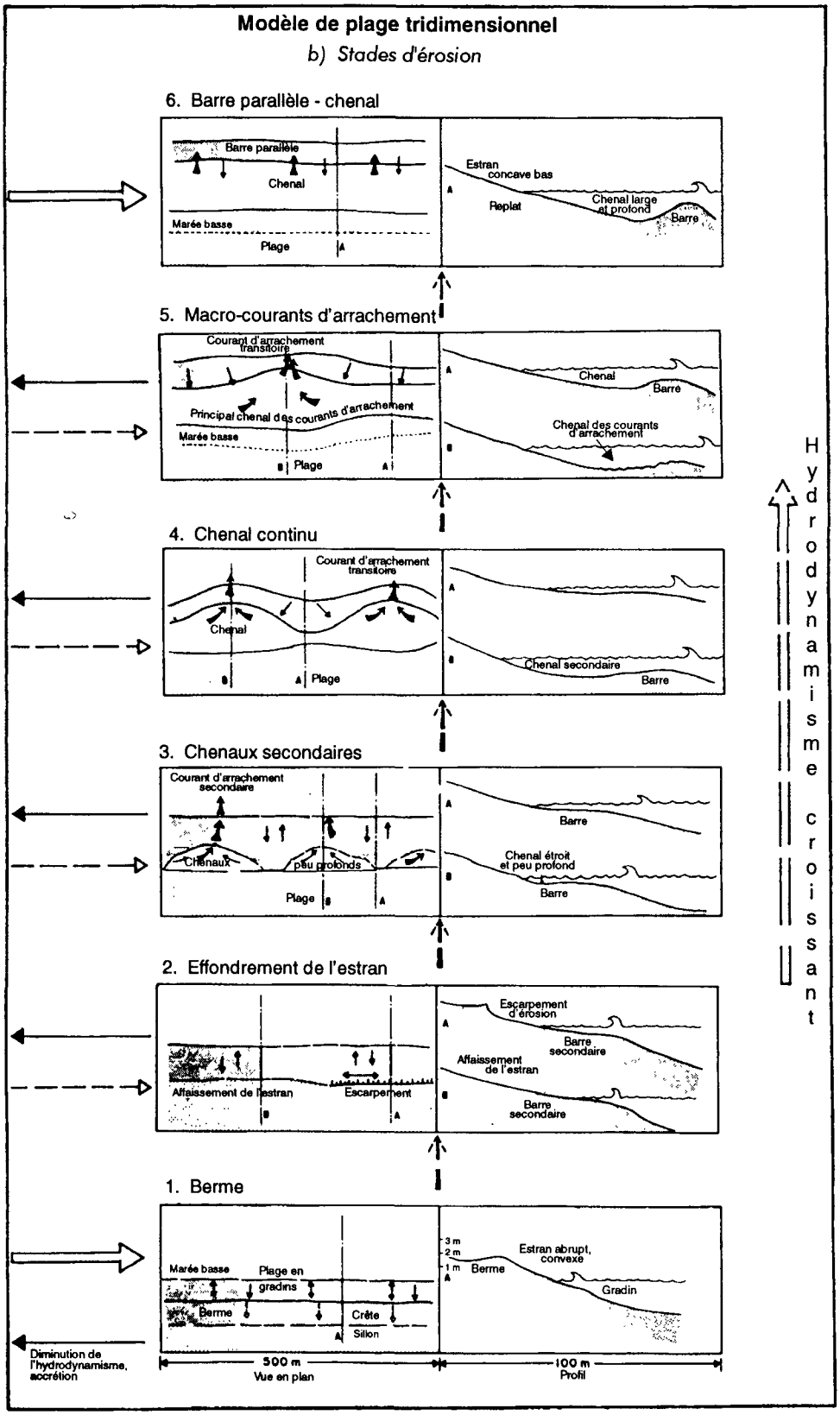


Figure 24 **Modèle tridimensionnel schématique des stades de formation d'une plage** (suite) *b*) stades d'érosion, de 1 à 6, pour un hydrodynamisme croissant (tiré de Short, 1979b)

ou plateformes rocheuses sont précédées de poches de sable ou de cailloux. Le caractère d'un littoral peut être décrit par la forme que produisent les processus marins et côtiers qui agissent sur les divers matériaux (tableau 1*b*).

Cette approche est simpliste, nombre de côtes constituant en fait une combinaison de plusieurs types de base. Par exemple, une courte section de côte, découpée, peut présenter des promontoires rocheux et une plage de fond de baie adossée à un système de marais et à une lagune à marée. Dans la plupart des cas, on peut décrire une section de côte en détaillant chacune des parties qui la composent. À titre d'exemple, un fjord peut être composé de falaises rocheuses et d'un delta à sa tête. À son tour, le delta peut être divisé en slikkes et en marais et peut comporter une plage à sédiments mixtes, côté mer du marais. Si l'on tient compte des composantes distinctes d'un littoral, on peut expliquer celui-ci en fonction des matériaux et de l'action des processus sur ces derniers, au lieu de considérer le système dans sa globalité. La dynamique du système dans son entier, qu'il s'agisse par exemple d'un delta ou d'un bras-barrière, est également importante pour la compréhension des processus locaux et régionaux. Comme lorsqu'il s'agit de décrire les processus, il importe de tenir compte des caractéristiques des côtes tant à l'échelle globale que locale, plus détaillée. Il est ainsi possible d'examiner les matériaux eux-mêmes (tableau 1) ou la configuration de la côte.

On n'a pu élaborer de système de classification permettant de tenir compte de toute la gamme des types de littoraux dans le monde. Peu d'études ont été tentées pour décrire les caractéristiques des côtes et la diversité des types de littoraux.

L'une des approches les plus utiles pour la classification des types de littoraux élaborées à ce jour est celle de Davies (1972) qui classe les côtes en quatre groupes principaux selon leur forme et les processus de formation :

Groupe 1. Falaises
Plateformes littorales (plateformes exposées à marée haute et marée basse)

Groupe 2. Plages, flèches littorales et îles-barrières
Plages lithifiées (plages de roches)
Dunes côtières

Groupe 3. Deltas
Estuaires
Lagunes
Wadden

Groupe 4. Marais salés
Marécages à mangroves
Récifs coralliens

Swift (1976) a adopté une approche différente pour distinguer les types de littoraux en fonction des rapports existants entre la configuration, les processus en jeu et les matériaux. Dans la classification de Swift, la division première se fait entre les côtes rocheuses (affleurements cristallins ou sédimentaires consolidés) et les plaines côtières (matériaux meubles). Les côtes meubles sont ensuite divisées en fonction de leur aspect, tel que celui-ci est modifié par les processus dominants (tableau 2).

Aux fins du présent rapport, nous utiliserons le système présenté au tableau 1 parce que ce sont la nature et la forme des matériaux, et non l'aspect de la côte, qui constituent le paramètre déterminant pour le devenir des hydrocarbures échoués. Comme l'objet de ce rapport porte sur les incidences et le devenir des hydrocarbures échoués sur les

littoraux, il importe d'examiner conjointement les types de littoraux et les hydrocarbures. Les traits physiques et les processus caractéristiques de chacun des principaux types de littoraux sont donc étudiés à la sous-section 2.3, afin de rassembler les éléments clés des processus, des matériaux et des hydrocarbures de telle sorte que l'on puisse définir les rapports existants entre eux et ainsi déterminer le devenir des hydrocarbures échoués.

Tableau 1 Types de littoraux

a) Littoraux constitués de matériaux solides et meubles

Matériaux solides		**Matériaux meubles**	
Roche en place		Inorganiques	
	Résistante		Silt/glaise
	Tendre		Boue
			Sable
Glace			Galets
	Front de glacier		Cailloux
	Pergélisol exposé		Blocs
Anthropogènes		Organiques	
	Béton		Mousse de mer
	Métal		Marais
	Bois		Tourbe
			Débris de coquillage*
			Végétation littorale
		Anthropogènes	
			Coffrages*
			Débris de bois
			Piles
			Moellons*
			Enrochements*

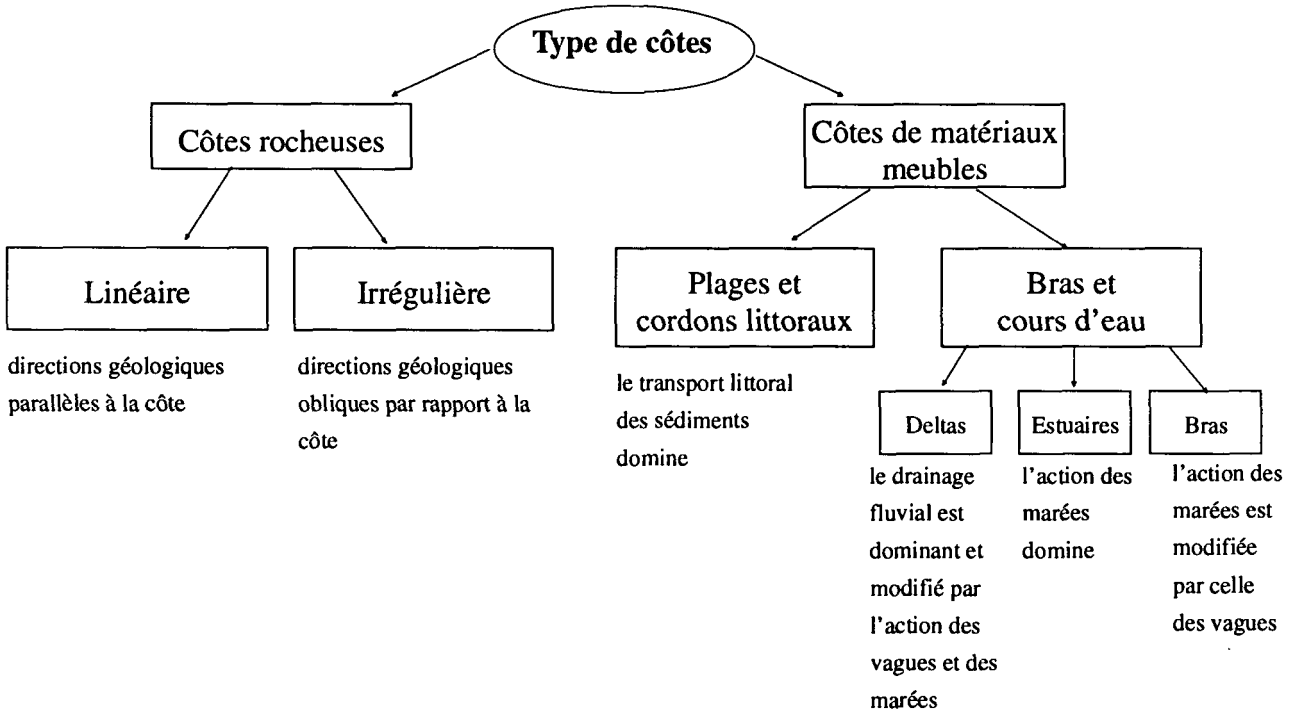
* Ces matériaux peuvent être de dimension égale à celle des matériaux inorganiques.

Tableau 1 Types de littoraux (suite)

b) Formes de littoraux solides et meubles

Formes solides	**Formes meubles**
Anthropomorphes	Anthropomorphes
Cloison	Dock/embarcadère
Duc d'Albe	Digue
Digue	Brise-lames
Brise-lames	Remblaie
Jetée	Marina
Marina	Midden
Ouvrage longitudinal	Ouvrage longitudinal
Revêtement	
Quai	Plage
	Contiguë
Falaise	Barrière
Verticale	Flèche littorale
Abrupte	
Inclinée	Delta
Biseautée	Digité
En terrasse	Alluvial/chenal unique
Éperon d'érosion	Alluvial/chenaux multiples
	Arqué
Plateforme	
Horizontale	Dune
En terrasse	Nue
Récif	Végétalisée
	Chenal
	Berge de ruisseau
	Levée alluviale
	Berge de rivière
	Chenal de marée
	Battures
	Delta
	Wadden
	Barrière de blocs
	Éboulis

Tableau 2 Classification des côtes (Swift, 1976)



Section 2

Hydrocarbures, déversements d'hydrocarbures et littoraux

En matière de planification d'interventions en cas de déversement d'hydrocarbures, il est rarement possible de ne tenir compte que d'un seul type d'hydrocarbure, particulièrement lorsque la source possible est encore indéfinie, comme c'est le cas dans la plupart des accidents de transport maritime ou d'éruptions en mer. Un pétrolier peut transporter plusieurs types de pétroles bruts ou de produits pétroliers ainsi qu'un certain type de combustible de soute. Une fois libérés dans l'environnement, les hydrocarbures subissent des modifications physiques et chimiques; les caractéristiques de l'hydrocarbure initial peuvent donc être très différentes une fois que cet hydrocarbure a atteint la côte ou qu'il s'est échoué sur le rivage. La présente section traite brièvement des processus qui causent ces changements. Le devenir des hydrocarbures est étudié dans le contexte du déplacement des hydrocarbures à la surface de la mer et de la persistance des hydrocarbures échoués sur le rivage. De nombreuses recherches ont été effectuées sur les hydrocarbures et les littoraux, et la National Academy of Sciences (1985) donne un bilan détaillé et complet de l'état actuel des connaissances dans ce domaine.

2.1 Propriétés physiques et chimiques des hydrocarbures

Le terme «hydrocarbure» peut s'appliquer à une vaste gamme de substances d'origine organique ou minérale. Les hydrocarbures existent sous forme liquide ou peuvent être liquéfiés par chauffage, mais ils ne sont pas hydrosolubles. Le pétrole est un hydrocarbure bitumineux qui est un mélange complexe d'hydrocarbures contenant de faibles quantités d'autres substances. Le pétrole naturel (pétrole brut), qui peut présenter un large éventail de propriétés physiques et chimiques (même s'il provient de puits différents forés dans le même champ pétrolifère), est utilisé par l'humain après avoir été fractionné en une variété de formes (produits raffinés). Le tableau 3 donne la gamme des propriétés physiques (densité et point d'écoulement) qui caractérisent certains bruts canadiens et autres, et le tableau 4 compare les propriétés physiques types de produits pétroliers. Cette vaste gamme de caractéristiques physiques et chimiques est possible parce que le pétrole est constitué d'une série de composés hydrocarbonés complexes qui incluent les gaz et les solides. Le procédé de raffinage du pétrole brut fait essentiellement appel à l'utilisation de l'énergie pour séparer les groupes de composés (figure 25, tableau 5) dans lesquels différentes fractions hydrocarbonées se trouvent en pourcentages différents. Par exemple, l'un des premiers produits de la distillation du pétrole brut à basse température est l'essence, tandis que les cires ou fractions goudronnées plus lourdes sont dérivées à des températures beaucoup plus élevées.

Il est essentiel de connaître les propriétés des hydrocarbures pour connaître leur comportement en cas de déversement. Un pétrole brut volatil très léger peut s'enflammer, être dangereux et s'évaporer rapidement, tandis qu'un pétrole lourd ou un produit à base d'asphaltène peut être semi-solide et très stable. Le comportement des hydrocarbures à la surface de la mer ou

Tableau 3 Caractéristiques de pétroles bruts canadiens et d'autres pétroles bruts choisis

Origine	Densité (g/mL à 15 °C)	Point d'écoulement (°C)
Terra Nova K08 - Plateau Scotian	0,870	27
Libye - Sarir	0,847	22,8
Égypte - El Morgan	0,874	12,7
Hibernia - Grand Banc	0,864 8	12,0
Norvège - Ekofisk	0,847	-3,9
Abu Dhabi - Umm Shaif	0,840	-15
Bent Horn A02 - Bassin Sverdrup	0,817 7	-16
Kopanoar - Mer de Beaufort	0,899 2	-37
Venezuela - Tia Juana médium	0,900	<-30

Tableau 4 Comparaison des caractéristiques physiques types de produits pétroliers raffinés et de pétroles bruts choisis (extrait de Fingas *et al.*, 1979)

	Densité (15 °C)	Densité API (15 °C)	Viscosité mm^2/s (38 °C)	Point d'écoulement (°C)	Point d'éclair (°C)	Point d'ébullition initial (°C)
Pétroles bruts	0,8 à 0,95	5 à 40	0,20 à 10	-35 à 10	Variable	30 à 500
Essences	0,65 à 0,75	60	0,04 à 0,10	S.O.	-40	30 à 200
Kérosène	0,8	50	0,015	S.O.	55	160 à 290
Carburéacteur	0,8	48	0,015	-40	55	160 à 290
Mazout n° 2 (chaudière, diesel, poêle)	0,85	30	0,15	-20	55	180 à 360
Mazout n° 4 (chauffage d'usine)	0,9	25	0,50	-10	60	180 à 360
Mazout n° 5 (mazout lourd)	0,95	12	1	-5	65	180 à 360
Mazout n° 6 (mazout lourd)	0,98	10	36 à 30	+2	80	180 à 500

S.O. : sans objet

sur le littoral constitue un facteur majeur dans le choix des méthodes de nettoyage. De plus, la vitesse de dispersion naturelle et les incidences de la présence d'hydrocarbures sur les habitats ou les espèces varient selon les caractéristiques des hydrocarbures.

Lorsque les hydrocarbures sont exposés aux processus marins et atmosphériques, leurs propriétés subissent des modifications sous l'action de l'énergie mécanique, thermique, biologique et chimique. À titre d'exemple, certaines fractions légères volatiles peuvent s'évaporer pour produire un composé plus

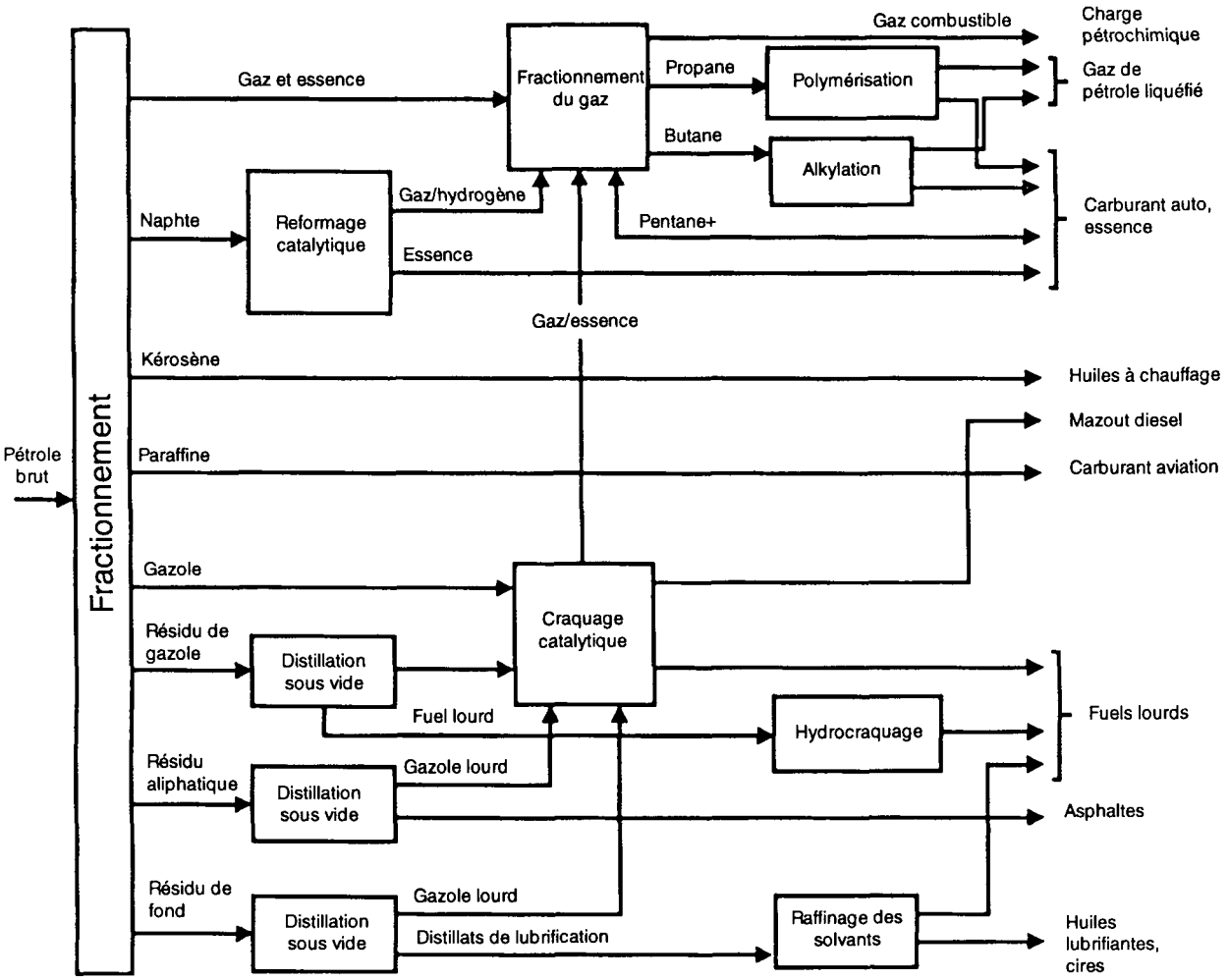


Figure 25 **Opérations types de raffinage** (extrait de Whitehead, 1976)

visqueux et plus stable. Il est donc essentiel, lors d'une intervention, de surveiller ces changements continus des propriétés des hydrocarbures déversés étant donné qu'il faudra sûrement modifier les stratégies et les techniques de nettoyage en conséquence. Les propriétés les plus importantes sur le plan de l'intervention en cas de déversement sont le point d'ébullition, le point d'éclair, le point d'écoulement, la densité, la tension superficielle et la viscosité.

Le **point d'ébullition** est la température à laquelle chaque fraction d'hydrocarbures s'évapore. Un grand nombre des fractions légères (à point d'ébullition bas) s'évaporent à des températures inférieures à 20 °C (68 °F) et leur phase peut passer de liquide à gazeuse lorsqu'elles sont exposées à des températures ambiantes au cours d'une journée légèrement chaude. Lorsque ces fractions légères s'évaporent, le volume des hydrocarbures restants est réduit et ces derniers deviennent plus denses et plus visqueux. Après le déversement de l'*Amoco Cadiz*, jusqu'à un tiers de tout le brut de Koweït déversé s'est perdu par évaporation (Hess, 1978).

Tableau 5 Classification et constituants du pétrole brut (extrait de Whitehead, 1976)

| | | |

peuvent couler sous la surface de l'eau jusqu'à une profondeur où la densité des hydrocarbures est égale à celle de l'eau de mer. La densité de la plupart des hydrocarbures est inférieure à 1,0, ce qui leur permet de flotter à la surface de l'eau. Les bruts et les fuels lourds ou les hydrocarbures légers qui ont été considérablement altérés peuvent cependant avoir une densité supérieure à celle des eaux de surface.

On calcule la densité en comparant le poids d'une substance avec celui de l'eau douce, qui est de 1,00. La mesure communément utilisée est la densité API (American Petroleum Institute) qui ajuste la densité à 60 °F (15,5 °C), de sorte que sur l'échelle API, l'eau douce a une valeur de 10,00. Les hydrocarbures légers de faible densité ont des valeurs élevées sur l'échelle API, alors que les hydrocarbures visqueux plus lourds ont une faible densité API (tableau 4).

La **tension superficielle** régit la vitesse d'étalement des minces nappes d'hydrocarbures. Les hydrocarbures à faible tension superficielle s'étalent plus facilement, d'où une plus grande superficie exposée à l'altération (évaporation). La tension superficielle dépend en partie de la température ambiante et diminue lorsque la température augmente, ce qui entraîne l'accroissement de la vitesse d'étalement.

La **viscosité** est une mesure de la résistance des hydrocarbures à l'écoulement ou de leur cohésion interne. Cette propriété régit la vitesse d'étalement d'une nappe d'hydrocarbures et le degré de pénétration de ces derniers dans les sédiments de la plage. Les hydrocarbures fluides et légers ont une faible viscosité, alors que les hydrocarbures à viscosité élevée sont semi-solides ou goudronneux. La viscosité dépend beaucoup de la température, de sorte que plus la température augmente, moins les hydrocarbures sont visqueux et plus ils peuvent pénétrer facilement dans les sédiments de la plage et s'étendre, exposant ainsi une plus grande superficie aux processus d'altération. La viscosité change avec l'altération, c'est pourquoi la perte des fractions légères peut rendre un hydrocarbure fluide léger très visqueux.

L'adhérence joue un rôle majeur lorsque les hydrocarbures atteignent le littoral. Foget *et al.* (1979) ont reconnu l'importance des caractéristiques d'adhérence en termes de facilité de nettoyage des hydrocarbures non visqueux des surfaces à l'aide d'un jet d'eau à basse pression. Lors de l'incident du *Braer* dans les îles Shetland (janvier 1993), le pétrolier a perdu toute sa cargaison de 26×10^6 gallons de brut léger lorsqu'il s'est éventré sur la côte rocheuse. Le mazoutage du littoral a été seulement de quelques dizaines de mètres malgré le volume de pétrole en question et la proximité du littoral. Le fort brassage du pétrole par les vagues très puissantes a formé une mousse brune, assimilée à une émulsion huile dans l'eau, qui a coloré la zone maritime adjacente en brun (Ritchie, 1993). Le pétrole emporté vers la côte par les vagues déferlantes ne s'est pas échoué sur les plages et n'a pas mazouté les affleurements rocheux (Hillebrand, 1993). D'après les constatations d'un observateur, les plages sablonneuses avaient préservé leur sable, sans aucune trace noire. Après avoir déferlé sur la plage, le pétrole refluait vers la mer avec la vague et ne collait pas à la plage (RCAC, 1993). L'absence d'adhérence pourrait être attribuée à l'encapsulation du pétrole dispersé dans l'eau. Une semaine après le naufrage, un levé au sol n'a signalé que quelques dizaines de mètres carrés de littoral mazouté (Ritchie, 1993).

D'autres propriétés importantes des hydrocarbures déversés sont la solubilité et la teneur en aromatiques. La solubilité détermine la vitesse à laquelle les hydrocarbures déversés se dissolvent dans l'eau de mer, et cette vitesse est presque invariablement faible. La teneur en aromatiques est une mesure de la teneur relative en paraffines (alcanes), naphtène et composés aromatiques dans les pétroles bruts. Dans le cas des produits raffinés, il faut également tenir compte d'un quatrième élément : les alcanes. La solubilité et la teneur en aromatiques sont très importantes lors de l'évaluation des incidences éventuelles d'un déversement. Les aromatiques sont plus toxiques que les autres éléments hydrocarbonés et leur grande solubilité peut amplifier ces effets toxiques.

Il faut tenir compte de chacune des propriétés physiques et chimiques des hydrocarbures lors d'un déversement. Il convient cependant de se rappeler que ces propriétés changent continuellement avec le temps, à mesure que les hydrocarbures s'altèrent. Une série de questions (adaptées d'après Foget *et al.*, 1979) lie les propriétés des hydrocarbures à leur comportement :

Point d'ébullition - les hydrocarbures vont-ils s'évaporer en partie ou en totalité?

Point d'éclair - y a-t-il danger d'explosion ou d'incendie?

Point d'écoulement - les hydrocarbures vont-ils se refroidir et devenir semi-solides?

Densité - les hydrocarbures vont-ils flotter ou couler?

Tension superficielle - les hydrocarbures ont-ils tendance à se répandre?

Viscosité - les hydrocarbures s'écoulent-ils?

Adhérence - les hydrocarbures colleront-ils aux matériaux du littoral?

Solubilité - les hydrocarbures vont-ils s'évaporer ou se dissoudre et seront-ils toxiques pour les organismes marins?

Teneur en aromatiques - les hydrocarbures seront-ils toxiques pour les organismes marins?

2.2 Le devenir des hydrocarbures déversés

Les hydrocarbures exposés à l'environnement sont soumis à des processus qui peuvent les altérer ou en modifier les propriétés physiques et la composition chimique. Les principaux processus qui entraînent ces changements (également appelés dégradation ou altération) sont la biodégradation, la dissolution, l'émulsification, l'évaporation et la photo-oxydation. Les facteurs qui régissent les processus de dégradation ou d'altération sont les propriétés des hydrocarbures et les conditions ambiantes. Dans le cas de déversements en mer, dès que le processus d'altération est amorcé et se poursuit, les propriétés des hydrocarbures changent alors même que les hydrocarbures sont soumis à la dérive, à l'étalement ou au coulage.

Les hydrocarbures qui atteignent la côte sont soumis à un ensemble différent de processus d'altération, principalement la dissolution et l'évaporation, et la persistance des hydrocarbures échoués dépend surtout de l'exposition des hydrocarbures à l'action des vagues et au niveau d'hydrodynamisme sur le littoral (Owens, 1978). En l'absence de vagues, l'altération dépend surtout de la biodégradation, de l'oxydation et de la floculation argile-hydrocarbures.

Le principal facteur régissant la vitesse de la dispersion naturelle est la **quantité d'énergie disponible** pour les processus d'altération. Cette énergie peut être thermique ou mécanique ou provenir de processus biochimiques. L'énergie thermique se rapporte aux températures de l'air et de l'eau : la vitesse de la plupart des processus de dégradation augmente proportionnellement avec ces températures. L'énergie mécanique dépend des vagues, des courants et des vents qui causent la dispersion et la dégradation physique des hydrocarbures. La figure 26 illustre les rapports qui existent entre l'altération et la persistance des hydrocarbures échoués, les apports d'énergie et les propriétés des hydrocarbures.

Biodégradation. Les microorganismes, en particulier les bactéries, utilisent les hydrocarbures pétroliers comme source alimentaire (Hughes et Stafford, 1976). Ce processus biochimique est principalement lié à l'oxydation et dégrade les composés hydrocarbonés pour produire du dioxyde de carbone, de l'eau, de la biomasse et des sous-produits biologiquement inertes, partiellement oxydés (Bragg *et al.*, 1993). Cette biodégradation se fait en général lentement et dépend en grande partie des températures ambiantes de l'air ou de l'eau et de la superficie des hydrocarbures exposés. Vandermeulen (1977) a mentionné que le nettoyage naturel prévu, par l'intermédiaire de ce processus, de mazout lourd altéré, échoué sur le rivage, au-dessus de la limite de l'action des vagues prend des décennies. Une étude récente (Owens *et al.*, 1993b) indique cependant que cette durée peut être considérablement diminuée en présence de processus physiques associés à la floculation argile-hydrocarbures.

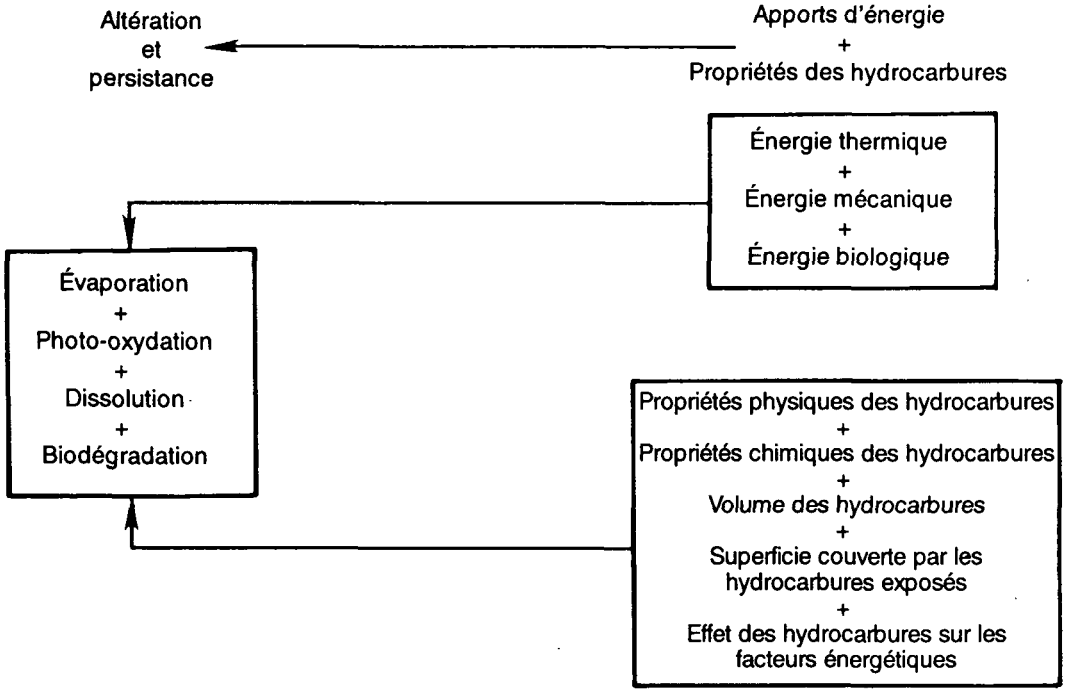


Figure 26 **Facteurs de dégradation** (altération et persistance) **des hydrocarbures déversés**

Dissolution. La plupart des hydrocarbures sont faiblement solubles, mais les fractions aromatiques légères peuvent se dissoudre rapidement au contact de l'eau. Ce processus dépend principalement de la température et de la turbulence de l'eau. La dissolution se produit généralement à la face inférieure d'une nappe de pétrole étant donné que les fractions légères ont tendance à s'évaporer plutôt qu'à se dissoudre. Ce processus d'altération n'est pas jugé d'une grande importance dans la dispersion naturelle des hydrocarbures déversés.

Émulsification. La formation d'émulsions eau dans l'huile (souvent désignées par le terme de «mousse») dépend du type d'hydrocarbure et de l'état de la mer. Ce processus entraîne une augmentation du volume et de la viscosité des hydrocarbures, et la teneur en eau des hydrocarbures peut être élevée (*cf.* tableau 6). Le principal intérêt de l'émulsification réside dans l'exposition d'une plus grande superficie d'hydrocarbures aux processus d'altération.

2.2.1 Hydrocarbures en mer

Une illustration graphique des processus naturels qui suivent un déversement d'hydrocarbures à la surface de l'eau est présentée à la figure 27. L'importance relative de ces processus varie cependant selon les conditions météorologiques, l'état de la mer, la température et les propriétés des hydrocarbures déversés. Au cours des premiers jours, l'évaporation des fractions légères et la dispersion (émulsification) se font généralement rapidement. À mesure que la nappe s'étale à la surface de l'eau, une plus grande superficie est exposée aux processus d'altération, accélérant ainsi la dégradation (figure 28).

On a évalué qu'au moins un tiers des hydrocarbures déversés lors de l'incident de l'*Amoco Cadiz* se sont évaporés (Hess, 1978). Des études expérimentales menées avec du brut de l'*Ekofisk* (tableau 3) montrent qu'une perte d'au moins 20 % en poids attribuable à l'évaporation ou à la dissolution s'est produite au cours des sept premières heures d'exposition à des vents moyens [6 à 9 m/s (12 à 18 noeuds)], à des températures moyennes [12 °C (54 °F)]. Les résultats d'études en milieu arctique prouvent les effets importants *a)* de la température et de la vitesse du vent et *b)* du type d'hydrocarbure sur les pertes par évaporation (figure 29).

Tableau 6 Vitesses estimatives de l'élimination naturelle des hydrocarbures à la surface de la mer (adapté d'après ITOPF, 1987)

Type d'hydrocarbure	Densité	Augmentation du volume* (%)	Hydrocarbures restants après une semaine (%)
Essence	<0,8	0	0
Gazole	0,8 à 0,85	200	0
Fuel moyen	0,85 à 0,95	300	10
Fuel lourd	>0,95	150	30

* Attribuable à la formation d'émulsions eau dans hydrocarbure

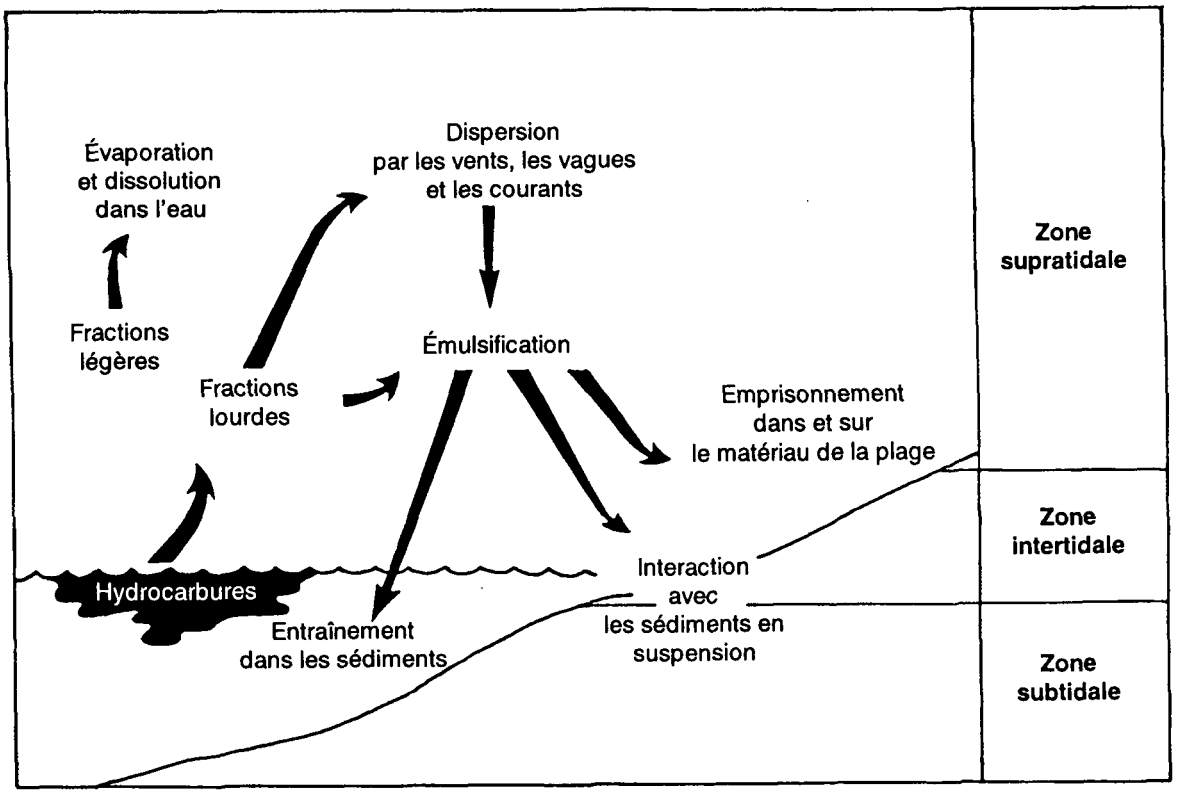


Figure 27 **L'altération et la dynamique des hydrocarbures déversés à la surface de la mer** (adapté d'après Wheeler, 1978)

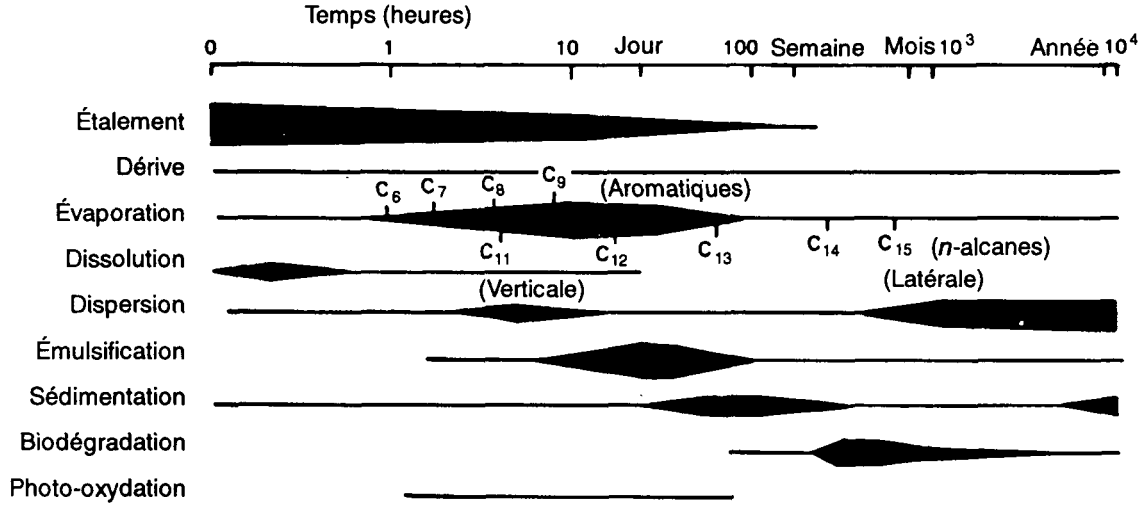


Figure 28 **Processus d'altération en fonction du temps écoulé depuis un déversement** (l'épaisseur du trait représente l'importance relative en fonction d'autres processus actifs) (extrait de Wheeler, 1978)

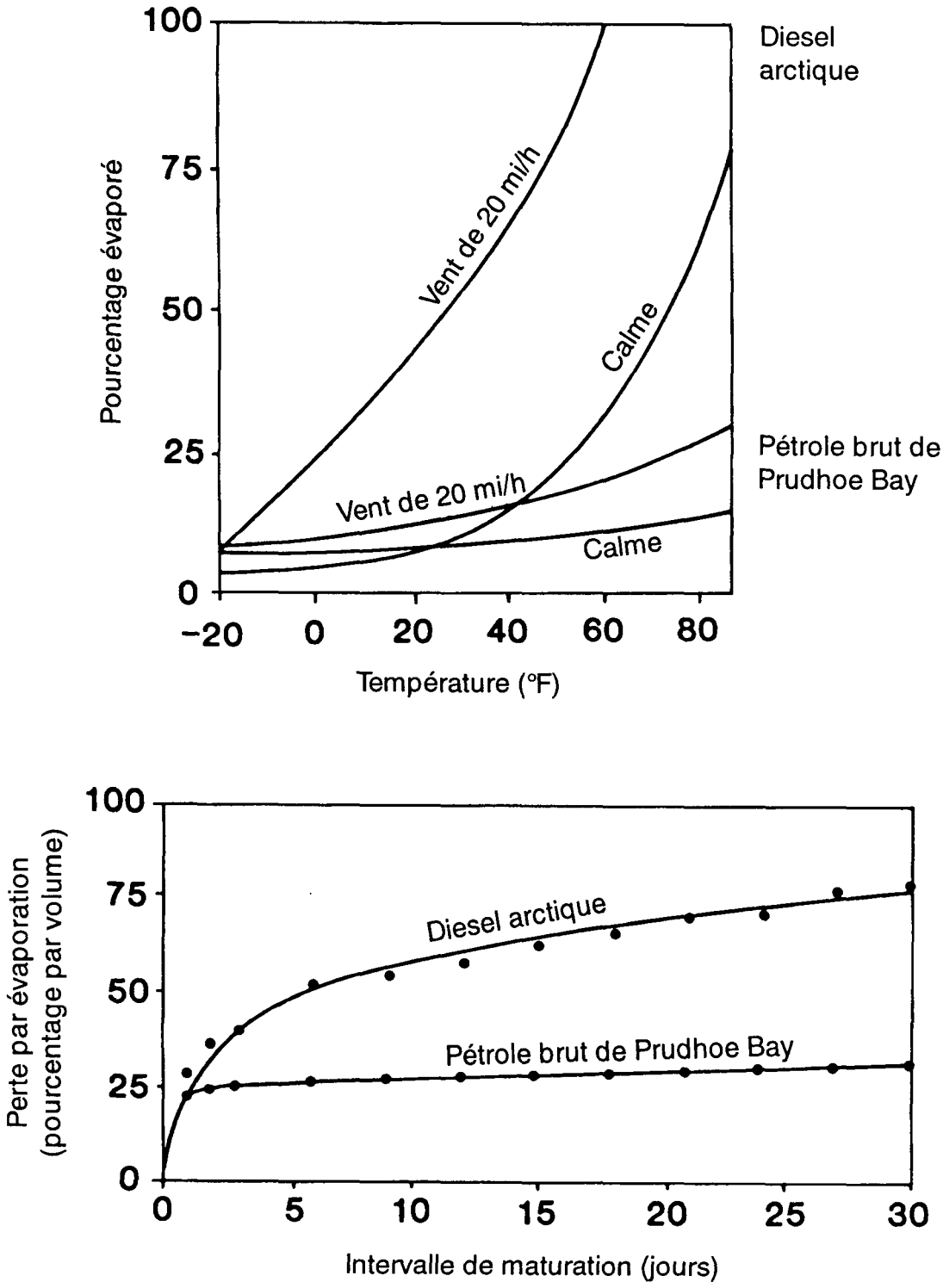


Figure 29 **Vitesses d'évaporation du diesel arctique et du pétrole brut de Prudhoe Bay** (extrait d'ABSORB, 1981). Le graphique du bas donne l'évaporation en fonction du temps à 0 °C et à 18 km/h.

Il faut tenir compte de l'élément temps (vitesses de dérive et d'étalement) et de la vitesse de dispersion naturelle lorsqu'on veut prévoir si une nappe risque d'atteindre une section du littoral. La vitesse de dispersion naturelle dépend du type d'hydrocarbure et des conditions du vent et des vagues. L'éruption de l'*Ekofisk*, dans une mer semi-fermée, témoigne des processus naturels qui ont dispersé les hydrocarbures avant que la nappe atteigne la côte de la Norvège, soit une distance de 300 km. Les hydrocarbures légers, comme l'essence ou le kérosène, ne forment généralement pas d'émulsion et s'évaporent de façon naturelle à la surface de la mer dans les trois à quatre jours suivant un incident (ITOPF, 1987). Les fuels moyens, ou bruts d'une densité de 0,85 à 0,95, pourraient tripler de volume suite à l'émulsification, mais, généralement, environ 10 % seulement du volume déversé persiste après une semaine (tableau 6). Comme on l'a mentionné, la température et l'hydrodynamisme peuvent avoir un effet considérable sur le degré de persistance, c'est pourquoi le tableau 6 ne donne qu'une indication relative de la persistance.

Dans les cas où les hydrocarbures atteignent la côte, leurs propriétés, au moment de l'échouement, dépendent en grande partie du laps de temps écoulé depuis le début de la dérive de la nappe de pétrole à partir du lieu du déversement. Les hydrocarbures déversés par l'*Amoco Cadiz* n'ont dérivé que quelques kilomètres avant d'atteindre les côtes adjacentes, mais le processus d'émulsification et les pertes attribuables à l'évaporation et à la dissolution (jusqu'à 45 % en volume; Hess, 1978) ont produit un pétrole lourd et visqueux sur le littoral.

2.2.2 *Le déplacement des hydrocarbures en mer*

Le déplacement des nappes d'hydrocarbures à la surface de l'eau est régi principalement par les courants de surface et les vents locaux. Il arrive souvent que ces deux facteurs se combinent pour déplacer les hydrocarbures à la surface de l'eau et, en règle générale, on prend 3 % de la vitesse du vent et de la vitesse réelle du courant pour calculer le vecteur d'une nappe (Foget *et al.*, 1979). On peut établir un modèle général de comportement et d'évolution d'une nappe en fonction des processus physiques d'océanographie et de météorologie qui s'exercent en milieux extracôtiers et côtiers (figure 30). Avec le temps, la nappe d'hydrocarbures est soumise à l'action de divers processus qui ont lieu à différentes échelles. Les conditions locales des courants de marée et des vents influent sur l'évolution et le déplacement d'une nappe à une échelle différente de celle des courants côtiers limitrophes, de la circulation océanique ou des régimes planétaires des vents. Les changements dans la direction du vent ou le déplacement des hydrocarbures d'un système de courant à un autre entraînent un changement dans la direction générale du déplacement de la nappe d'hydrocarbures.

Lorsque les régimes météorologiques couvrent une superficie inférieure à celle de la nappe d'hydrocarbures, ils ont tendance à avoir un effet de dispersion. Si la nappe couvre une superficie inférieure à celle du régime météorologique, il peut y avoir advection et la nappe aura tendance à être confinée (Murray, 1982). En principe, le potentiel de dispersion augmente proportionnellement à la superficie couverte par la nappe d'hydrocarbures.

Dans un milieu d'avant-plage, les mouvements de l'eau associés aux vents, aux vagues, aux marées et aux rivières jouent un rôle crucial dans le déplacement réel des hydrocarbures à la surface de l'eau (Murray et Owens, 1988). Dans le cas de l'*Amoco Cadiz*, les hydrocarbures ont été déversés

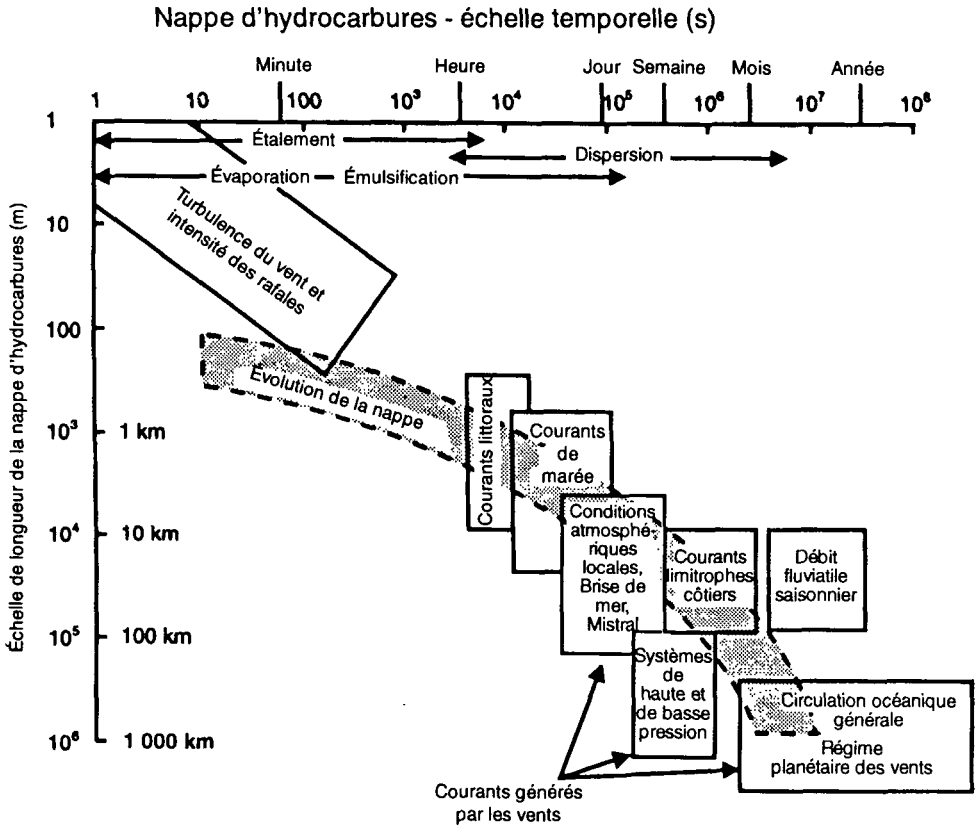


Figure 30 **Évolution** (temps et longueur) **de la nappe d'hydrocarbures en fonction des processus physiques** (extrait de Murray, 1982)

dans la couche côtière limitrophe et le front océanique associé à cette couche a servi de barrage naturel, confinant les hydrocarbures dans une zone précôtière (Murray, 1982). En cas de déversement majeur près de la côte, comme pour l'*Arrow* et l'*Amoco Cadiz*, on peut s'attendre à ce que les hydrocarbures couvrent toute la surface de l'eau et, généralement, il n'y a pas grand chose que l'on puisse faire pour confiner ou dériver les hydrocarbures de surface afin de protéger les milieux ou les habitats côtiers. Dans ce genre de déversement, si la brise de mer constitue un processus environnemental local important, les hydrocarbures déversés dans la zone côtière, jusqu'à 50 km du rivage, seront vraisemblablement confinés et rejetés sur le rivage par les effets de confinement de la brise de mer. Les vents de la mer sont généralement plus puissants et ont une durée plus longue que les vents de terre. Tel serait le cas sur la rive orientale du détroit de Georgia, sur la côte du Pacifique, où les brises de mer peuvent atteindre des vitesses de 7 m/s (*cf.* division 4.3.3).

Si la nappe d'hydrocarbures se trouve à une distance suffisante du littoral, ou si le volume d'hydrocarbures à la surface des eaux est suffisamment faible pour être contrôlé par des barrages ou autres techniques d'endiguement, les mesures d'intervention devraient tenir compte des processus physiques locaux qui influent sur le déplacement des hydrocarbures à la surface de l'eau en milieu précôtier (Owens *et al.*, 1985). Étant donné les difficultés de prévoir les processus atmosphériques, les conditions des vagues et des vents ne peuvent être déterminées avec précision qu'au moment de l'incident. Les processus associés aux marées sont généralement prévisibles, à condition qu'il y ait une base de données suffisamment détaillées sur le

régime des marées; les modèles d'écoulement des rivières sont généralement saisonniers. Malgré la difficulté à prévoir certains des paramètres les plus importants qui régissent l'évolution et le déplacement d'une nappe d'hydrocarbures, il faut tenir compte de ces processus lors du déploiement de l'équipement durant les opérations de nettoyage.

2.2.3 La marée noire

L'étendue du mazoutage du littoral. Deux incidents majeurs récents, le déversement de l'*Exxon Valdez* et ceux de la Guerre du Golfe, indiquent clairement qu'il n'y a aucun rapport direct entre la quantité d'hydrocarbures déversés et la superficie touchée par ces hydrocarbures. Environ $1{,}37 \times 10^6$ barils (b^l)* de pétrole ont été déversés suite à la destruction intentionnelle des installations pétrolières au Koweït. Les mesures de lutte océanographique ont empêché la dispersion et la dérive de cette énorme quantité d'hydrocarbures de sorte que seulement 644 km de côte ont été mazoutés. Dans le cas de ces déversements, la charge de mazoutage était en moyenne de 2 000 b^l/km. Le processus naturel de confinement océanographique a fait que les incidences étaient considérables, mais localisées, en termes d'effets par rapport à toute la région du golfe. Ce processus de confinement n'est pas rare et fait l'objet de la division 2.2.2, dans le contexte du déversement de l'*Amoco Cadiz* sur la côte de la Bretagne.

Comparativement à ces situations de charge élevée mais très localisée, les hydrocarbures déversés lors de l'incident de l'*Exxon Valdez* mettaient en cause entre 72 000 et 84 000 b^l/km de pétrole (Wolfe *et al.*, 1993) répandus sur 783 km de littoral dans le détroit du Prince-William, une moyenne arithmétique d'environ 92 à 107 b^l/km. Lors de cet incident, les courants ont dispersé rapidement les hydrocarbures sur une vaste étendue à l'intérieur du détroit, de sorte que le mazoutage était étendu mais léger; seuls 140 km de littoral ont été «lourdement» mazoutés, avec une bande d'hydrocarbures d'une largeur supérieure à 6 m sur le rivage (Owens, 1991b).

L'absence de rapport direct entre le volume des hydrocarbures déversés et la superficie touchée est claire à partir d'une simple comparaison des déversements (tableau 7). Ce tableau indique également que la longueur à elle seule constitue un mauvais indicateur, souvent imprécis ou trompeur, de l'importance ou du degré de mazoutage (Sergy *et al.*, 1991).

La vaste dispersion des hydrocarbures, comme ce fut le cas dans le golfe de l'Alaska et le long de la côte de l'île de Vancouver à la suite du déversement du *Nestucca* (Owens, 1990), a causé des difficultés considérables en termes d'étude documentaire et de soutien des opérations. Les hydrocarbures étaient très éparpillés et échoués en quantités relativement faibles. Dans bien des cas, les hydrocarbures qui avaient atteint le rivage étaient altérés et souvent asphaltiques

Le nettoyage naturel des littoraux mazoutés. La vitesse de dispersion des hydrocarbures échoués dépend en premier lieu de l'élimination par l'action des vagues. Au cours de la période suivant immédiatement un déversement, les apports de l'énergie thermique ou biochimique sont jugés moins importants que la contribution des apports de l'énergie mécanique (Owens,

---

* 1 baril = 42 gallons américains = 159 litres

Tableau 7 **Données généralisées sur le volume d'hydrocarbures déversés et les longueurs de littoral touché** (adapté de diverses sources) (Owens et Taylor, 1993)

Déversement	Année	Volume déversé approximatif (10^3 gal)	Zone touchée* (km)	Littoral mazouté (km)
Koweït	1991	160 à 340 000	750	644
Amoco Cadiz	1978	80 000	600	400
Braer	1993	26 000	<50	<1
Exxon Valdez	1989	10 800		
Détroit du Prince-William			1 500	782
Golfe d'Alaska			9 500	818
Nestucca	1989	230	>4 000	environ 250

* Cette longueur correspond à la zone qui a été touchée et comprend les sections mazoutées et non mazoutées dans cette région.

1978, 1985). En général, les vitesses de dispersion et de dégradation naturelles augmentent en proportion directe avec l'énergie mécanique (vagues) (figure 31). La sous-section 1.2 traite des facteurs qui régissent les niveaux d'énergie mécanique sur le littoral et le tableau 8 résume les processus littoraux qui jouent un rôle déterminant dans la réduction ou l'augmentation de la vitesse de dégradation physique des hydrocarbures.

Deux effets modificateurs importants de ce rapport général entre les processus de dégradation physique et la persistance sont : *a*) la profondeur de pénétration des hydrocarbures dans les sédiments du littoral ou l'enfouissement des hydrocarbures et *b*) les températures de l'air et de l'eau. Dans le premier cas, les hydrocarbures qui sont enfouis dans les sédiments ou qui ont pénétré dans une plage sont protégés contre l'action des vagues à moins que la plage soit érodée (*cf.*, p. ex., Hayes *et al.*, 1991). Le second facteur, qui a trait aux températures, comprend la viscosité et le point d'écoulement des hydrocarbures. Le pétrole peut commencer à s'écouler librement et à pénétrer dans les sédiments à mesure que les températures s'élèvent. Ce processus peut cependant être compensé par le fait que des températures plus élevées peuvent augmenter la dégradation physique et biochimique.

À partir d'expériences sur des parcelles intertidales mazoutées, Little et Scales (1987) ont obtenu des données qui indiquent un temps de persistance, en termes de couverture des hydrocarbures, de l'ordre d'une semaine sur les plages de sable exposées, de deux semaines sur les plages de sable moyennement exposées et d'un à quatre mois sur les plages abritées de gravier sablonneux ou de vase sablonneuse.

Un modèle mis au point par Fusey et Oudet (1984) fait la distinction entre l'élimination

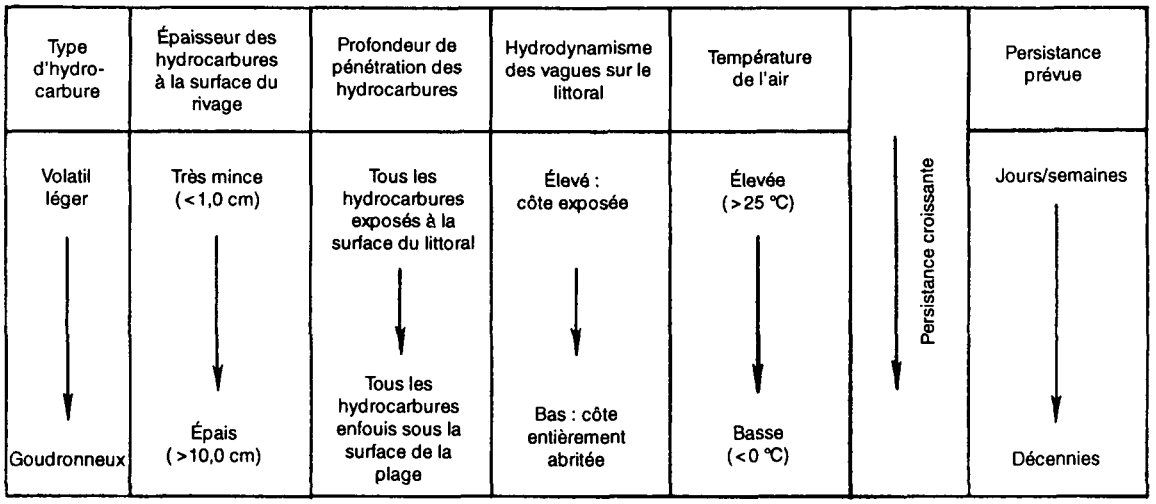


Figure 31 Résumé des principaux facteurs de persistance des hydrocarbures échoués

physique et quatre stades de biodégradation. Ces auteurs soulignent que la vitesse de biodégradation dépend de la concentration des hydrocarbures (*cf.* également Atlas *et al.*, 1981), un facteur qui, selon des résultats d'études ultérieures, était également important en milieu arctique (Owens *et al.*, 1986, 1987d).

Les premières observations de l'incident de l'*Arrow* en 1970 ont permis d'acquérir une connaissance de base du comportement des hydrocarbures sur les plages de sédiments grossiers sujettes à l'action des vagues (Drapeau, 1973; Owens, 1973). Cette base a été complétée par des données recueillies à partir d'autres déversements et lors de l'expérience du déversement de pétrole à l'île de Baffin (BIOS) (Gundlach, 1987; Gundlach *et al.*, 1978; Humphrey *et al.*, 1990, 1991, 1992; Owens, 1978, 1985; Owens *et al.*, 1986). Les observations sur les caractéristiques des hydrocarbures échoués et la vitesse de leur élimination ont été améliorées à partir d'études détaillées menées après l'incident de l'*Exxon Valdez* (Hayes *et al.*, 1991; Owens, 1991a,b).

Combinées aux travaux antérieurs, ces études ont fourni de plus amples informations sur la charge en hydrocarbures et la vitesse d'élimination, mais non sur les processus en cause. Aucun progrès notable n'a été réalisé dans la compréhension des processus naturels de nettoyage ou d'altération des hydrocarbures sur les plages de sédiments grossiers jusqu'au moment où des études en laboratoire sur les sédiments grossiers mazoutés des plages touchées par l'incident de l'*Exxon Valdez* ont mis en évidence le rapport entre les particules d'argile (ou minérales) et les hydrocarbures (Bragg et Yang, 1993). Ces travaux ont permis de mieux comprendre le rapport interactif entre le processus de floculation argile-hydrocarbures et la biodégradation (Bragg et Yang, 1992) et d'améliorer les interprétations des rapports entre le traitement du littoral et le nettoyage naturel lors du déversement de l'*Exxon Valdez* (Jahns *et al.*, 1991; Neff *et al.*, 1993).

Suite au déversement de l'*Exxon Valdez*, le nettoyage naturel des littoraux mazoutés exposés à un fort hydrodynamisme s'est

Tableau 8 Facteurs physiques modifiant la dégradation des hydrocarbures

Facteurs qui **RÉDUISENT** les incidences et **AUGMENTENT** la vitesse de dégradation physique et de l'altération des hydrocarbures :	Facteurs qui **AUGMENTENT** les incidences et **RÉDUISENT** la vitesse de dégradation physique et de l'altération des hydrocarbures :
VAGUES	
· hydrodynamisme croissant des vagues · brassage ou dégradation des hydrocarbures dans les zones de déferlement, de brisants et de jet de rive · utilisation des sédiments comme abrasif · redistribution ou érosion des hydrocarbures sur le rivage · les vagues réfléchies brassent ou dégradent les hydrocarbures et peuvent empêcher les hydrocarbures d'atteindre le littoral	· hydrodynamisme décroissant des vagues · enfouissement des hydrocarbures sous une accumulation des matériaux de la plage ou suite à la migration des sédiments le long du rivage · réduction des températures des hydrocarbures · projection des hydrocarbures au-dessus du niveau normal de l'activité des vagues par l'éclaboussement des vagues déferlantes
VENTS	
· augmentation de la vitesse d'évaporation · dispersion et augmentation des nappes de surface	· redistribution des sédiments et enfouissement des hydrocarbures dans l'arrière-plage · production d'ondes de tempête et dépôt des hydrocarbures dans les lagunes (par débordement) ou sur l'arrière-plage · les vents de la mer emprisonnent les hydrocarbures sur la côte en période de houle et les déposent au-dessus du niveau normal de l'activité des vagues lorsque le niveau de l'eau baisse
GLACE	
· la banquette côtière empêche le dépôt des hydrocarbures sur le littoral · les poussées de glace dégradent les hydrocarbures échoués · la banquette côtière empêche les hydrocarbures d'atteindre le littoral	· la production de vagues est impossible et l'hydrodynamisme des vagues est diminué · la banquette côtière peut emprisonner les hydrocarbures · les poussées de glace peuvent enfouir les hydrocarbures · les poussées de glace poussent les hydrocarbures au-dessus de la zone maximale de l'activité des vagues
MARÉES	
· les niveaux de basse mer causent le dépôt des hydrocarbures dans des segments qui seront plus tard soumis à l'action des vagues ou des courants	· les niveaux de haute mer causent le dépôt des hydrocarbures au-dessus de la limite normale de l'action des vagues ou des courants · les hydrocarbures peuvent être transportés à la surface des marais
COURANTS	
· augmentation de la dispersion des hydrocarbures dans l'eau · transport des hydrocarbures au large	· concentration des hydrocarbures dans les remous et autres zones de courant faible · transport des hydrocarbures dans des zones antérieurement non touchées

produit tel que prévu au cours de l'hiver de 1989-1990 (Owens, 1991a,b). Les études de surveillance de janvier 1990 ont indiqué que de nombreuses zones de littoral mazouté, dans des endroits très abrités, avaient été nettoyées de manière tout à fait inattendue depuis l'arrêt des opérations de nettoyage en septembre 1989. Des études en laboratoire (Bragg et Yang, 1993) ont montré que le processus physique de floculation argile-hydrocarbures peut entraîner la dégradation de la couche superficielle des hydrocarbures échoués en l'absence de l'action des vagues. Ce processus physique, qui libère les particules de floc de densité équivalente ou supérieure à celle de l'eau, réduit l'adhésion des hydrocarbures aux sédiments, en expose une plus grande superficie à la biodégradation et explique l'élimination des hydrocarbures résiduels dans un si grand nombre de littoraux mazoutés en des endroits abrités du détroit du Prince-William.

L'application de la floculation argile-hydrocarbures permet de comprendre comment les hydrocarbures ont été éliminés des endroits très mazoutés mais à l'abri des vagues de la baie de Chedabucto, où des minéraux de la taille d'un micron favorisent ce processus. L'étude de 1992 de l'*Arrow* (Owens *et al.*, 1993b) indique que le nettoyage naturel des littoraux très mazoutés peut avoir lieu dans des endroits abrités des vagues, mais où il y a un apport abondant de particules fines provenant de l'érosion et du transport de l'argile à blocaux exposés sur le littoral.

Bien que l'étude de la floculation argile-hydrocarbures ait porté sur deux exemples de milieux à sédiments grossiers en climat froid, le concept peut s'appliquer universellement à toute zone littorale contenant des minéraux finement granulés et de l'eau de mer en interaction avec les hydrocarbures.

Sur un tout autre sujet, la connaissance des caractéristiques physiques des hydrocarbures explique l'absence de mazoutage du littoral qui a suivi le déversement du *Braer* en 1993. L'intense hydrodynamisme qui caractérisait la zone du déversement durant la période au cours de laquelle les hydrocarbures s'échappaient du navire a entraîné la formation d'émulsions huile dans l'eau, qui sont naturellement non adhérentes. Les hydrocarbures échoués sur le rivage n'ont donc pas adhéré à l'assise rocheuse ni aux sédiments et ont été facilement refoulés dans les eaux de l'avant-plage (Hillebrand, 1993). Les zones de rivage de cette côte n'ont pas été rapidement nettoyées par les fortes vagues déferlantes; en fait, elles n'ont pas été mazoutées en raison des caractéristiques physiques modifiées des hydrocarbures déversés. Cet incident prouve que les propriétés adhésives des hydrocarbures constituent un facteur crucial dans l'échouage et la persistance des hydrocarbures sur les littoraux.

La persistance des hydrocarbures échoués est l'un des facteurs clés dont il faut tenir compte lors de l'évaluation des incidences environnementales et de l'élaboration d'une stratégie de nettoyage (*cf.*, sous-sections 3.1 et 3.2). Sur les côtes où les hydrocarbures sont dispersés rapidement, le temps d'exposition éventuel des animaux et des plantes est de l'ordre de quelques jours à quelques semaines. Dans les endroits abrités, où les hydrocarbures peuvent demeurer pendant des mois, voire des années, les risques de perturbation de l'habitat ou de la chaîne alimentaire sont considérablement accrus. Là où les hydrocarbures demeurent sur le rivage, le nettoyage mécanique naturel peut entraîner la dispersion des hydrocarbures dans les

sédiments subtidaux adjacents (Owens *et al.*, 1987). D'un point de vue de stratégie de nettoyage, l'évaluation de la vitesse d'autonettoyage naturel permet, dans la plupart des cas, de déployer les ressources sur les segments de littoral où la dispersion serait plus lente qu'ailleurs.

Le devenir réel des hydrocarbures sur le rivage doit être examiné pour chaque déversement et dépend des matériaux qui constituent la zone littorale, de l'hydrodynamisme de ce littoral et de la dynamique de la zone en question. Les paragraphes qui suivent traitent du rapport qui existe entre les hydrocarbures échoués, la persistance des hydrocarbures et les types de littoraux.

L'étude de cas de l'*Arrow* en 1970. L'échouement du pétrolier *Arrow*, en février 1970, a entraîné le rejet de plus de 11×10^6 L de mazout lourd. Au début, ce mazout s'est échoué sur environ 305 km de littoral dans la région de la baie de Chedabucto (figure 32), mais moins de 30 km de littoral ont été traités au cours des interventions qui suivirent. Le pétrole de l'Arrow avait un point d'écoulement de -1,1 °C (30 °F) et, une fois déversé dans les eaux froides de la baie de Chedabucto en février et mars, il s'est comporté comme un semi-solide, étant donné que les températures à la surface de la mer étaient inférieures à la température du point d'écoulement du pétrole (Opération hydrocarbures, 1970b). Le pétrole qui a fini par s'échouer sur le littoral pouvait s'écouler, soit dans les sédiments de la plage soit vers le bas de la pente, étant donné que les températures plus chaudes de l'air et du sol au cours des mois qui suivirent au printemps et en été ont rendu ce pétrole plus fluide (Opération hydrocarbures, 1970a).

Un levé de reconnaissance en 1973 a indiqué que seulement 15 % de la côte qui avait été mazoutée lors de l'incident présentait encore des résidus de pétrole (Owens et Rashid, 1976) (figure 33). Un levé détaillé a également été effectué en 1973 dans l'anse Black Duck, au sud de la baie de Chedabucto, qui avait été fort polluée en 1970 (figure 34). Un transect tracé à travers une flèche littorale constituée de cailloux (figure 34*b*) dans une lagune de haute-plage, trois ans et demi après que le pétrole se soit échoué, révèle une couverture à 100 % de la surface par les hydrocarbures encore présents dans les sections moyenne et supérieure (galets et cailloux) des zones intertidales de la lagune (figures 35 et 36). La section centrale (vase mal drainée) était exempte d'hydrocarbures visibles, et une section de la crête formée de cailloux, au-dessus de la laisse moyenne de haute mer, contenait une faible quantité de polluants qui avaient été aspergés au-dessus de la limite de l'action normale des vagues. Relativement peu d'hydrocarbures avaient été dispersés au cours de la période de 40 mois et la contamination était importante dans de nombreuses sections (figures 35 et 36), bien que des plantes aient réussi à pousser au travers d'une épaisse couche d'hydrocarbures altérés dans les sections supérieures du littoral. Les résidus de pétrole qui avaient fait l'objet d'études en 1973 ont été réétudiés en 1992 (Owens *et al.*, 1993b) (figures 37 et 38) et se trouvent encore aux mêmes endroits, principalement sous forme de revêtements bitumineux, mais en quantités légèrement inférieures.

L'étude de 1973 et d'autres visites faites au hasard dans la région ont indiqué qu'il y avait encore du pétrole à certains endroits, mais qu'une grande partie de la côte avait été nettoyée de façon naturelle.

Les sédiments intertidaux sont complètement recouverts d'une épaisse couche (5 à 10 cm) de mazout lourd. Ces hydrocarbures avaient immobilisé les sédiments afin de produire une plage couverte d'un semblant d'asphalte qui n'avait pas été éliminé en août 1973.

Figure 32 **Littoral abrité mazouté dans le passage Lennox, nord de la baie de Chedabucto, Nouvelle-Écosse** (mai 1970)

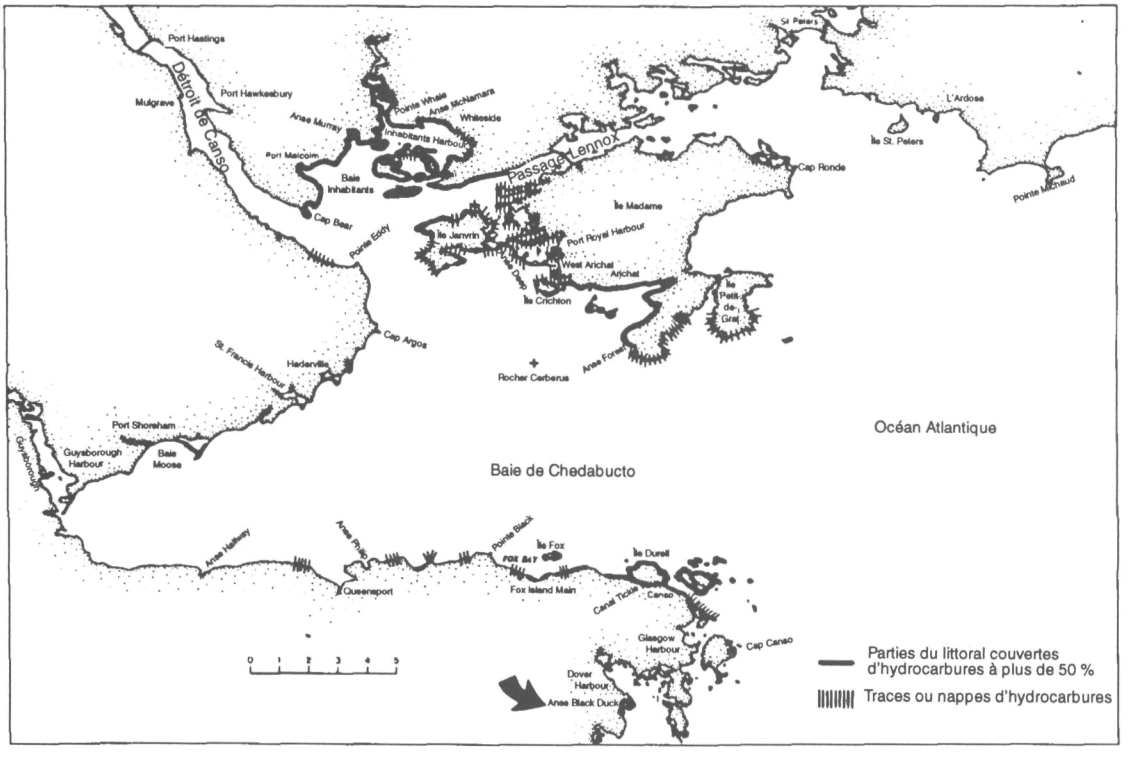
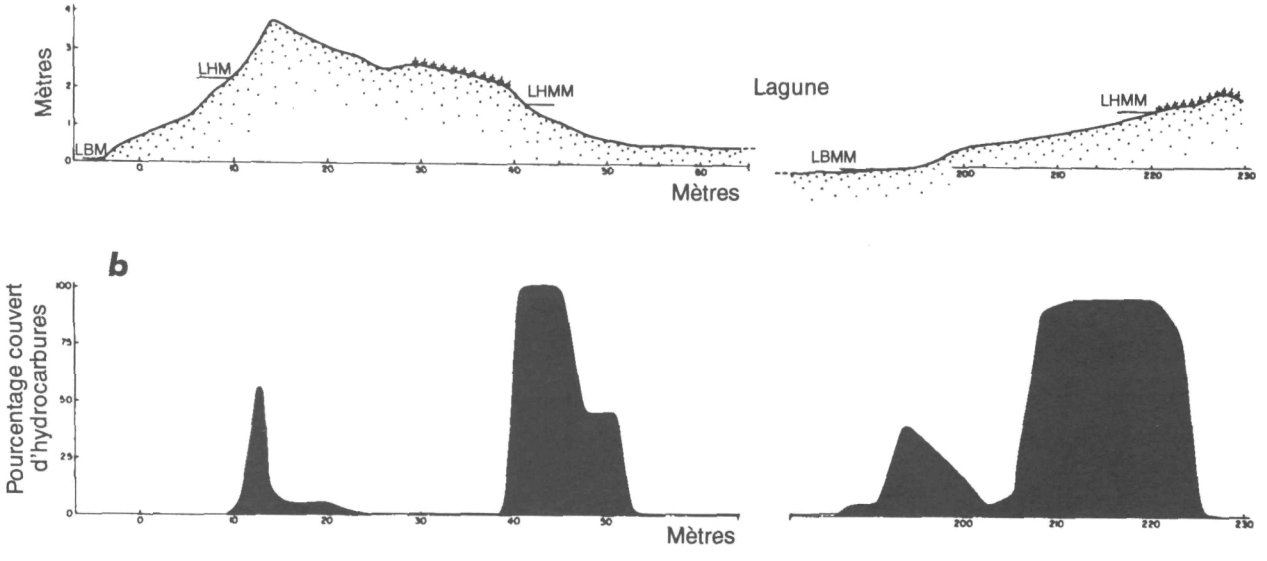


Figure 33 **Distribution des hydrocarbures dans la baie de Chedabucto, Nouvelle-Écosse** (octobre 1973) (la flèche indique l'anse Black Duck)

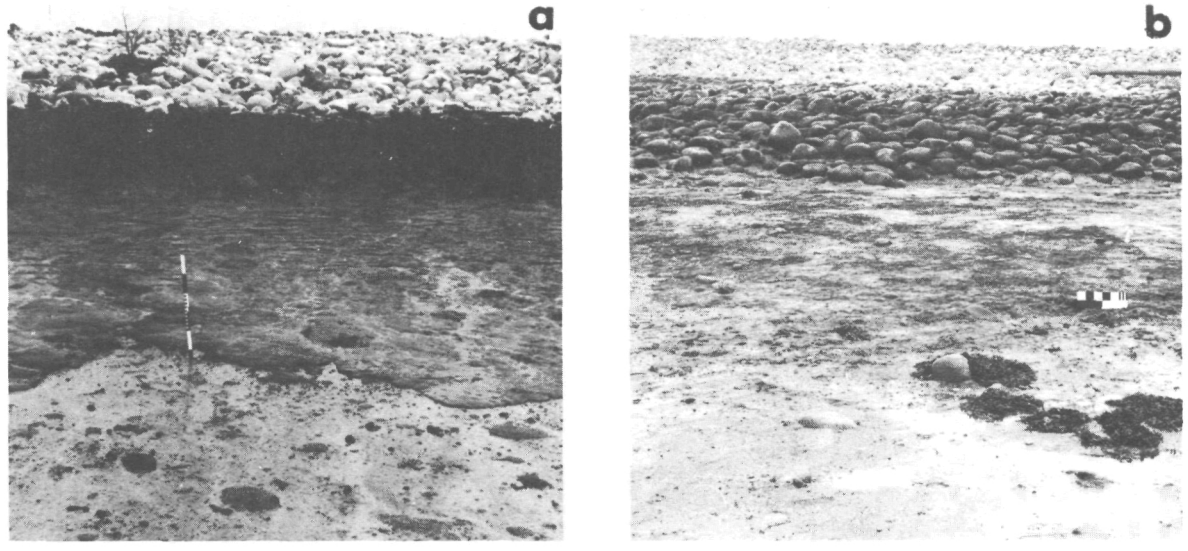
a

Les hydrocarbures échoués sur la plage intertidale extérieure exposée de galets et de cailloux ont été nettoyés en moins de trois ans. La croix blanche situe la figure 36, la flèche, les figures 37 et 38 et le pointillé indique la ligne de profil.



La couverture d'hydrocarbures a été mesurée sur un transect d'une largeur d'un mètre le long de la ligne de profil topographique, trois ans et demi après que le pétrole se soit échoué à cet endroit.

Figure 34 **Anse Black Duck, Nouvelle-Écosse,** *a*) photo aérienne, mai 1970; *b*) profil topographique et couverture des hydrocarbures de surface à travers la flèche littorale et la lagune, juin 1973 (extrait d'Owens et Rashid, 1976)



a) L'échelle est graduée aux 10cm (mai 1970).
b) L'échelle est d'une longueur de 30 cm, la limite supérieure des hydrocarbures se situe au niveau des hautes eaux (mai 1973).

Figure 35 **Hydrocarbures dans la zone intertidale, du côté de la lagune de la flèche littorale dans l'anse Black Duck, Nouvelle-Écosse** (sur la ligne de transect indiquée à la figure 34) *a*) mai 1970, *b*) mai 1973 (extrait d'Owens et Rashid, 1976)

Un levé détaillé au sol a été effectué de juin à septembre 1992 pour localiser et étudier tous les hydrocarbures résiduaires sur les rivages de la baie de Chedabucto, Nouvelle-Écosse. Ce levé systématique a permis de situer du pétrole échoué sur 13,3 km de littoral dans la baie de Chedabucto. Le mazoutage intensif était limité à 1,3 km, concentré principalement dans l'anse Black Duck et le passage Lennox. Des preuves indirectes ont permis d'identifier une certaine quantité de ce pétrole résiduaire comme appartenant à l'*Arrow*. Toutefois, l'analyse chimique a révélé qu'un échantillon de pétrole prélevé dans l'anse Black Duck provenait de l'*Arrow*.

L'altération naturelle est responsable de la majeure partie de l'élimination des hydrocarbures dans la baie de Chedabucto. Là où il reste encore du pétrole, ce dernier se trouve généralement sous forme de minces taches sur la roche en place ou les sédiments grossiers (galets, cailloux et blocs) ou d'un mélange bitumineux résistant d'hydrocarbures et de sédiments. Les endroits peu battus par les vagues, très mazoutés au printemps de 1970 et non nettoyés sont maintenant presque exempts de pétrole. Ces endroits contiennent de grandes quantités de sédiments finement granulés, en suspension, qui ont probablement contribué à l'altération par floculation argile-hydrocarbures, comme dans le cas décrit dans le détroit du Prince-William. La présence ou l'absence de résidus de pétrole dans la baie de Chedabucto peut s'expliquer par l'action de processus physiques,

a

a) La zone intertidale supérieure donne sur la lagune. Les hydrocarbures sur cette plage et sur l'arrière-plage de la plage extérieure couvraient toujours la plupart de la zone intertidale.

b

b) Des concentrations d'hydrocarbures non altérés persistaient toujours dans des dépressions situées dans la zone intertidale moyenne et inférieure.

Figure 36 **Anse Black Duck, Nouvelle-Écosse** (mai 1973) (l'endroit d'où les photographies ont été prises est marqué d'un X sur la figure 34*a*))

Figure 37 **Revêtement bitumineux résiduaire dans la lagune Black Duck, Nouvelle-Écosse** (septembre 1992)

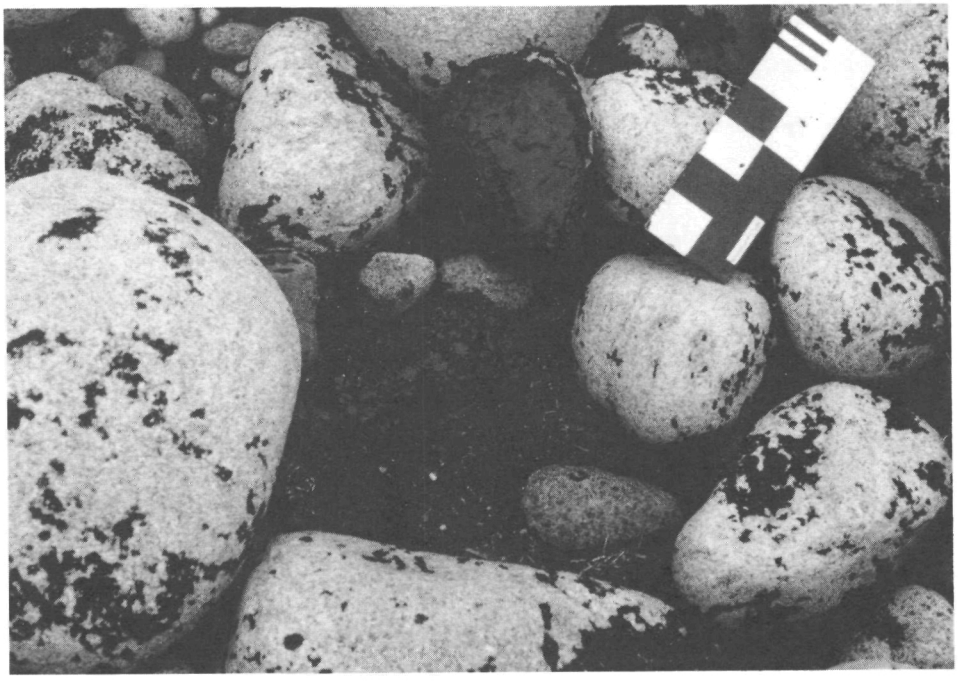


Figure 38 **Espaces interstitiels remplis d'hydrocarbures, anse Black Duck, Nouvelle-Écosse** (près de l'emplacement indiqué par un X sur la figure 34*a*)) (septembre 1992)

biophysiques et biologiques sur les hydrocarbures échoués. Les hydrocarbures demeurent sur le rivage dans les cas où :

- ils se trouvent à l'extérieur de la zone d'action physique des vagues (y compris les lagunes abritées) qui est nécessaire pour transporter les sédiments ou abraser les hydrocarbures;

- ils se trouvent dans les zones de brassage d'avant-plage où il n'y a pas de sédiments fins pour altérer les hydrocarbures par des processus biophysiques (floculation argile-hydrocarbures et biodégradation);

- ils sont altérés à la surface pour former une croûte, de sorte que les processus de biodégradation n'ont aucun effet.

La présence ou l'absence de résidus d'hydrocarbures sur les côtes de la baie de Chedabucto 22 ans après l'incident peut s'expliquer par l'action des processus d'altération physique et de dégradation biologique qui entraînent la disparition des hydrocarbures échoués sur les littoraux. Les effets directs de l'abrasion physique et des pressions hydrauliques exercées par l'action des vagues sur les littoraux exposés constituent un mécanisme efficace et rapide d'élimination des hydrocarbures dans les milieux exposés où l'énergie des vagues est élevée à modérément élevée. L'importance relative des processus physiques et biologiques varie géographiquement dans les endroits où l'action des vagues n'est pas le principal processus d'élimination, de sorte que les hydrocarbures ont été éliminés dans des endroits abrités faiblement battus par les vagues, mais demeurent en quantités substantielles dans d'autres endroits abrités.

Étude de cas du projet de déversement de pétrole à l'île de Baffin (BIOS). Un déversement expérimental a eu lieu à proximité d'une plage abritée de galets et gravier, au nord de l'île de Baffin, le 19 août 1981 (Sergy et Blackall, 1987; Owens *et al.*, 1987c). Ce déversement contrôlé a donné lieu à l'échouage et au dépôt d'environ 5,3 m^3 de pétrole brut moyen vieilli (Owens *et al.*, 1987c,d). Le pétrole a d'abord recouvert la majeure partie de la zone intertidale (figures 39 et 40), mais après les huit courtes saisons d'eau libre, une grande partie du pétrole avait été physiquement éliminée (tableau 9). À cet endroit, la saison moyenne d'eau libre est d'environ deux mois et, au moment de l'étude de 1989, la plage avait été exposée à environ 17 mois d'eau libre (Humphrey *et al.*, 1992).

À cet endroit, la plage n'est pas constituée d'un type de sédiment uniforme et elle se caractérise par une dépression de silts et de sables saturés d'eau qui séparent une crête de galets et gravier à marée basse de l'estran constitué de sable et de gravier. Peu après le début de l'expérience en 1981, il était évident que peu de pétrole avait adhéré aux sédiments finement granulés et humides de la dépression (figures 40 et 41). En 1983, les concentrations de pétrole dans les sédiments étaient maximales sur la pente de l'estran (2 à 5 % au poids) et sur la crête de marée basse (environ 1 %). Un revêtement bitumineux s'était formé sur la partie supérieure de la zone intertidale de sable et gravier à l'été de 1983 (figure 42). Ce revêtement était encore évident en 1989 et une grande partie du pétrole restant était piégée dans ce dépôt de pétrole relativement résistant (Owens et Humphrey, 1988). Bien que lente en termes de temps absolu, l'élimination a été rapide en termes de période d'eau libre (exempte de glace), au cours de laquelle le nettoyage naturel pouvait s'opérer. Elle a également été rapide si l'on considère que cet endroit était faiblement battu par les vagues. Après 8 ans

Figure 39 **Pétrole échoué huit jours après un déversement expérimental de 15 m³ de brut moyen sur une plage abritée au nord de l'île de Baffin** (27 août 1981; extrait d'Owens *et al.*, 1987c) (la tour à droite, au milieu de l'image, se trouve sur la carte de 1981 à la figure 40)

ou 17 mois d'eau libre, 90 à 95 % du pétrole superficiel avait été éliminé.

Les échantillons de revêtement prélevés en 1985, 1987 et 1989 indiquent que les échantillons contenant des concentrations élevées de pétrole dans les sédiments n'étaient que modérément altérés comparativement aux échantillons de concentrations relativement faibles prélevés ailleurs (Owens *et al.*, 1986; Owens et Humphrey, 1988; Humphrey *et al.*, 1992). Cette étude a également montré que les données sur les hydrocarbures pétroliers totaux obtenus à partir des échantillons de sédiments à grains grossiers ne peuvent être utilisées à elles seules pour décrire la plage, mais qu'elles peuvent être utiles pour caractériser ou décrire certaines caractéristiques de la plage, comme un revêtement bitumineux. Sur les plages de sédiments grossiers ou mixtes, il se peut qu'aucun niveau d'échantillonnage acceptable ne puisse fournir un degré de confiance statistique adéquat et que seuls des changements d'une puissance de dix peuvent être révélés à partir de ces données (Humphrey *et al.*, 1992).

L'étude de cas de l'*Exxon Valdez*. Le 24 mars 1989, le pétrolier *Exxon Valdez* s'est échoué dans le détroit du Prince-William et a perdu environ un cinquième de sa cargaison de brut Alaskan North Slope au cours des quelques jours qui suivirent. Environ $10{,}8 \times 10^6$ gallons (252 000 b[l]) de pétrole ont dérivé en direction du sud-ouest, vers les rivages de la partie ouest du détroit du Prince-William, où 783 km de côte ont été mazoutés (tableau 10). La nappe de pétrole a également gagné le golfe de l'Alaska où, sur une distance de 9 500 km, 1 316 km additionnels de littoral ont été pollués à divers degrés (Jahns *et al.*, 1991; Owens, 1991a). Le programme de nettoyage, amorcé au printemps de 1989, a traité tous les littoraux mazoutés dans les régions touchées, qui avaient été désignées par le

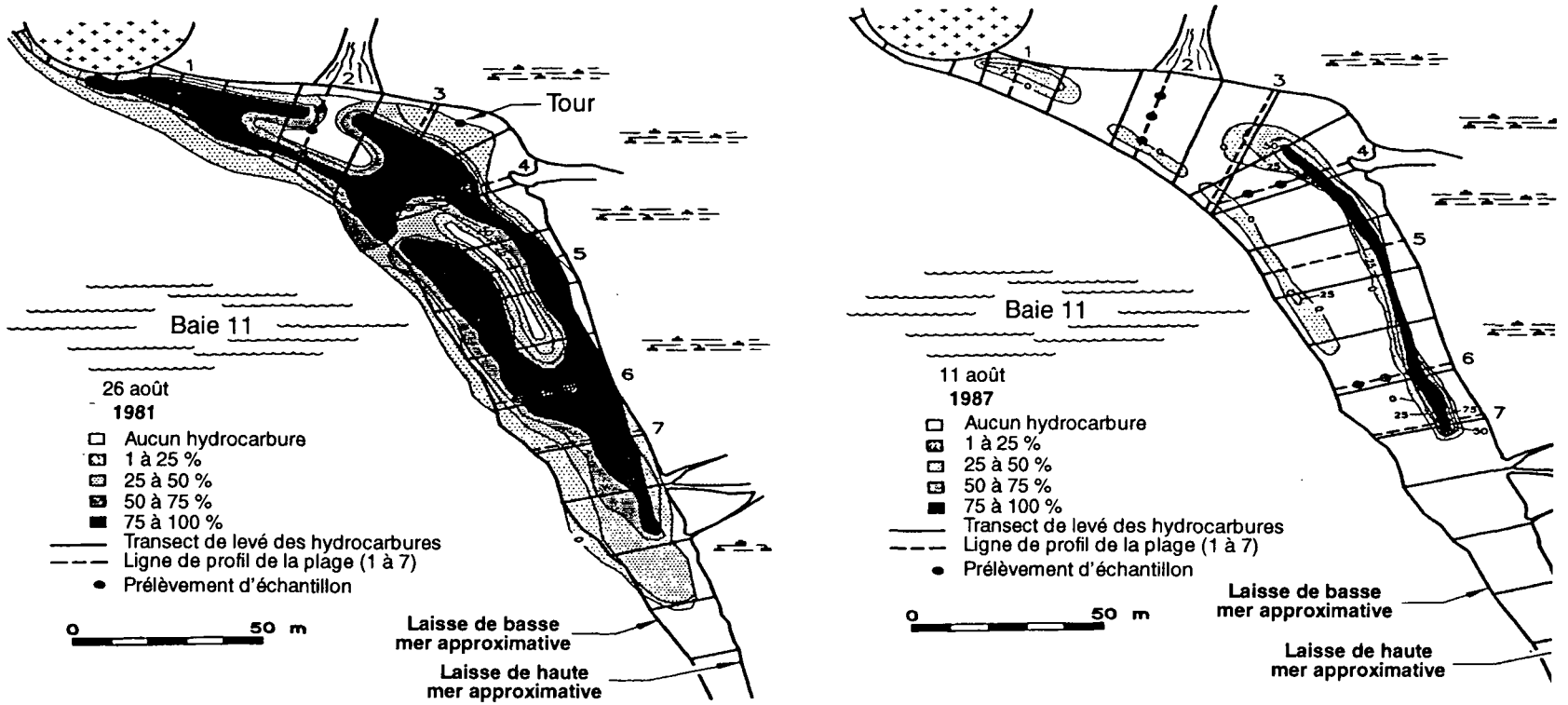


Figure 40 **Cartes de la couverture superficielle de pétrole mesurée sur le site de l'expérience de déversement de pétrole à l'île de Baffin** (BIOS) (1981 et 1987) (extrait d'Owens et Humphrey, 1988)

Tableau 9 **Évolution de la marée noire - site de l'expérience du déversement de pétrole à l'île de Baffin** (BIOS) **de 1981 à 1989**

	1981	1989
Longueur de la plage mazoutée	275 m	160 m
Superficie mazoutée totale	8 570 m^2	1 600 m^2
Couverture moyenne des hydrocarbures	57 %	41 %
Volume des hydrocarbures sur la plage	5,3 m^3	0,3 m^3

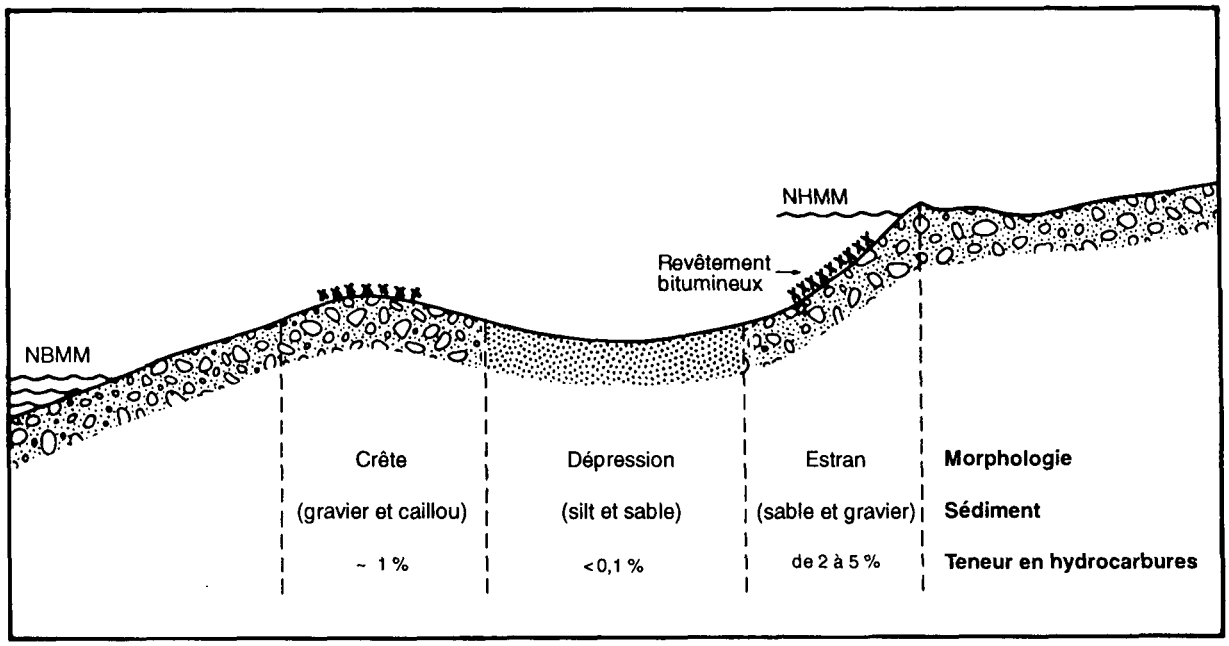


Figure 41 **Rapport entre la morphologie de la plage, le type de sédiments et la couverture superficielle de pétrole** (pourcentage, en poids, du pétrole dans les sédiments en août 1983 le long du profil 5 de la figure 40)

coordonnateur fédéral sur place. Les opérations intensives entreprises en 1989 consistaient essentiellement à déloger par lavage le pétrole échoué sur les littoraux pour le récupérer en mer et, lorsque les quantités de pétrole étaient minimes, à récupérer les résidus ou les débris mazoutés à la main. La diminution rapide des quantités de pétrole sur le littoral observé dès le printemps de 1990 (Owens, 1991a) peut être attribuée à l'élimination d'épais dépôts de pétrole en vrac, ce qui avait entraîné une autoépuration du littoral plus efficace au cours de l'hiver 1989-1990. Les

Figure 42 **Revêtement bitumineux à proximité du profil 5** (14 août 1983)

Tableau 10 **Longueur du mazoutage de surface des rivages dans le détroit du Prince-William, par catégorie d'intensité de mazoutage de 1991, entre 1989 et 1992** (extrait de Neff *et al.*, 1993)

Année	Côte étudiée (km)	Catégorie de mazoutage			
		Très faible	Étroite/ faible	Moyenne/ modérée	Large/ forte
1989	1 450,5	222,9	325,7	94,1	140,6
1990	1 190,0	272,6	79,8	45,9	21,4
1991	385,5	68,1	15,1	11,6	1,8
1992	32,4	8,7	0,8	0,6	0,1

vitesses de réduction des hydrocarbures de surface et de subsurface ont été accélérées sur les segments de la côte où le traitement de 1989 (par lavage) avait été mené dès le début des opérations ou là où on a procédé à un nettoyage intensif et répété.

Au cours des opérations relatives à l'incident de l'*Exxon Valdez* de 1989, le lavage des littoraux mazoutés avec de l'eau à température ambiante a d'abord été couronné de succès. À mesure que le temps d'exposition et les températures de l'air augmentaient tout au long de l'été de 1989, cette technique devenait de moins en moins efficace et a été remplacée par un lavage avec de l'eau chaude sous pression. Même dans ces conditions, les zones qui ont été traitées au cours de la deuxième étape des opérations étaient généralement celles où on a trouvé des résidus mazoutés dans les sédiments qui se trouvent près de la surface et dans la subsurface en 1990 et 1991. Le degré d'effort nécessaire pour traiter ces résidus de subsurface (Owens *et al.*, 1991) était considérable comparativement aux opérations de lavage des premières étapes de 1989.

Lorsque du pétrole est échoué sur des plages à sédiments grossiers, il est préférable, dans la plupart des cas, d'essayer de traiter le plus tôt possible le pétrole mobile qui se trouve près de la surface et sous la surface. Les résidus de pétrole peuvent persister sous le niveau de l'action des vagues et être protégés de l'altération physique.

Le lavage empêche la formation de revêtements bitumineux en éliminant le pétrole qui, sinon, se lierait aux particules de sédiments pour former une surface résistante. On a observé très peu de revêtements dans le détroit du Prince-William après le déversement de l'*Exxon Valdez*, à l'exception d'une petite plage semi-abritée de l'île Applegate où on avait observé un mazoutage sévère dans la zone intertidale supérieure, sur une plage de sédiments mixtes. Cette plage n'a pas été traitée par jets d'eau au printemps ou à l'été de 1989 étant donné que les affleurements rocheux de l'avant-plage empêchaient même les plus petites embarcations utilisées par les équipes de nettoyage d'accoster. Un revêtement s'était formé sur cette plage en août 1989 et il a, par la suite, été enlevé à la main. Ce site est unique, car il est le seul exemple trouvé d'un important revêtement continu (50×5 m) dans le détroit. L'absence de revêtement dans une région pourtant favorable à leur formation (Owens *et al.*, 1986) peut être attribuée à l'élimination de la majeure partie du pétrole résiduaire à l'aide des méthodes de lavage.

Les caractéristiques, la quantité, le devenir et la persistance des hydrocarbures sur le littoral sont les principaux facteurs dont il faut tenir compte lorsqu'on évalue les effets écologiques et le rétablissement des littoraux mazoutés. La surveillance sur le terrain et les levés régionaux qui ont suivi l'incident de l'*Exxon Valdez* (Stoker *et al.*, 1993) indiquent que les effets écologiques à court terme des activités de nettoyage dans le détroit du Prince-William ont été compensés par les avantages à long terme liés au rétablissement écologique de la zone intertidale. À l'été de 1991, il ne restait pratiquement plus de revêtements ou de suintements bitumineux, et le biote montrait peu d'effets attribuables aux hydrocarbures résiduaires. Ces conclusions ont été étayées par un programme d'échantillonnage chimique et toxicologique plus détaillé qui démontrait que les résidus de pétrole ne présentaient aucun danger pour la zone littorale, principalement parce que la plupart de ces résidus étaient hautement asphaltiques, difficilement assimilables et donc inoffensifs pour les organismes marins

(Boehm *et al.*, 1993). Ces mêmes auteurs ont également obtenu des données à partir d'échantillons subtidaux, qui montrent que les hydrocarbures traités au jet d'eau sur le littoral ne s'accumulaient pas dans les sédiments de fond de l'avant-plage.

Les études biologiques signalées par Gilfillan *et al.* (1993) indiquaient qu'en 1990, il était impossible de distinguer entre 73 et 91 % du littoral mazouté dans le détroit du Prince-William et les sites témoins de littoral non mazouté. Cette récupération rapide, comparée aux déversements documentés précédemment, peut être attribuée au nettoyage des littoraux en 1989 et aux effets subséquents, durant les mois d'hiver de 1989-1990, de l'altération physique naturelle (action des vagues et floculation argile-pétrole) et à la biodégradation ultérieure des faibles quantités de pétrole résiduaire laissées après le nettoyage.

2.3 Types d'hydrocarbures et de littoraux

Les milieux côtiers du sud du Canada comptent une grande variété de types de reliefs, allant des larges plages de sable de l'Île-du-Prince-Édouard aux falaises verticales de l'île Moresby, dans les îles de la Reine-Charlotte. Il existe également une vaste gamme de milieux littoraux, notamment les côtes exposées, battues par les vagues, de l'est de la Nouvelle-Écosse, les vasières voisines dominées par les marées de la baie de Fundy, et les marais abrités à faible hydrodynamisme de l'estuaire du Saint-Laurent. Du point de vue des priorités d'intervention et du nettoyage en cas de déversement d'hydrocarbures, les **caractéristiques environnementales**, c'est-à-dire les processus qui entrent en jeu dans la zone côtière, sont très importantes pour comprendre la durée de la persistance des hydrocarbures sur le rivage. Le **caractère physique** du site, en termes de reliefs et de topographie, est cependant essentiel pour évaluer l'impact d'un déversement et choisir une stratégie de nettoyage appropriée.

Malgré la complexité des types de littoraux et des milieux côtiers, il est possible de simplifier l'analyse du littoral en deux types : les littoraux rocheux et ceux qui sont couverts de sédiments. On peut, en outre, subdiviser ce second type de littoral en fonction de la taille des matériaux (vase, sable, sable et gravier, gravier et galets) et en fonction de la présence d'un couvert végétal de stabilisation (marais). Le sable est considéré dans deux catégories indépendantes étant donné que les plages sont très différentes des battures intertidales. Un autre matériau, la glace, est important sur les plages de l'Arctique et fait l'objet de la division 2.3.3 qui traite de ce type de plage en général.

Les différences fondamentales entre les littoraux rocheux et les littoraux de sédiments proviennent du fait que la roche est un matériau stable relativement impénétrable, alors que les sédiments sont meubles, mobiles et poreux. Les marais sont une combinaison de ces caractéristiques étant donné qu'ils ont une certaine stabilité tout en étant poreux. En termes biologiques, ces différences font donc que les littoraux rocheux sont caractérisés par la présence de plantes et d'animaux principalement sédentaires, qui se sont adaptés à l'exposition et à l'inondation propres aux cycles des marées. Les dépôts de sédiments instables (sable, galets, cailloux) abritent cependant des espèces mobiles qui peuvent tolérer un stress physique et des changements rapides de leur habitat. Les marais ont une gamme diversifiée de plantes

et d'animaux marins et constituent un milieu sédimentaire relativement stable, où les changements ne sont généralement ni rapides ni radicaux. Les marais sont l'un des écosystèmes naturels les plus complexes et les plus productifs, grâce principalement à un riche approvisionnement en éléments nutritifs associé aux échanges d'eau dus aux marées.

Le présent rapport mentionne souvent l'exposition d'une section de la côte ou l'hydrodynamisme sur le littoral. Ces termes correspondent au niveau d'énergie mécanique, principalement associé à l'action des vagues, qui déplace les sédiments ou donne lieu à un processus d'érosion et disperse le pétrole mazouté. Sur les côtes battues, qui sont exposées à la pleine force des vagues de l'océan Atlantique ou Pacifique, les gros cailloux sont facilement redistribués durant les tempêtes et les blocs peuvent être roulés et déplacés. Les hydrocarbures échoués dans la zone d'activité des vagues sur ces côtes pourraient être érodés et dispersés en un ou deux jours par l'action violente des vagues. Par contre, les hydrocarbures qui flottent dans une baie ou une anse et qui s'échouent dans un coin abrité, ces hydrocarbures étant protégés de l'action directe des vagues, peuvent être touchés seulement par la marée montante et descendante. Dans ce type de milieu calme, les hydrocarbures peuvent persister plusieurs années à moins d'être récupérés, nettoyés ou biodégradés.

2.3.1 Côtes rocheuses

Falaises ou affleurements rocheux. Le caractère d'un littoral de falaises est défini par l'absence de sédiments dans la zone intertidale (figure 43). Cette distinction est importante étant donné que de nombreuses sections de falaises, si hautes ou si pittoresques soient-elles, ont une plage frangeante à la base. En ce qui a trait au devenir des hydrocarbures échoués, la présence de pétrole sur cette plage est plus importante que la présence d'une falaise dans la zone de l'arrière-plage (supratidale). Du point de vue des opérations d'intervention, la falaise constitue une contrainte majeure en termes d'accès et de disponibilité des zones supratidales pour le rassemblement du matériel.

L'absence de sédiments peut être attribuable à des eaux profondes dans la zone de l'avant-plage, à la lente érosion ou altération de la roche en place ou à l'élimination rapide des sédiments par les processus marins. Dans tous les cas, il n'y a aucun sédiment pour absorber l'énergie des vagues arrivantes ou les hydrocarbures qui s'échouent sur le littoral.

Les affleurements de l'assise rocheuse peuvent se présenter sous diverses formes, allant des falaises verticales (figure 43*a*) à des rampes à pente faible (figure 43*b*) (*cf.* Trenhaile, 1987). Ce type de littoral est soumis à l'érosion, et les affleurements sont sujets à la fois aux processus marins et subaériens. Par exemple, un des principaux processus qui entraînent l'érosion de la paroi des falaises dans les régions tempérées ou polaires est le gel et le dégel successifs de l'eau dans les cavités de la roche. Ces dilatations et contractions successives font subir un stress à la roche en place, et des blocs de tailles diverses sont déplacés et tombent vers le bas de la pente sous l'influence de la gravité. Les processus marins, comme l'action hydraulique des vagues, l'abrasion ou la corrosion due au mouillage et au séchage continuels dans la zone d'aspersion, jouent également un rôle très actif.

Les vagues qui déferlent en volutes sont un agent d'érosion particulièrement efficace étant donné que l'air est emprisonné et

Figure 43 ***a*) Falaise rocheuse verticale, près de St. Anthony, dans le nord de Terre-Neuve** (juin 1981); ***b*) littoral rocheux à faible pente à marée basse près de Chebucto Head, en Nouvelle-Écosse** (avril 1974)

comprimé lorsque les vagues se brisent directement sur les rochers ou sur les falaises. Les fortes secousses produites par ce processus entraînent une érosion directe ou un affaiblissement de la roche suite à une expansion le long des fentes ou des fissures mineures. En présence de sédiments au pied d'une falaise, l'action des vagues peut transformer ces sédiments en matériaux abrasifs qui éroderont les surfaces de la roche ou de la falaise. Le mouillage de la paroi rocheuse par l'eau aspergée par les vagues déferlantes et le séchage causent une dissolution chimique des ciments qui lient les particules contenues dans les roches sédimentaires.

L'érosion peut également se faire de façon plus spectaculaire. Lorsque les vagues parviennent à éroder une encoche à la base de la falaise par abrasion ou dissolution (figures 44 :1a et 45), le sapement peut

1) **L'érosion d'une falaise peut résulter :**
   ***a*) du sapement, suivi d'un éboulement rocheux et de l'enlèvement des matériaux éboulés;**
   ***b*) d'un éboulement rocheux ou de la météorisation de la face de la falaise, suivi d'un enlèvement lent des matériaux éboulés ou érodés.**

2) **Si les falaises sont composées de sédiments meubles ou de roches instables, des glissements de terrain (glissement, éboulement et effondrement) peuvent se produire.**

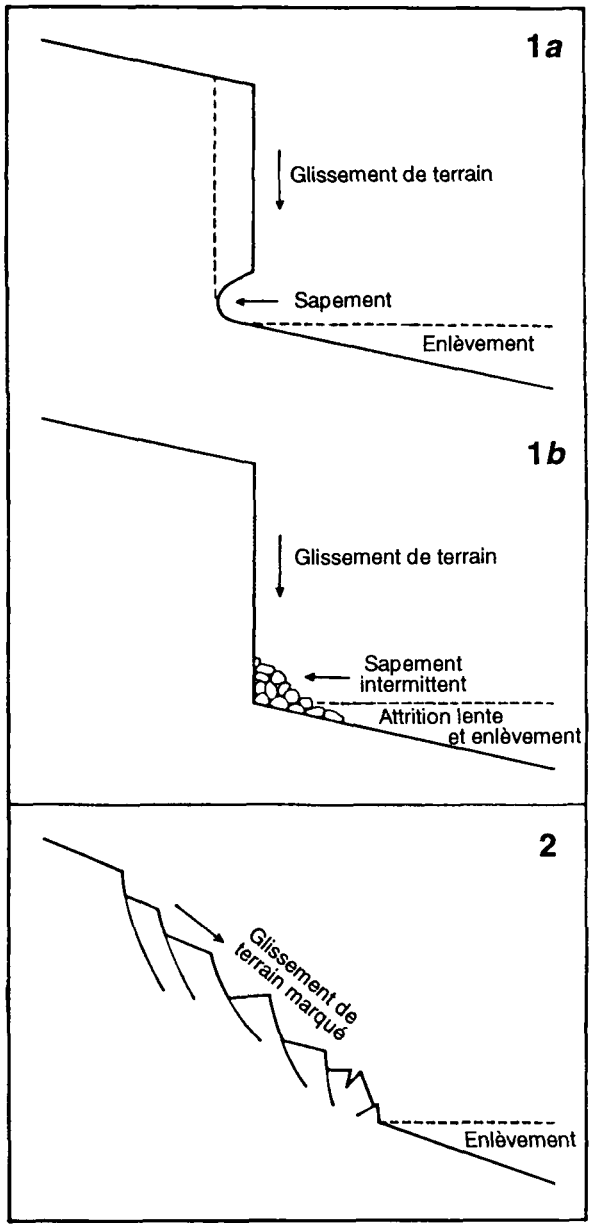


Figure 44 **Processus d'érosion des falaises** (extrait de Davies, 1972)

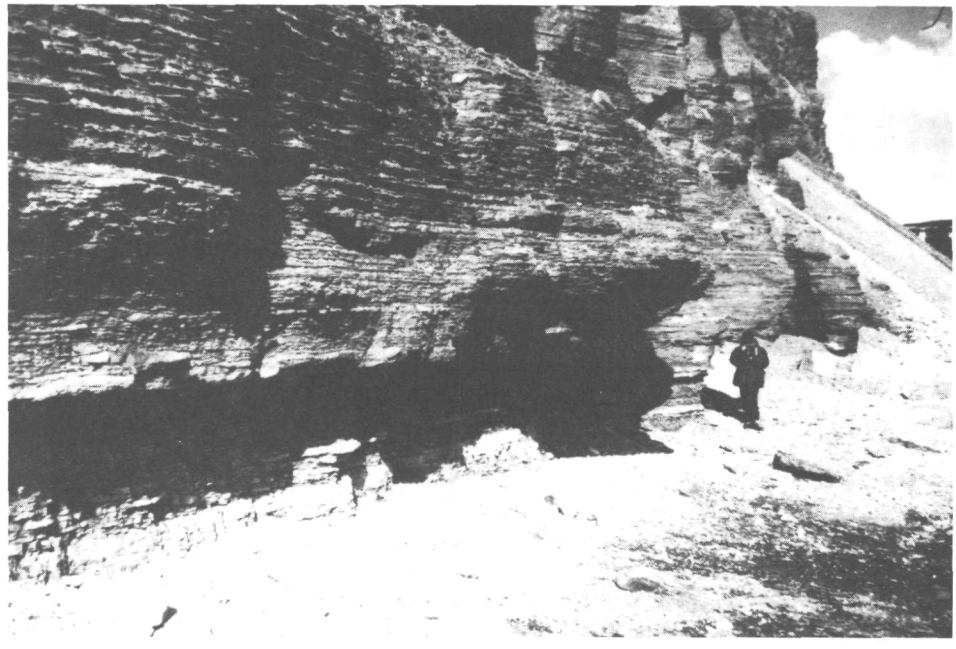


Figure 45 **Encoche érodée à la laisse de haute mer moyenne, bras Gascoyne, sud-ouest de l'île Devon, Territoires du Nord-Ouest** (juillet 1968)

entraîner l'éboulement d'un gros rocher instable (figure 44 : 1*b*). Ce phénomène se produit le plus souvent dans les régions où l'érosion des affleurements est due plus aux processus marins qu'aux processus subaériens. Lorsque des sédiments s'accumulent dans la zone littorale et absorbent l'énergie des vagues, l'érosion est principalement due à des processus non marins, comme la dissolution ou l'action du gel et du dégel. Les exemples d'altération subaérienne intense sont courants dans les régions polaires et, dans les régions où les processus des vagues ne parviennent pas à éliminer les sédiments à la base d'une falaise, la paroi soumise à l'érosion est enfouie sous une accumulation de sédiments (figure 46). Lorsque les sédiments ont été éliminés par érosion à la base d'une falaise, on observe souvent la formation d'une plateforme rocheuse.

La nature locale d'un littoral rocheux ou à falaises dépend principalement du relief de la zone côtière et des propriétés de la roche ou du matériau meuble. Les roches résistantes dans les régions de haut relief ont tendance à former de hautes falaises abruptes. Les affleurements de roches cristallines résistent généralement aux processus d'érosion et la vitesse du changement y est négligeable ou mesurée en termes de millimètres par siècle. Sur les affleurements moins résistants, comme ceux formés à partir de roches sédimentaires, les vitesses d'érosion de 1 m/a ou plus sont fréquentes (Sunamura, 1973). Les affleurements de grès sont facilement érodés, mais ont tendance à former des falaises abruptes en raison de la forte cohésion interne de la roche qui empêche la rupture de pente. Les falaises de ce type sur l'Île-du-Prince-Édouard et la partie est du

a) D'importantes accumulations (talus), formées à la suite de l'érosion de la falaise par altération, ont enfoui la partie inférieure de la paroi de la falaise.

b) Enfouissement semblable de la paroi de la falaise

Figure 46 ***a*) Cap Ricketts sur l'île Devon, Territoires du Nord-Ouest** (août 1968); ***b*) cap Admiral M'Clintock au nord-est de l'île Somerset, Territoires du Nord-Ouest** (septembre 1980)

Nouveau-Brunswick reculent à une vitesse de 1 à 3 m/a. Dans un cas extrême, sur les affleurements de lave nouvellement formés, Norrman (1970) a enregistré une vitesse d'érosion de 75 mètres en une seule année.

Sur les côtes accores en période de vagues, les vagues arrivantes peuvent être réfléchies par la paroi rocheuse et empêcher les hydrocarbures de s'échouer sur le littoral (figure 47, tableau 8). Si les hydrocarbures atteignent la roche ou les falaises, ils ont tendance à recouvrir les zones de surface exposées et éclaboussent souvent les surfaces qui se trouvent au-dessus de la zone de déferlement ou du jet de rive lorsque la vague se brise. Les hydrocarbures n'adhèrent pas bien aux surfaces mouillées et, lorsqu'ils sont échoués dans une zone intertidale, sur de la roche humide à marée descendante, ils sont souvent emportés par le flot pour être déposés à un niveau supérieur par la marée montante.

L'angle de pente des affleurements rocheux est important pour déterminer l'épaisseur des hydrocarbures échoués. Lorsque les pentes sont abruptes, les hydrocarbures ont tendance à s'écouler vers le bas sous l'effet de la gravité, ne laissant qu'une mince couche résiduaire. Les hydrocarbures s'accumulent dans les crevasses et les dépressions de la roche en raison de ce mouvement descendant et de la marée descendante. Les hydrocarbures ainsi emprisonnés seront libérés ultérieurement, au moment de la marée haute normale, des marées de vives-eaux ou durant une onde de tempête. La figure 43*b* est un exemple de côte rocheuse basse dont la surface comporte de nombreuses irrégularités qui emprisonnent et collectent les hydrocarbures échoués.

Les hydrocarbures échoués sur des surfaces rocheuses, dans la zone intertidale, seraient dispersés naturellement par l'action hydraulique et abrasive des vagues. Lorsqu'ils sont échoués au-dessus de la limite normale de l'action des vagues, les hydrocarbures seraient soumis aux processus marins en période de vagues de tempête ou de niveaux de haute mer, et leur persistance dépendrait alors principalement des vitesses de l'altération subaérienne et de l'érosion des falaises.

Sur les falaises peu résistantes, l'érosion non marine constituerait un facteur important pour connaître la persistance des hydrocarbures. Avec le recul de la falaise dû à l'érosion normale par les vagues ou la météorisation, les hydrocarbures seraient transportés vers le bas de la pente où ils seraient enfouis dans un talus d'éboulis ou érodés par abrasion et dispersés par l'action des vagues. La vitesse de l'enfouissement ou de la dispersion dépend clairement de la vitesse de l'érosion de la falaise. Lorsque les processus marins jouent un rôle actif dans l'érosion du littoral ou l'élimination des dépôts du talus, l'élimination des hydrocarbures se ferait rapidement. Sur les côtes arctiques caractérisées par d'importantes accumulations de talus, les hydrocarbures seraient enfouis et soumis à des vitesses très lentes d'abrasion et de dispersion par les vagues.

L'écologie des affleurements rocheux de la zone intertidale dépend en grande partie de l'hydrodynamisme. Un hydrodynamisme élevé peut restreindre la colonisation par les animaux et les plantes, et seules subsistent les espèces qui peuvent se fixer fermement (figure 48) ou trouver refuge dans les crevasses. Dans les milieux moins exposés, les communautés animales et végétales peuvent être très diversifiées et productives.

La persistance des hydrocarbures sur les côtes rocheuses ou à falaises dépend de la

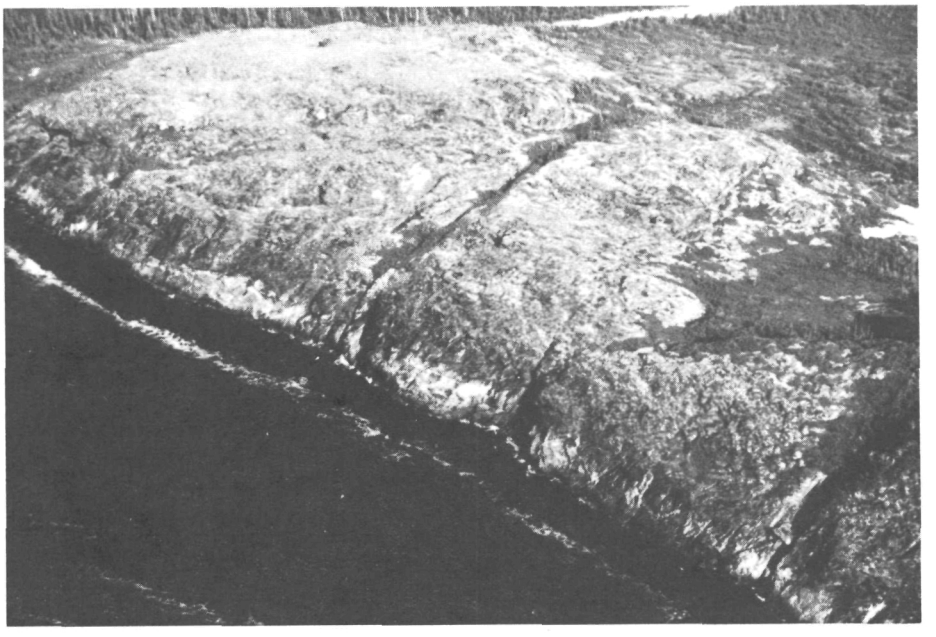


Figure 47 **Réflexion des vagues sur une falaise rocheuse presque verticale dans la baie Etagaulet, rive sud du lac Melville, Labrador** (juin 1980)

Figure 48 **Algues intertidales sur les rochers près de Chebucto Head, Nouvelle-Écosse**

vitesse de l'érosion naturelle (qui est élevée dans le cas des matériaux de faible résistance), de l'hydrodynamisme et de l'emplacement des hydrocarbures. Le mazoutage d'une côte à falaises constituée de roches résistantes dans un milieu abrité, au-dessus de la laisse de haute mer, entraînerait une dégradation relativement lente, alors que les hydrocarbures échoués sur une côte rocheuse exposée y seraient dispersés rapidement s'ils sont soumis à l'action des vagues.

Plateformes rocheuses intertidales. Les plateformes rocheuses intertidales sont un type de littoral commun et constituent un milieu rocheux distinct qui est alternativement exposé et submergé durant le cycle des marées. Les plateformes intertidales se trouvent dans des zones de faible gradient côtier ou bien procèdent de l'érosion de l'arrière-plage. Leur largeur varie de quelques mètres à plus de 1 000 m dans des cas extrêmes et elles peuvent se développer à différentes hauteurs dans la zone intertidale (figures 49 et 50). Les processus qui régissent la formation de plateformes sont complexes et mettent en jeu à la fois l'action des vagues et des marées ainsi que des processus subaériens et biologiques (Kirk, 1977; Trenhaile, 1987).

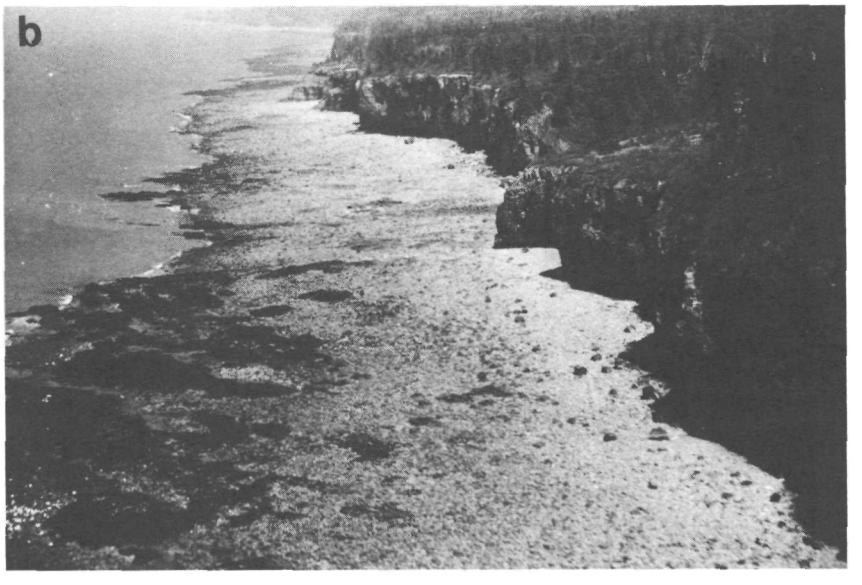
Les plateformes de marée haute et de marée basse (figure 50) sont généralement horizontales et se trouvent respectivement au niveau ou au-dessus du niveau moyen de la marée haute et de la marée basse. Davies (1972) prétend que la plupart des plateformes de marée haute ont été signalées dans les milieux à hydrodynamisme faible ou moyen, d'amplitude microtidale et au climat chaud (p. ex., Hawaï, Sicile, Brésil). Des exceptions comme le sud de l'île de Vancouver, où le rivage est battu par les vagues et le climat tempéré, excluent toute généralisation trop hâtive en termes de conditions ou de processus environnementaux régissant l'origine et le développement de telles plateformes. Parallèlement, des plateformes de marée basse ont été observées dans une vaste gamme de climats et de milieux de vagues et de marées. Du point de vue des hydrocarbures déversés, la principale caractéristique qui distingue ces deux types de plateforme rocheuse est la durée de chaque cycle de marée au cours duquel l'affleurement est exposé et submergé.

Les plateformes rocheuses sont rarement tout à fait exemptes de sédiments, étant donné que les produits de l'érosion des rochers s'amassent dans les creux et les dépressions où ils servent d'abrasif. La principale caractéristique des littoraux rocheux intertidaux provient du fait que les sédiments ne constituent pas une couverture protectrice et que les processus inhérents aux vagues et aux marées agissent directement sur les surfaces rocheuses. Il arrive souvent que des animaux et des plantes couvrent les surfaces rocheuses intertidales (figure 49*a*) et on observe la présence de nombreuses mares tidales, qui ne se drainent pas complètement à marée basse, caractérisées par une forte productivité biologique.

Les hydrocarbures peuvent s'échouer sur les surfaces rocheuses ou dans les creux, les crevasses et les mares tidales à marée descendante. À moins que les surfaces rocheuses soient sèches ou couvertes de végétation, une grande partie de ces hydrocarbures est emportée avec le flot montant et transférée dans les zones intertidales plus élevées ou sur les littoraux adjacents. Les hydrocarbures lourds peuvent se déposer sur les plateformes rocheuses et ne sont pas emportés par les marées suivantes. Les hydrocarbures sont souvent emprisonnés ou absorbés par la végétation intertidale et sont libérés ultérieurement par les courants générés par les vagues et les marées lorsque cette végétation est recouverte par les ondes de tempête.

La dégradation physique et la dispersion des hydrocarbures sur les plateformes rocheuses dépendent du type d'hydrocarbure et de l'hydrodynamisme. Les taux d'abrasion sont plus faibles sur les affleurements rocheux de la zone intertidale en raison de la concentration de l'énergie des vagues près des laisses de haute mer et de basse mer à l'étale de la marée. Les hydrocarbures

a) La surface rocheuse est presque entièrement recouverte d'algues (sur une largeur d'environ 150 m).



b) Les falaises sont découpées dans du basalte triasique résistant, la plateforme intertidale large (environ 150 m) résultant de l'action de la vague est partiellement couverte de cailloux et de galets.

Figure 49 *a*) **Plateforme rocheuse intertidale, baie de Fundy, à l'est de Digby Gut** (juin 1978); ***b*) côte à falaises à l'est de Digby Gut** (juin 1978) (photos prises à marée basse)

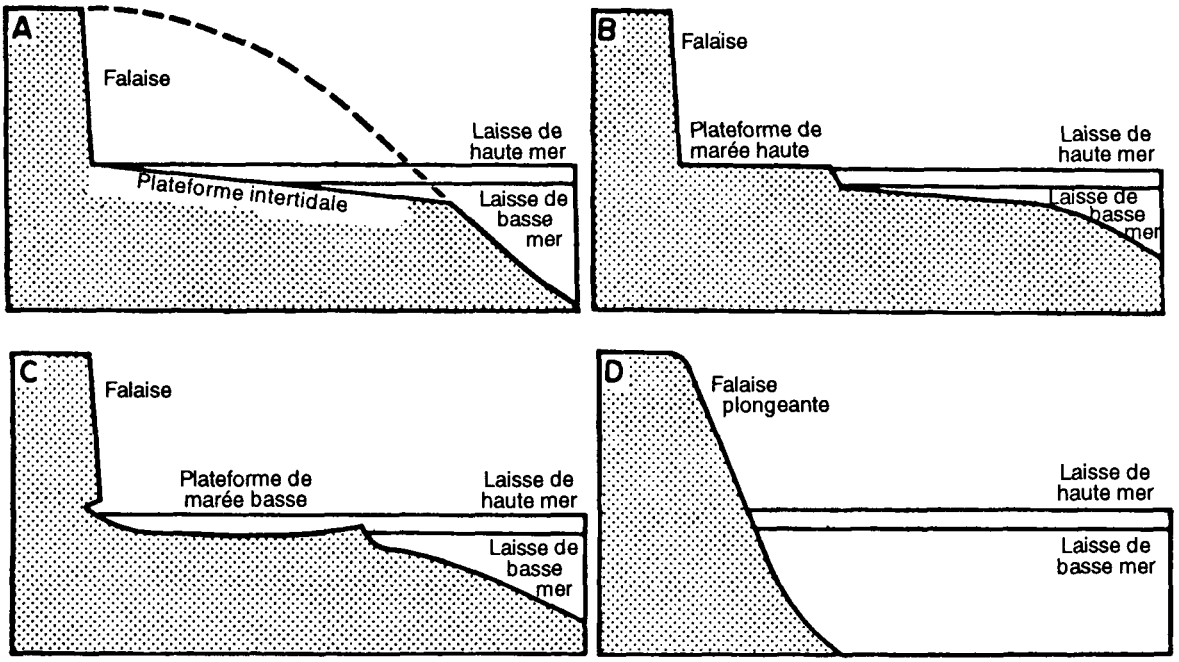


Figure 50 **L'érosion d'une falaise entraîne la formation d'une plateforme dans la zone littorale (A, B, C) à moins que la vitesse de l'érosion soit extrêmement faible en raison de la résistance du rocher (D)** (extrait de Bird, 1969)

emprisonnés dans les crevasses ou les creux qui contiennent des sédiments grossiers peuvent former par endroits des plaques de «revêtement bitumineux» qui s'érodent très lentement (figure 51).

Littoraux artificiels. Les formes et les modèles des ouvrages artificiels témoignent de la richesse de l'imagination humaine. Les matériaux de ces ouvrages se limitent généralement au bois, au béton et au métal. Il faut faire une distinction importante entre les ouvrages solides, qui sont semblables à des affleurements rocheux, et les ouvrages constitués de moellons, de blocs ou de béton préfabriqué. Dans ce dernier cas, la structure devrait être considérée de la même façon qu'une plage de blocs ou de gravier-cailloux. Les hydrocarbures pénètrent dans les «sédiments» artificiels et les méthodes de nettoyage seraient alors les mêmes que celles utilisées sur une plage constituée de matériaux de même taille.

Étant donné que les surfaces de la plupart des structures artificielles solides sont verticales ou abruptes (les murs de pilotis ou les ouvrages de défense du littoral), tous les hydrocarbures échoués s'écouleraient rapidement le long de ces constructions malgré le fait qu'il resterait vraisemblablement des marques ou des taches d'éclaboussement. Les structures artificielles sont généralement construites dans des zones abritées pour le chargement et le déchargement, ou dans des segments exposés du littoral pour protéger la côte ou créer un milieu abrité. Il est donc probable que l'action hydraulique et abrasive normale des vagues élimine rapidement les hydrocarbures échoués sur de tels ouvrages.

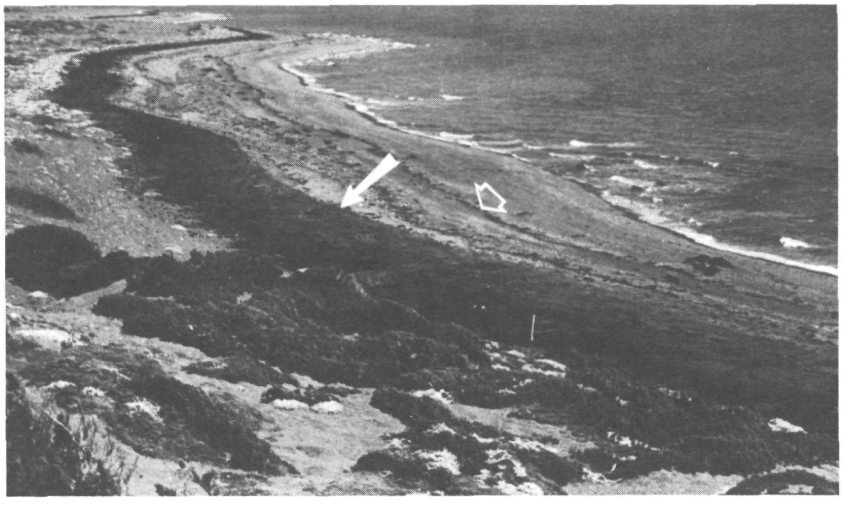
Figure 51 **Mélange d'hydrocarbures et de sédiments dans les crevasses rocheuses intertidales, 3,5 ans après le déversement de l'*Arrow*, île Crichton, Nouvelle-Écosse** (l'échelle blanche mesure 8 cm) (photo de J.R. Bélanger, Institut océanographique de Bedford)

2.3.2 Côtes meubles

Plages de sable. Les dépôts de sable se présentent sous forme de plages ou de battures, dont les caractéristiques biologiques et géologiques sont entièrement différentes. Dans les deux cas, les sédiments sont très mobiles, d'où l'absence générale de plantes et la présence d'animaux capables de tolérer un stress physique considérable. En règle générale, les sédiments des côtes sablonneuses deviennent de plus en plus grossiers, plus instables et la productivité biologique y décroît proportionnellement à l'augmentation de l'hydrodynamisme. À part les crabes fouisseurs, les bivalves, les gastéropodes et les vers qui attirent tous les oiseaux de rivage, la vie animale n'est pas très diversifiée.

Au moment du dépôt des hydrocarbures, le niveau de l'eau, qu'il soit régi par le marnage ou la hauteur des vagues, est un facteur déterminant pour la dispersion naturelle. Des hydrocarbures déposés dans la zone d'activité normale des vagues peuvent être dispersés par l'énergie mécanique des vagues. Des hydrocarbures déposés au-dessus de la limite normale de l'action des vagues seraient dispersés mécaniquement seulement lorsque les niveaux de haute mer ou la hauteur des vagues arrivent à cette hauteur.

Des hydrocarbures se sont échoués à partir du déversement du *Metula* durant une période exceptionnelle de hautes eaux en raison de coups de vents [35 m/s (70 noeuds)] et de grandes marées dans le détroit de Magellan. Le pétrole échoué au-dessus de la limite normale des vives-eaux et de l'action des vagues est demeuré inaltéré par les processus côtiers pendant plus de deux ans et demi (figure 52). Toutefois, dix ans après l'incident, seul un mince cordon d'hydrocarbures, d'une largeur d'environ un mètre, demeurait à la lisière des dunes (Owens et Robson, 1987).



Les hydrocarbures échoués au-dessus de la limite des vives-eaux (flèche pleine) sont demeurés inaltérés par les processus côtiers pendant plus de 2,5 années. La flèche ouverte indique le niveau normal des hautes eaux.

Figure 52 Hydrocarbures sur une plage de sable du détroit de Magellan (janvier 1977)

Le niveau réel du dépôt des hydrocarbures varie selon les vents qui peuvent produire des ondes de tempête, des hauteurs de vague qui peuvent élever le niveau de l'eau sur la plage et du marnage (vives-eaux ou mortes-eaux) qui régit le niveau global de l'eau au moment où les hydrocarbures s'échouent sur le rivage. Sur les plages où les dunes sont brisées par des canaux de débordement (figure 53), les hydrocarbures pourraient être transportés dans les parties intérieures du réseau dunaire et même dans la lagune d'arrière-plage, le cas échéant.

À l'exception des pétroles lourds ou des grands volumes d'hydrocarbures, l'humidité des sédiments de surface peut influer sur le fait que les hydrocarbures adhèrent ou non à la surface des grains, et que les interstices entre les particules sont remplis ou non d'air ou d'eau. L'emplacement de la nappe d'eau souterraine dans l'estran exposé constitue un facteur particulièrement important. Non seulement les eaux souterraines s'écoulent à travers les sédiments lorsque la plage est exposée, mais elles empêchent également les hydrocarbures de pénétrer dans les sédiments étant donné que tous les espaces interstitiels sont remplis d'eau. Il arrive souvent que les hydrocarbures sont déposés sur les parties plus élevées et plus sèches de la plage. Les hydrocarbures échoués dans les zones plus basses et plus humides seront probablement emportés par la marée montante et dériveront vers l'intérieur des terres ou vers le large selon les vents et les vagues. Ce processus de brassage peut être accentué par l'alternance de creusements et de remblaiements fréquente durant la marée montante (figure 17). Les hydrocarbures légers qui peuvent pénétrer dans une plage sablonneuse peuvent être redistribués par la circulation des eaux souterraines dans les limites de cette plage. Un déversement de diesel et d'essence dans les îles de la Reine-Charlotte (le déversement de

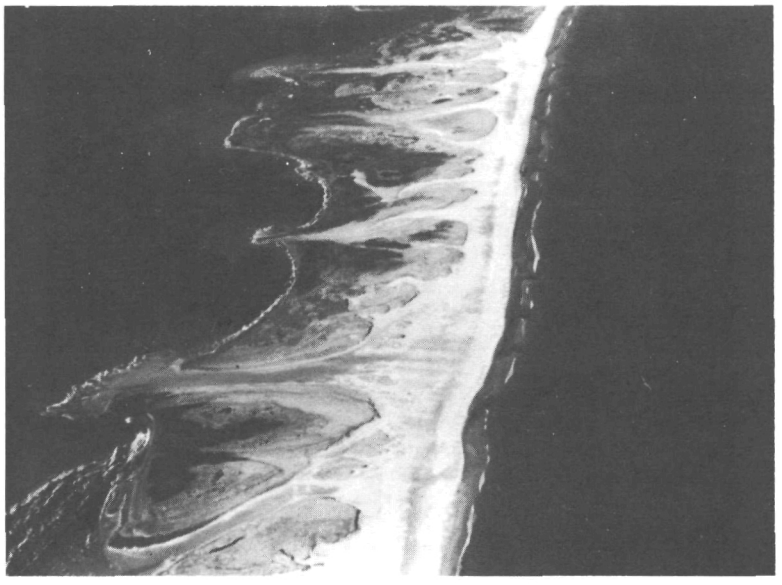


Figure 53 **Vue aérienne de canaux de débordement sur un cordon littoral sablonneux des Îles-de-la-Madeleine, Québec** (photo de P.R. Hague, août 1972)

l'*Eagle Creek*) a fait l'objet d'une surveillance et il a été établi que les hydrocarbures s'étaient déplacés verticalement, sous l'action des niveaux changeants des marées (figure 54) (McLaren, 1985). Deux mois après le déversement, ces hydrocarbures n'avaient toujours pas été lavés de façon naturelle (McLaren, 1985).

Les plages sablonneuses sont sujettes à l'érosion en période de tempête ou d'activité intense des vagues alors que les sédiments sont transportés dans les zones adjacentes de l'avant-plage. Ce matériau est ensuite poussé lentement vers le haut de la plage durant les périodes plus calmes. Ce cycle d'érosion et de dépôt peut entraîner des changements d'altitude de la plage de l'ordre de un mètre ou plus, et sur les plages exposées de la côte ouest, ce cycle est annuel, caractérisé par l'érosion l'hiver et le dépôt l'été (*cf.* p. ex., Owens, 1977d; Harper, 1980a). Un cycle de plage idéal (figure 55) illustre comment les hydrocarbures peuvent être enfouis en période d'érosion de tempête, suivie du dépôt des hydrocarbures (*b*) et d'une restauration ultérieure de la plage (*c* à *e*). Les hydrocarbures enfouis seront alors exposés au cours de la phase d'érosion suivante (*f*).

Les sédiments mobiles peuvent enfouir rapidement les hydrocarbures échoués, comme on a pu le voir lors des incidents de l'*Arrow* (Owens, 1978) et du *Kurdistan* (Taylor et Frobel, 1985b). Un levé du littoral, après le passage d'une petite tempête lors du nettoyage du déversement de l'*Arrow* en Nouvelle-Écosse, a permis de trouver une couche enfouie de mazout lourd déversé qui avait été exposée dans la partie supérieure de l'estran après une période de vagues de tempête érosives (figure 56; *cf.* phase «*f*» à la figure 55). Quelques jours auparavant, une inspection au sol effectuée sur cette plage n'avait permis de déceler aucune trace d'hydrocarbures sur le littoral. Les observations aériennes n'ont signalé aucune

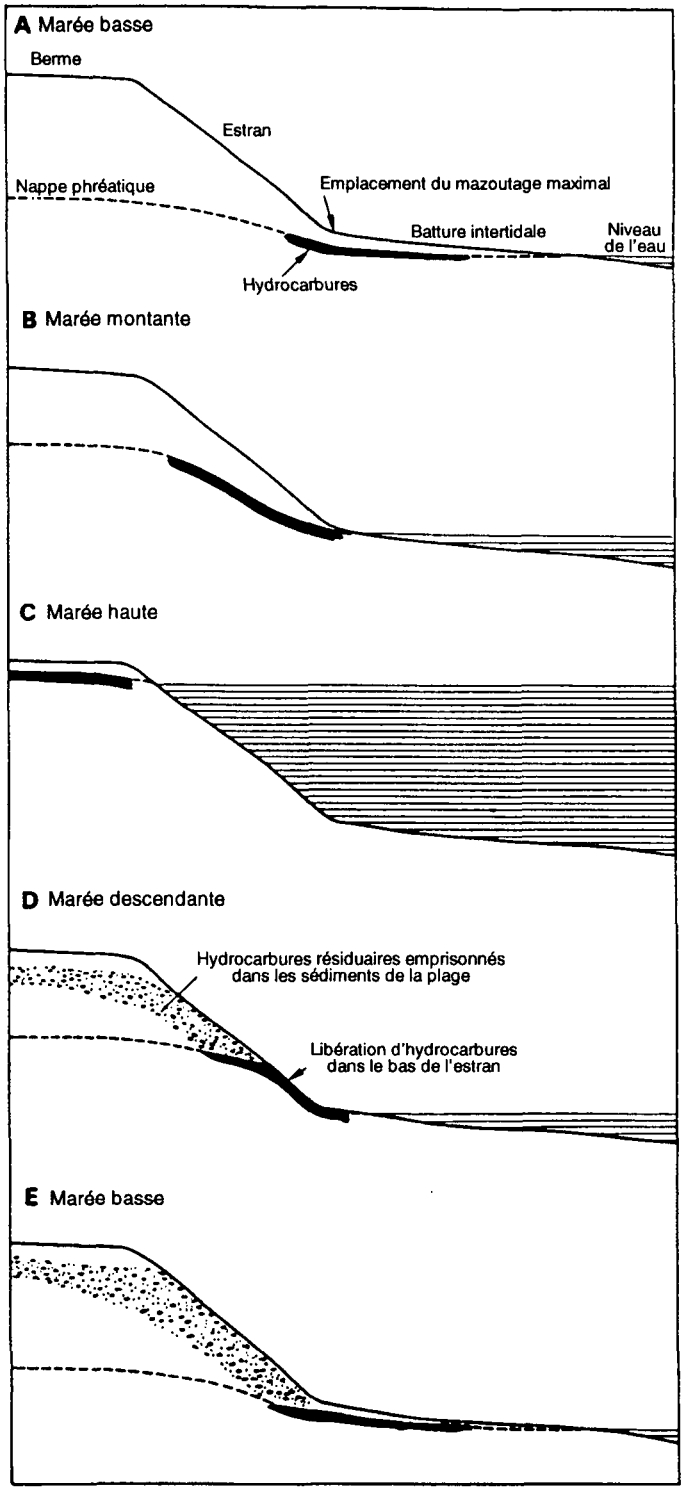


Figure 54 **Changements dans la distribution des hydrocarbures dans les limites d'une plage de sable lors du déversement de l'*Eagle Creek*** (extrait de McLaren, 1985)

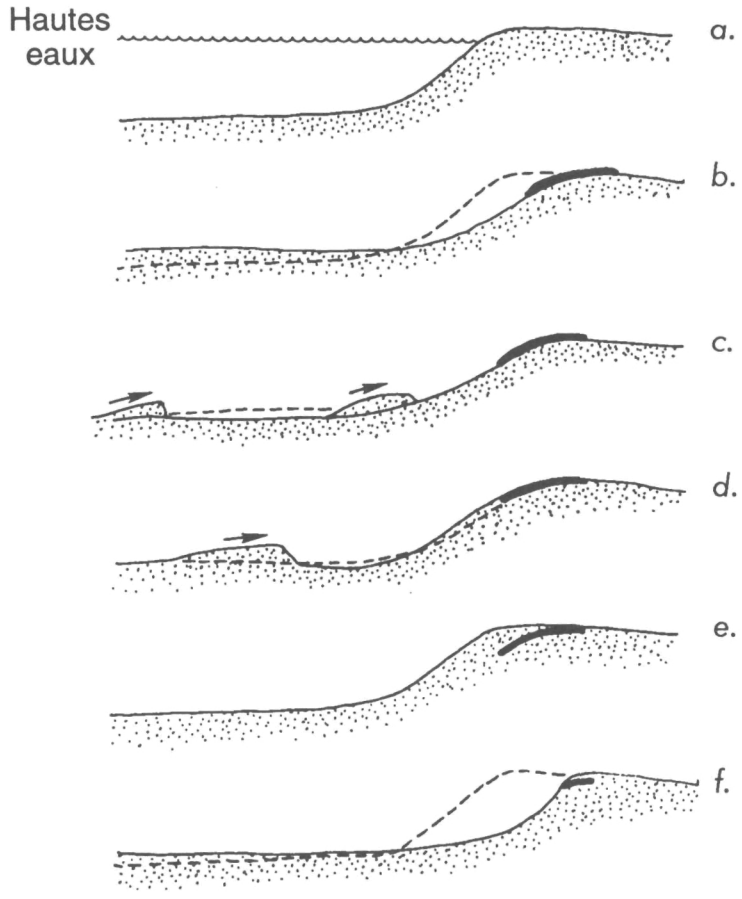


Figure 55 **Effet d'un cycle érosion-dépôt sur une plage de sable après le dépôt d'hydrocarbures sur la partie supérieure de la plage**

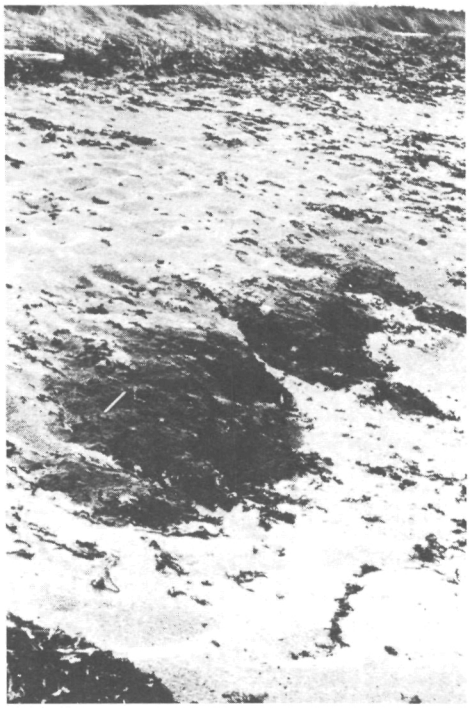


Figure 56 **Hydrocarbures exposés dans la zone intertidale supérieure sur une plage sablonneuse soumise à l'action des vagues de tempête, pointe Michaud, Nouvelle-Écosse** (mai 1970) (cela correspond à la phase «*f*» à la figure 55)

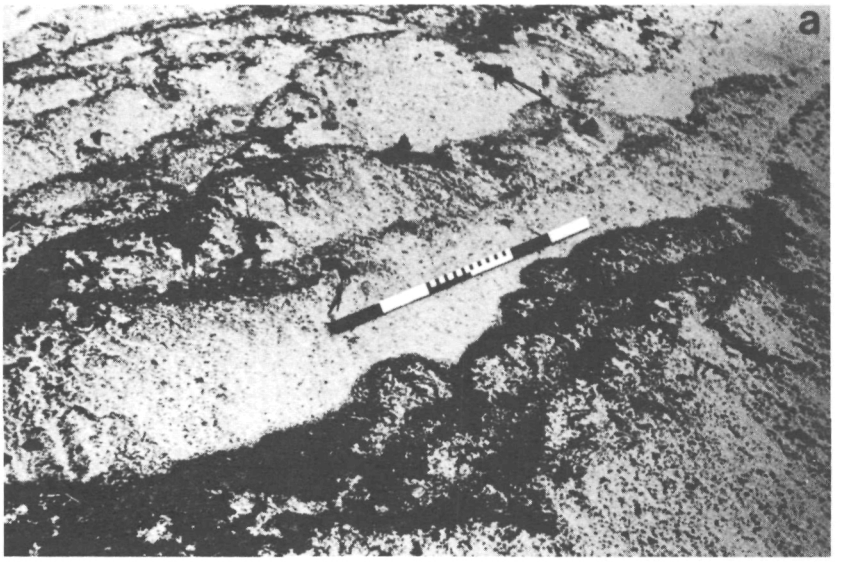
nappe d'hydrocarbures dans la région et il est presque certain que les hydrocarbures avaient simplement été enfouis par des processus normaux de plage. Par contre, lorsque les hydrocarbures sont échoués sur une plage juste avant ou pendant la phase érosive, les sédiments et les hydrocarbures sont éliminés et transportés dans la zone de l'avant-plage. Ce processus peut entraîner une dégradation rapide des particules d'hydrocarbures étant donné que ces particules sont brassées par l'action des vagues (figure 57*a*).

Le type et la viscosité des hydrocarbures ainsi que la présence de vase dans les espaces interstitiels du sable sont des facteurs déterminants des incidences des déversements sur le sable. Les pétroles lourds ne pénètrent pas dans les sédiments (figure 57*b*), tandis que les hydrocarbures légers peuvent s'imbiber rapidement dans une plage et sont alors plus difficiles à disperser ou à épurer par des processus naturels (*cf.* figure 54). La teneur réelle en vase influe considérablement sur la rétention des hydrocarbures : plus la teneur en vase augmente, plus la rétention des hydrocarbures diminue (Harper *et al.*, 1985a). La vitesse du nettoyage naturel dépend également de l'hydrodynamisme. Une plage sablonneuse exposée peut être nettoyée en quelques jours, mais les hydrocarbures qui se trouvent sur une plage sablonneuse abritée prennent des mois à être éliminés. La récupération biologique est généralement rapide étant donné que la plupart des communautés des littoraux sablonneux sont mobiles et peuvent recoloniser par migration les sites une fois les hydrocarbures éliminés ou altérés.

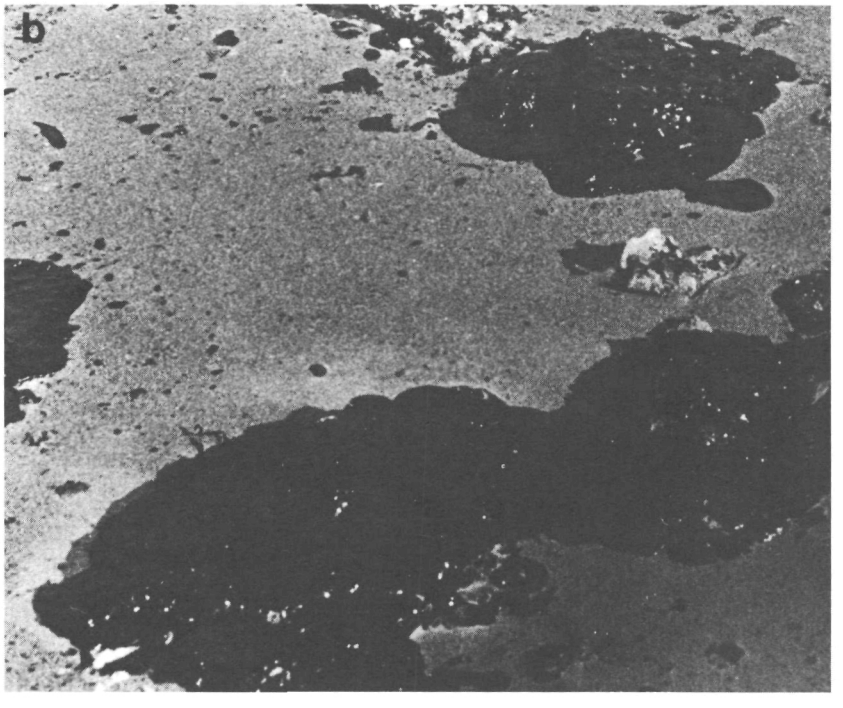
Littoraux de sable et de gravier (sédiments mixtes). La plupart des plages au Canada entrent dans la catégorie des sédiments mixtes de sable et de gravier*. Ce type de littoral ressemble beaucoup à une plage sablonneuse, bien qu'il soit *a)* moins productif sur le plan biologique sur les côtes ouvertes, en raison des niveaux plus élevés de stress physique associé au mouvement des galets, et *b)* plus stable sur le plan géologique étant donné que les matériaux de plus grosses dimensions sont déplacés moins rapidement par les vagues. Ces plages sont néanmoins physiquement dynamiques et les hydrocarbures peuvent être enfouis par le processus normal d'érosion et d'accumulation (figure 58). Les plages forment une base instable pour la vie animale ou végétale et les sédiments sont redistribués continuellement par l'action des vagues. La vitesse de déplacement et de changement des sédiments varie selon l'exposition et l'hydrodynamisme. Même dans les zones abritées, la diversité et l'abondance des espèces sont limitées, les bivalves et les vers étant les espèces les plus importantes.

Les plages de sable et de gravier sont en grande partie inaltérées par les hydrocarbures échoués étant donné que la communauté biologique est composée de peu d'espèces. Il y a cependant de rares exceptions dignes de mention, comme le frai du capelan sur les plages de sable et de gravier de Terre-Neuve et du Labrador pendant une courte période, chaque année. L'échouement d'hydrocarbures à ces endroits aurait un effet direct sur le frai. Les dommages considérables causés à ce cycle de reproduction pourraient avoir un effet qui s'étendrait à la chaîne alimentaire marine, bien que le capelan soit si répandu que seul un déversement extrêmement important à un moment crucial du cycle de reproduction de cette espèce pourrait en menacer gravement

* Le gravier est défini comme étant de petits galets mélangés à du sable.



a) Particules d'hydrocarbures rejetées sur une plage sablonneuse par une marée descendante précédente; l'échelle mesure 60 cm.



b) Hydrocarbures frais de l'*Arrow* sur la surface d'une plage sablonneuse.

Figure 57 *a*) **Anse Black Duck, Nouvelle-Écosse** (avril 1970); *b*) **île Crichton, Nouvelle-Écosse** (photo de G. Drapeau, mars 1970)

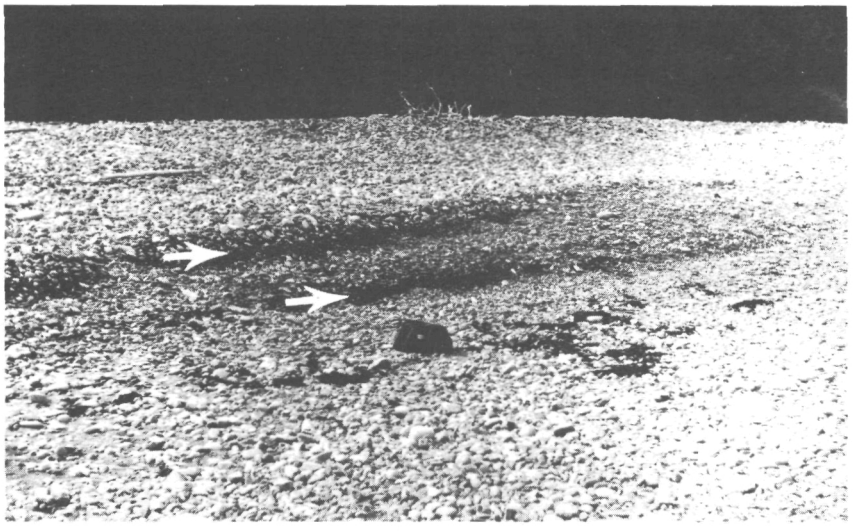
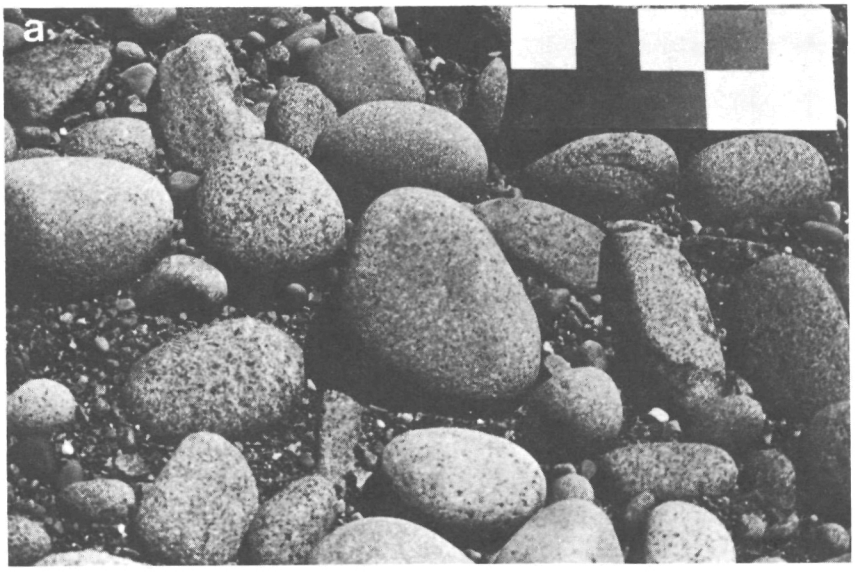


Figure 58 **Double couche d'hydrocarbures exposés sur une plage de sable et de gravier d'Hadleyville, Nouvelle-Écosse** (août 1970) (mazoutée au moins à deux occasions, la première couche a été enfouie par l'activité des vagues de tempête)

la population globale. On connaît moins bien la biologie des plages de sable et de gravier que celle des littoraux plus productifs, mais leur potentiel de rétablissement dépendrait de la quantité d'hydrocarbures échoués et de la vitesse du nettoyage naturel. En cas de pénétration des hydrocarbures dans la plage, suivie d'une lixiviation dans la zone intertidale pendant plusieurs années, la présence continue d'hydrocarbures pourrait retarder le rétablissement biologique jusqu'à ce que ces hydrocarbures soient éliminés ou stabilisés. La vitesse du nettoyage naturel dépendrait en grande partie de l'hydrodynamisme dans une section donnée de la côte ou, dans les zones abritées des vagues, de la disponibilité de fines minérales permettant à la floculation argile-pétrole d'éliminer les hydrocarbures.

Littoraux de gravier et de cailloux ou de galets et de cailloux. Ce type de plages est commun au Canada et il est caractérisé par des sédiments de grandes dimensions et par de grands espaces interstitiels. Lorsqu'il y a du gravier, ces sédiments plus fins peuvent remplir les espaces interstitiels, mais sur les plages de galets ou de cailloux, ces espaces sont libres (figure 59). Ceci est déterminant pour savoir si les hydrocarbures pénétreront dans la plage ou demeureront à la surface. D'un point de vue biologique, sur les plages exposées, ce type de littoral est presque stérile étant donné que très peu d'animaux peuvent survivre au broyage des galets et des cailloux emportés et redistribués par l'action des vagues. Dans les endroits abrités, où les sédiments sont plus stables, la communauté biologique est caractérisée par des espèces mobiles qui peuvent vivre dans les limites de la plage. Cette catégorie de plage ressemble au type de littoral de sable et de gravier en ce qui a trait aux incidences d'un déversement, au rétablissement et au nettoyage.

Les sédiments de galets et de cailloux de ce type de littoral ne sont pas soumis aux mêmes processus cycliques que ceux d'une plage de sable ou de gravier en raison du taux élevé d'infiltration des sédiments



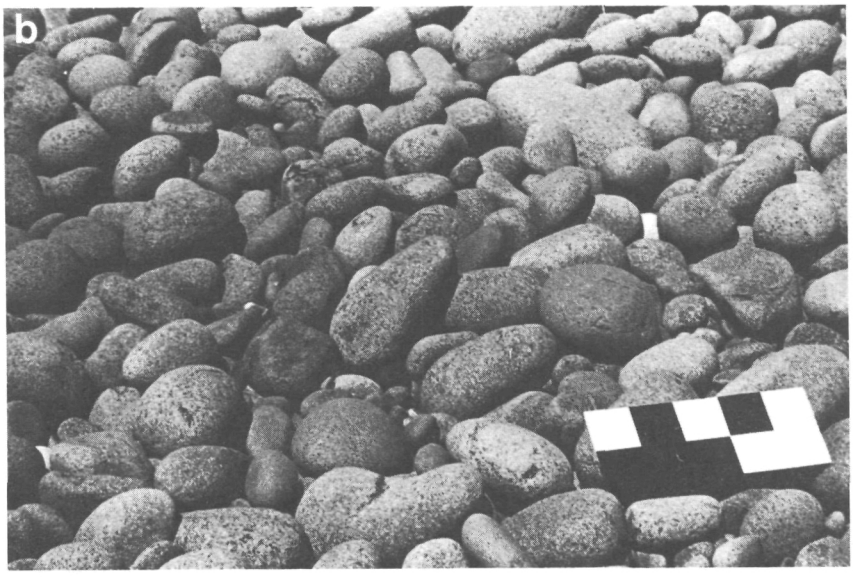


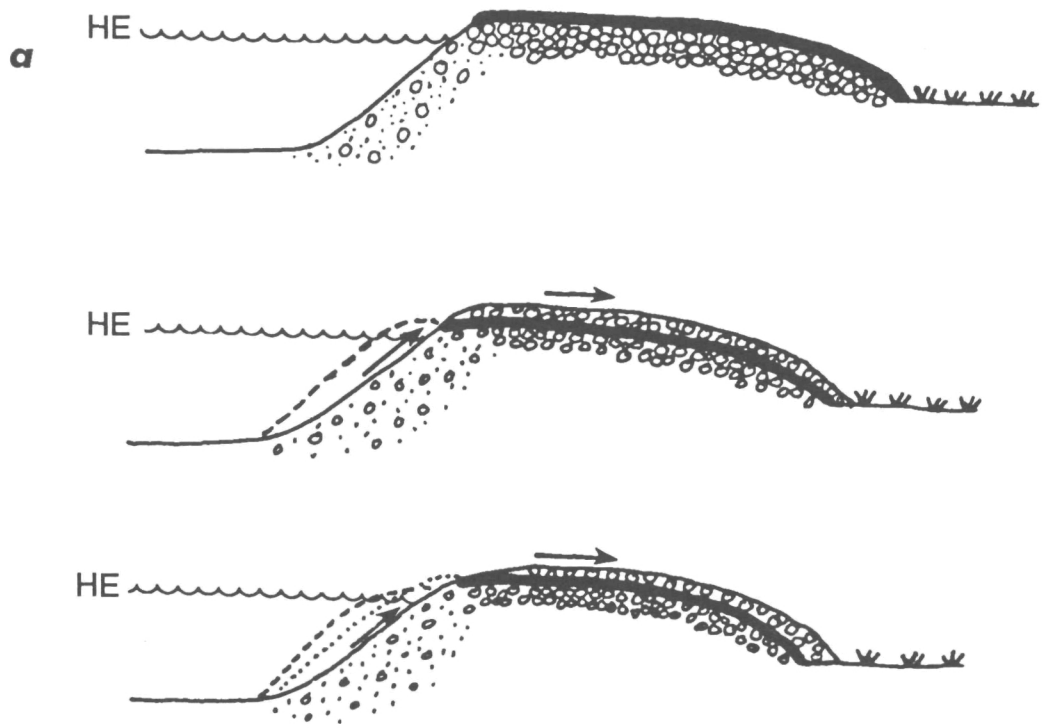
Figure 59 ***a*) Sédiments de gravier mixtes (sable, galets, cailloux) sur une plage** (l'échelle mesure 25 cm)**; *b*) plage de galets et de cailloux sans fraction sablonneuse**

grossiers. Le retrait de la vague est souvent limité dans la zone intertidale supérieure après le jet de rive, c'est pourquoi les sédiments se déplacent plutôt vers le haut ou au-dessus de la crête de plage. Il en résulte habituellement une migration progressive de la crête de plage vers l'intérieur des terres, et les hydrocarbures déposés sur cette crête seront enfouis, un petit segment de la couche d'hydrocarbures étant exposé et érodé sur l'estran (figure 60).

La formation de revêtements bitumineux constitue une caractéristique courante des plages mazoutées de sédiments mixtes (sable et gravier ou gravier et cailloux) (figures 42 et 61). De tels revêtements ont été observés au Canada à la suite du déversement de l'*Arrow* (Owens, 1978), du *Kurdistan* (Taylor et Frobel, 1985b) et sur le site de l'expérience BIOS (Owens *et al.*, 1987c). Dans le détroit de Magellan, un important revêtement bitumineux a subsisté 12 ans et demi après le déversement du *Metula* (Owens et Robson, 1987). Les hydrocarbures s'échouent généralement sur les sections supérieures de la zone intertidale et se mélangent avec les sédiments pour former un composé résistant semblable à de l'asphalte, caractérisé par une surface altérée et des hydrocarbures relativement inaltérés à l'intérieur du mélange (Owens et Robson, 1987). Les concentrations de pétrole dans les sédiments des revêtements bitumineux sont de 2 à 5 % (Owens *et al.*, 1986). Aucun revêtement bitumineux ne s'est formé sur les plages de galets et de cailloux du détroit du Prince-William après le déversement de l'*Exxon Valdez* étant donné que le programme de nettoyage en 1989 a permis d'éliminer efficacement le gros des hydrocarbures qui auraient pu former l'élément bitumineux du revêtement.

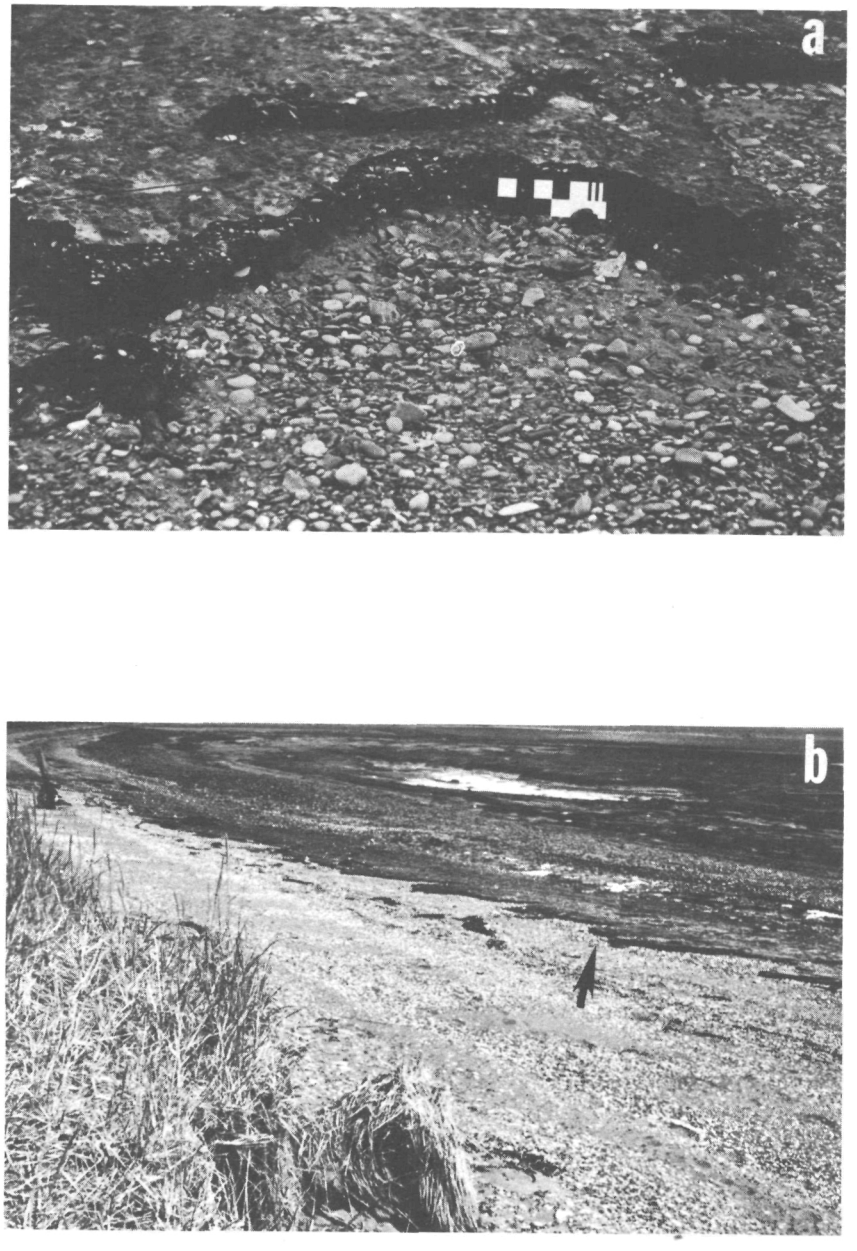
Slikkes intertidales. Les vases sont des sédiments très fins qui s'accumulent généralement dans des endroits abrités à hydrodynamisme faible, comme les baies ou les estuaires. Elles forment habituellement des surfaces planes ou à pente douce dans la zone intertidale (figure 62) et peuvent couvrir plusieurs kilomètres de large dans les zones basses lorsqu'elles sont exposées à marée basse. Leur teneur en eau demeure élevée. En fait, les vasières sont généralement saturées d'eau, même à marée basse, en raison du tassement des sédiments. La surface plane est souvent coupée de chenaux de marée à parois abruptes, qui constituent un obstacle au déplacement à travers les slikkes. La surface des slikkes intertidales n'est pas statique étant donné que les sédiments fins sont redistribués par les vagues et les courants. À certains endroits, un cycle saisonnier régulier d'érosion et de dépôt peut entraîner des changements du niveau de surface d'environ 30 cm. Les slikkes constituent un milieu biologique très productif abritant de nombreuses espèces animales qui s'enfouissent et qui vivent dans les sédiments de surface, comme les bivalves, les crabes, les gastéropodes et les vers. Ces animaux sont souvent en très grands nombres et constituent une source importante de nourriture pour les oiseaux et pour l'homme.

Les hydrocarbures déversés, même des hydrocarbures légers comme l'essence, ne pénétreraient pas dans les sédiments très tassés ou imbibés d'eau d'une slikke, sauf lorsque les trous laissés par les animaux fouisseurs permettent un processus d'accumulation. Les hydrocarbures légers et moyens seraient probablement éliminés et lavés de la surface après seulement quelques cycles de marée (p. ex., figure 54). Cependant, lorsque le déversement est important et que des hydrocarbures s'incorporent dans les sédiments, les effets sur les animaux fouisseurs sont immédiats;



Les hydrocarbures sont déposés au-dessus du niveau de hautes eaux (HE) dans des conditions de tempête, une deuxième tempête érode la plage et les vagues poussent les matériaux sur la partie supérieure de la plage de façon à couvrir les hydrocarbures, une autre tempête continue le processus, exposant graduellement une plus grande partie des hydrocarbures enfouis.

Figure 60 *a*) **Effets de l'activité des vagues de tempête sur des hydrocarbures échoués sur une plage de cailloux** (extrait d'Owens, 1977b); ***b*) couche d'hydrocarbures enfouis, exposée sur l'estran d'une plage de cailloux, baie de Chedabucto, Nouvelle-Écosse** (août 1970)



Le site représenté par la photo *a*) est indiqué par la flèche sur la photo *b*).

Figure 61 **Érosion le long de la crête supérieure d'un «revêtement» d'hydrocarbures par l'action du retour des vagues dans un milieu abrité, sur une plage de sable et de galets mixtes, rive sud, détroit de Magellan** (janvier 1977)

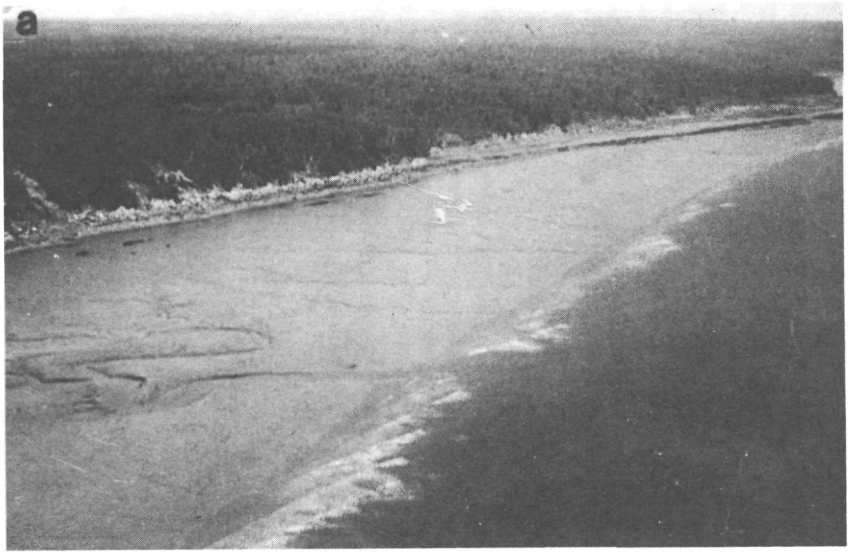


Figure 62 **Baie de Fundy** (juin 1978) ***a*) larges slikkes exposées à marée basse sur la rive nord du bassin Cumberland; *b*) ouest du cap McCoy sur la rive nord**

le lavage et le nettoyage naturel des hydrocarbures sont alors très lents. Les pétroles lourds peuvent se déposer et ne pas être remportés à la surface de l'eau par les marées hautes subséquentes. Le principal danger qui menace les animaux d'une slikke résulte de la contamination par les hydrocarbures des terriers secs ou ouverts et d'une suffocation en surface. Une préoccupation importante en ce qui a trait aux pétroles lourds déversés dans ce type de milieu productif provient du fait que les fractions toxiques des hydrocarbures échoués sur une slikke ou à proximité pourraient être lixiviées et s'infiltrer dans les sédiments de surface. Ces hydrocarbures pourraient alors être ingérés par les animaux dont un grand nombre se nourrissent en remaniant des dépôts de vase. Les effets de déversements majeurs peuvent être considérables, comme l'ont démontré les taux élevés de mortalité d'animaux observés dans les slikkes de Bretagne après l'incident de l'*Amoco Cadiz*, où un grand volume de pétrole a été emprisonné sur la côte par les courants et où les slikkes ont été mazoutées à plusieurs reprises par les cycles de la marée. Lorsque les sédiments sont très mazoutés, comme dans ce cas, il faut plusieurs années, dix ou plus, pour que les hydrocarbures soient lavés de façon naturelle des sédiments anaérobies de subsurface (Gundlach *et al.*, 1983). Le temps de séjour des hydrocarbures enfouis dépend de nombreux facteurs, notamment l'oxydoréduction, la dégradation microbienne et les déplacements de l'eau à l'intérieur des sédiments (Little *et al.*, 1981).

Battures intertidales sablonneuses. Les battures sablonneuses (figure 63) ressemblent à bien des aspects aux slikkes et contiennent une plus grande quantité de sédiments fins que la plupart des plages sablonneuses. Les animaux fouisseurs y sont plus prolifiques que sur les plages sablonneuses et la productivité biologique est souvent élevée, mais jamais autant que dans les slikkes intertidales. Les sédiments sont instables et le sable est généralement redistribué par l'action des vagues et des courants de marée sous forme de larges vagues ou rides migratoires à la surface des slikkes.

Les hydrocarbures légers et moyens peuvent pénétrer la surface des sédiments lorsqu'ils sont drainés et peuvent y demeurer très longtemps (Little et Scales, 1987). Le scénario du pire cas pour une côte sablonneuse serait un déversement d'hydrocarbures légers sur une batture sablonneuse abritée, étant donné que les sédiments pourraient demeurer mazoutés plusieurs années alors que le rétablissement s'avérerait un long processus.

Les milieux marécageux. Les marais sont différents des autres types de littoraux pour la raison principale qu'ils sont caractérisés par une couverture dense de végétation enracinée. Les marais sont fréquents dans les estuaires ou en arrière des cordons littoraux et se développent dans des milieux abrités où les sédiments fins (silt et sable) s'accumulent et où les jeunes plants peuvent s'établir sans être déracinés. Ces milieux constituent l'un des systèmes biologiques les plus productifs et sont étroitement liés à l'écosystème marin étant donné que de nombreuses espèces mobiles passent leur premier stade de croissance dans cet environnement protégé. La surface des marais est généralement une prairie plane plantée d'herbes halophytes à réseau radical dense, et seulement inondée par l'eau de mer lors des marées de vives-eaux. Cette partie du système abrite une vie animale et végétale abondante et elle est très fréquentée par la sauvagine pour la nidification et l'alimentation. Un marais se développe à mesure que les sédiments sont emprisonnés

a) Des vagues de sable exposées à marée basse sur les larges battures intertidales. Ces vagues de sable mesurent jusqu'à 1 m de hauteur, sont espacées de 3 à 5 m chacune et migrent de gauche à droite sur cette photo. Le goéland au coin inférieur de la photo donne une idée de l'échelle à utiliser.

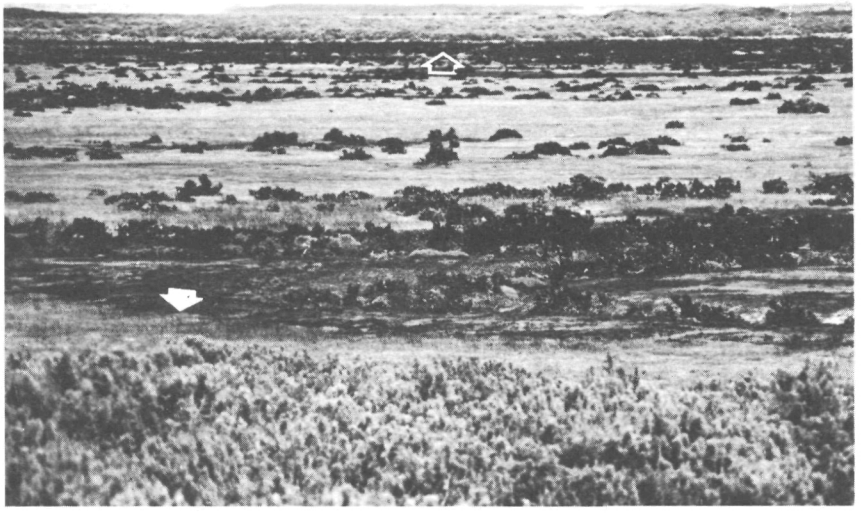
b) Battures sablonneuses intertidales; les personnes au centre de la photo donnent une idée de l'échelle à utiliser.

Figure 63 **Baie de Fundy *a*) à l'est de l'estuaire de la rivière Avon dans le bassin Minas; *b*) rive sud du bassin Annapolis** (juin 1978)

par les plantes et que l'eau circule à sa surface durant les périodes d'inondation de la prairie. La marge marine du marais est souvent une slikke intertidale ou une batture sablonneuse, ou encore un canal de marée. Un grand nombre de ces canaux et cours d'eau servent d'aire d'alevinage ou de frayère pour le poisson et autres organismes marins; c'est pourquoi l'effet d'un déversement d'hydrocarbures dans un marais pourrait être ressenti bien au-delà des limites réelles d'un système de marais.

Les incidences des hydrocarbures déversés dépendent principalement de l'endroit où ces hydrocarbures s'échouent et du type d'hydrocarbures en question. Lorsque le niveau de la marée haute est normal, les hydrocarbures se déposent le long de la lisière extérieure du marais. Ce fut le cas du déversement de mazout lourd du *Golden Robin* dans la baie des Chaleurs (figure 64), bien que du pétrole ait été déposé par la suite à quelques endroits de la surface de la prairie marécageuse par des marées plus fortes (*cf.* Vandermeulen et Ross, 1977; Vandermeulen et Jotcham, 1986). Cependant, lorsque les hydrocarbures sont balayés sur le littoral en période de haute mer, soit durant les grandes marées ou les ondes de tempête, la surface supérieure de la prairie pourrait être gravement endommagée. Ce fut le cas à la suite du déversement du *Metula* alors que le pétrole a été déposé dans les sections les plus intérieures de la prairie marécageuse (figure 65) (Blount, 1978). Une fois les hydrocarbures échoués dans la partie supérieure du marais, ils peuvent y demeurer plusieurs années avant d'être dégradés biochimiquement (figure 66) (Baker *et al.*, 1993). Le pétrole frais ou le pétrole léger peuvent pénétrer rapidement dans la surface d'un marais et altérer les racines des plantes, étant donné que les sédiments de surface sont généralement secs et poreux. Les effets de ce type de pétrole sont plus graves et se font sentir à plus long terme que ceux des pétroles lourds ou altérés. Ces derniers ne pénètrent pas dans la surface et sont moins toxiques, bien que des résidus goudronneux puissent persister plus longtemps et étouffer les plantes. Les dommages possibles s'étendent non seulement aux plantes et aux animaux qui habitent la surface du marais,

Figure 64 **Hydrocarbures** (indiqués par les flèches) **emprisonnés dans les canaux et en lisière du marais à marée haute, marais Miguasha, baie des Chaleurs, Québec** (octobre 1974)



Noter les touffes de végétation mazoutées à la surface du marais.

Figure 65 **Vue au sol du marais Espora, détroit de Magellan, Chili** (la flèche ouverte indique l'avance extrême des hydrocarbures vers l'intérieur des terres et la flèche pleine marque l'emplacement des hydrocarbures sur une levée, sur le bord du chenal) (janvier 1977)

Les nappes d'hydrocarbures importantes avaient peu changé depuis la dernière étude du terrain en janvier 1977.

Figure 66 **Hydrocarbures sur la partie supérieure d'une prairie marécageuse du marais Espora, détroit de Magellan, Chili, 12,5 ans après le mazoutage** (janvier 1987)

mais également aux oiseaux en cas d'échouement d'hydrocarbures frais. Les marais se rétablissent des effets du mazoutage et des opérations de nettoyage, soit un ou deux ans au maximum dans le cas d'un marais légèrement mazouté (Getter *et al.*, 1984), mais ce processus peut être prolongé si les racines des plantes sont

perturbées ou arrachées. Le rétablissement des marais de Bretagne à la suite de l'incident de l'*Amoco Cadiz* et des opérations de nettoyage est décrit par Baca *et al.* (1987) qui précisent que là où il y a eu une autoépuration naturelle, le marais s'est rétabli dans les cinq ans suivant l'incident, mais que le nettoyage du marais et l'enlèvement du substrat ont prolongé le rétablissement de deux à trois ans à d'autres endroits.

2.3.3 Littoraux de l'Arctique canadien

De par sa définition, une côte arctique est littéralement une côte qui se trouve au nord du cercle arctique; cependant, dans la pratique, ce terme est utilisé pour décrire les littoraux qui sont soit influencés par les glaces, soit faits de glace. Bien que la glace se forme sur le rivage et à la surface de l'eau aussi loin au sud que le lac Érié et la baie de Fundy, les effets sur les caractéristiques du littoral y sont généralement peu importants. Par contre, sur les littoraux arctiques du passage du Nord-Ouest, la glace peut être présente sur le rivage et sur la partie adjacente de la mer pendant des périodes pouvant atteindre 10 mois chaque année, et la glace peut être plus importante que les glaces ou les marées en ce qui a trait au modelé du tracé de la côte. Plus de 40 % des côtes canadiennes se trouvent au nord du cercle arctique, et jusqu'à 85 % de ces côtes sont influencées par la glace, les côtes du Pacifique étant la seule région exempte de glace.

La glace réduit l'action des vagues sur le littoral soit à la surface de la mer, où la couverture glaciaire empêche la production de vagues, soit sur le littoral même où la glace flottante (figure 14) ou la banquette côtière («pied de glace») (figure 15) absorbe l'énergie des vagues arrivantes. Ces effets réduisent les niveaux d'énergie sur le rivage et, ainsi, la capacité des vagues de déplacer les sédiments côtiers ou d'éroder les falaises. La glace peut jouer un rôle direct dans le déplacement des sédiments ou l'érosion du rivage dans certains cas limités. Les floes qui s'échouent sur le littoral ou qui sont poussés contre le rivage peuvent affouiller la plage et empiler les sédiments (figure 11). La glace peut attaquer les affleurements rocheux et ce processus, qui n'a généralement pas d'importance en ce qui a trait à l'érosion de ces affleurements, peut arracher les plantes ou déloger les animaux fixés à la paroi rocheuse.

Les littoraux du nord du Labrador et de la baie d'Hudson sont soumis à l'effet des glaces en moyenne 6 à 8 mois par année. Plus au nord, la mer de Beaufort est généralement libre de glace pendant trois mois chaque été, mais certaines années de forte accumulation de la glace, la zone littorale peut être libre de glace pendant seulement un mois. Sur les îles du bassin Sverdrup, adjacent à l'océan Arctique (p. ex., Amund Ringnes, Ellef Ringnes, Lougheed et Mackenzie King), la glace se retire rarement et l'action des vagues sur le littoral y est très limitée (*cf.* division 4.4.8).

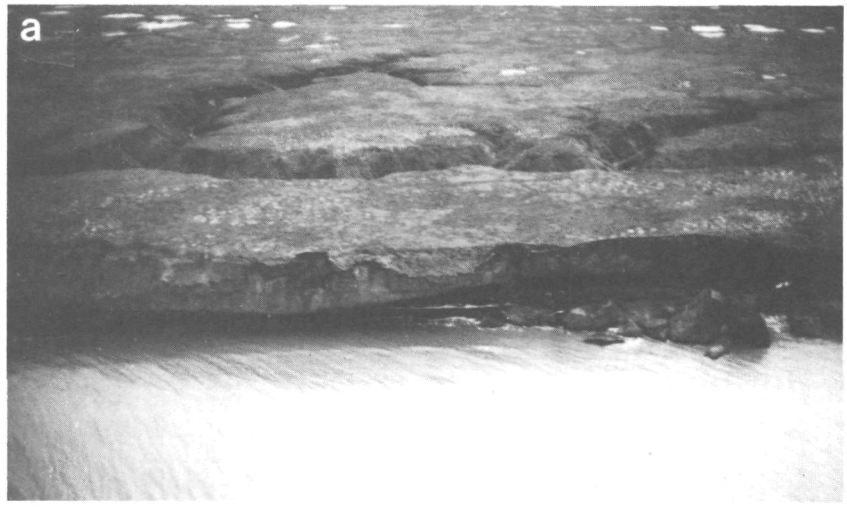
Dans presque toute la zone arctique, les types de littoraux sont les mêmes que ceux que l'on trouve à des latitudes plus basses et plus chaudes, mais la présence de glace est responsable de deux types de littoraux uniques à l'Arctique : les rivages riches en glace et les côtes glaciaires. Dans le premier cas, sur les basses côtes de la toundra, le dégel de la glace au sol durant les mois d'été peut causer l'érosion rapide de la zone littorale (figure 67). Sur les reliefs plus élevés, la glace au sol peut être exposée sur les parois de falaises riches en glace et, étant donné que la température de l'eau est plus élevée que celle de la glace, l'érosion thermique peut creuser une niche à la base de la falaise (figure 68*a*). Ce phénomène

Figure 67 **Cicatrices laissées par les coulées de dégel régressif dans les sédiments côtiers de la baie Theseiger, sud de l'île Banks** (septembre 1981)

peut entraîner le sapement et l'effondrement de la paroi de la falaise (figure 68*b*). Les falaises de toundra riches en glace sont fréquentes le long des côtes de la mer de Beaufort et du delta du Mackenzie. À certains endroits, la côte est composée entièrement de glaciers et de plateformes de glace en phase de vêlage. On observe ce phénomène sur des côtes montagneuses où ces glaciers aboutissent dans la mer et vêlent en lisière des eaux. Sur les côtes des îles Devon et Baffin, ces glaciers de marée produisent des icebergs dans la baie de Baffin, lesquels sont charriés vers le sud par les courants, le long des côtes du Labrador et de Terre-Neuve. Sur l'île Ellesmere, dans le Grand Nord canadien, la glace de glaciers a formé de larges plateformes qui couvrent plusieurs kilomètres à la surface de l'océan Arctique. Ces plateformes peuvent avoir une épaisseur de plusieurs dizaines de mètres et, lorsqu'elles se brisent, elles créent des îles flottantes qui fondent lentement et qui peuvent demeurer plusieurs années dans le pack polaire.

Un type de littoral qui procède uniquement de l'action des glaces se trouve plus au sud, dans la région qui s'étend du sud de l'île de Baffin jusqu'à la partie sud du Labrador. Dans ces zones côtières, l'action de la glace a créé un type de littoral unique attribuable à la formation de levées de blocs dans la zone de basse mer de nombreuses battures (*cf.* p. ex., McCann *et al.*, 1981; Rosen, 1979; et les divisions 4.4.2 et 4.5.2).

Les milieux côtiers de l'Arctique sont différents de ceux des régions plus au sud principalement parce que les heures d'ensoleillement réduites limitent les saisons de croissance et de reproduction à la fois chez les plantes et les animaux (Owens et Robilliard, 1981). Il y a moins d'espèces résidentes, comme les mollusques et crustacés, les crabes et les vers, prolifiques sur un grand nombre de rivages plus au sud. Les plantes et les animaux y sont généralement en plus petits nombres que dans les régions plus chaudes. L'affouillement de la glace sur les côtes rocheuses et l'exposition des plages à des températures inférieures au point de congélation durant une grande partie de l'année parviennent à éliminer efficacement



a) Niche créée à la base d'une falaise riche en glace sous l'action de l'érosion thermique à Maitland Point.

b) Affaissement de blocs à la suite de sapements; les parties blanches consistent en glace au sol exposée en raison de l'affaissement récent de blocs.

Figure 68 ***a*) Sapement près de l'île Baillie, dans le sud de la mer de Beaufort, Territoires du Nord-Ouest** (septembre 1981); ***b*) sud-ouest de l'île Baillie, dans le nord-est de la baie Liverpool, Territoires du Nord-Ouest** (septembre 1981)

toutes les espèces intertidales, à l'exception des plus robustes.

Un élément important du caractère de la zone côtière réside dans le fait que l'activité biologique, et particulièrement la reproduction, est concentrée durant la courte saison des eaux libres. Au cours de cette période, la diversité et l'abondance des espèces augmentent considérablement à certains endroits au fur et à mesure de l'arrivée des espèces migrantes pour leur reproduction et leur alimentation. Des perturbations comme celles causées par un déversement d'hydrocarbures ou des opérations de nettoyage pourraient alors avoir de graves conséquences. Les espèces les plus touchées seraient la sauvagine, certains oiseaux de rivage et quelques espèces de poisson qui fraient dans les eaux côtières. Duval (1985) a fait une étude sur le devenir et les effets biologiques des hydrocarbures dans l'Arctique.

Une grande partie de la zone côtière de l'Arctique est biologiquement stérile pendant 9 à 10 mois chaque année. Cependant, à certains endroits, il règne souvent une activité intense durant les courtes périodes de l'année correspondant aux phases de reproduction d'espèces migratrices. Les milieux côtiers arctiques doivent être étudiés séparément de ceux qui se trouvent plus au sud, principalement parce que le calendrier des activités biologiques est essentiel à la survie de certaines espèces et parce que ces milieux se remettent très lentement des effets de perturbations majeures. La courte saison estivale très productive sur le plan biologique amplifie les incidences possibles d'un déversement d'hydrocarbures à cette période de l'année. En d'autres périodes, ces incidences seraient négligeables en termes de processus biologiques.

Le devenir et la persistance des hydrocarbures sur le littoral sont régis par les mêmes processus, que ce soit dans les régions chaudes ou dans l'Arctique. Le rôle de la glace est important dans ce contexte étant donné que la réduction de l'hydrodynamisme attribuable à la présence de glace de mer ou de banquette glaciaire signifie qu'il y a moins d'énergie pour éliminer physiquement les hydrocarbures échoués, comparativement à une plage semblable dans un milieu libre de glace. La persistance des hydrocarbures échoués dépend du niveau d'énergie des vagues durant la saison des eaux libres et de la vitesse du changement du littoral. Sur les côtes extérieures de l'île de Baffin, par exemple, les tempêtes estivales sont relativement fréquentes, habituellement au moins une fois à chaque saison d'eau libre. Aussi, ces tempêtes produisent généralement des vagues suffisamment fortes pour éliminer ou remanier les hydrocarbures échoués. Par contre, les hydrocarbures qui seraient échoués sur les plages des îles du bassin Sverdrup ne seraient soumis pratiquement à aucun hydrodynamisme et, ainsi, le devenir et la persistance de ces hydrocarbures seraient semblables à ceux des hydrocarbures déversés à terre. Un déversement expérimental de brut moyen sur une plage abritée de sable et de gravier dans le nord de l'île de Baffin est encore très évident après huit ans, ou environ 17 mois de conditions d'eaux libres (figure 40; tableau 9) (Humphrey *et al.*, 1992). À cet endroit, un revêtement bitumineux qui s'était formé dans la zone intertidale supérieure contenait la majeure partie des hydrocarbures (70 %) résiduels, et ces hydrocarbures étaient restés relativement frais et inaltérés. Une certaine quantité d'hydrocarbures qui avaient été érodés de la plage a été trouvée dans les sédiments subtidaux de l'avant-plage (Owens *et al.*, 1987a).

La modification du littoral s'effectue en général très lentement dans l'Arctique canadien en raison du faible hydrodynamisme. Cependant, sur la côte de la mer de Beaufort où il y a des falaises de toundra riches en glace sur le littoral, le processus estival de fonte des glaces peut causer des vitesses de recul supérieures à 3 m/a, soit effectivement plus de 1 m pour chaque mois d'eau libre. Tout pétrole échoué sur ces côtes au retrait rapide serait également soumis à une érosion rapide.

À l'exception du rôle des glaces dans la zone côtière, les littoraux arctiques sont semblables à ceux de la partie méridionale du Canada. Ils sont moins bien connus en raison de l'éloignement de nombreuses régions qui, encore aujourd'hui, demeurent relativement inexplorées et inhospitalières. La zone littorale est souvent stérile, mais, durant l'été arctique, de nombreuses zones connaissent une période d'activité intense qui est essentielle pour les espèces migratrices. Un déversement d'hydrocarbures au cours de cette courte période pourrait avoir un effet à long terme sur les espèces touchées.

Intervention en cas de déversement d'hydrocarbures

3.1 Planification et intervention d'urgence en cas de déversement d'hydrocarbures

Les décisions et les mesures prises suite à un déversement tiennent compte de nombreux facteurs, notamment des informations biologiques, économiques, logistiques et physiques (p. ex., les vents et les marées). En général, une intervention suit une série de processus de notification et de décision déjà établis dans un plan d'urgence en cas de déversement d'hydrocarbures. Un large éventail de plans d'urgence a été élaboré pour certaines régions au Canada, comme le port de Vancouver, ou pour des situations données, comme le forage exploratoire dans la mer de Beaufort. Ces plans sont basés sur l'expérience acquise lors de déversements antérieurs et sur le rassemblement des connaissances et de l'information pertinentes pour une région ou une opération particulière (Owens, 1977e).

Un plan d'urgence en cas de déversement d'hydrocarbures est essentiellement un document qui définit les procédures de compte rendu et les responsabilités opérationnelles d'une organisation responsable du nettoyage après un déversement. Le champ d'application de ces plans peut aller du simple plan prévu pour de petites installations, comme un port ou un terminal pétrolier, à des plans qui définissent la responsabilité gouvernementale aux niveaux international, national ou provincial. Le plan contient généralement un cadre organisationnel et méthodologique qui définit les responsabilités et les affectations de chacun et établit une chaîne de commandement. Un système de compte rendu et de communications est nécessaire pour assurer la coordination des différentes phases d'une intervention. La plupart des plans suivent une version du système de commandement en cas d'incident [Incident Command System (ICS)] pour l'organisation d'une équipe d'intervention (Roland et Cameron, 1991; Spitzer, 1992; Hunter, 1993). L'ICS répartit les principaux groupes de fonction en commandement, planification, opérations, logistique et finances (figure 69).

De nombreux plans vont encore plus loin et contiennent des recommandations concernant les décisions et les mesures d'intervention. Les guides de décision (p. ex., figure 70) aident le coordonnateur sur place et son personnel à choisir les activités appropriées. Dans certains cas, les sources et les déplacements possibles d'un déversement sont étudiés et les priorités en matière d'intervention visant à protéger les ressources menacées peuvent être déterminées dans le cadre du processus de planification (*cf.* sous-section 3.2). Les données logistiques, comme l'emplacement des pistes d'aviation et des postes de mise à l'eau des embarcations, ainsi que l'emplacement de l'équipement ou autres ressources requises peuvent être présentées sous forme de tableaux ou cartographiées dans le cadre du processus de préplanification. On dispose rarement du temps ou du personnel suffisant pour rassembler ce genre d'information au moment d'un déversement, c'est pourquoi l'efficacité et l'efficience des décisions et des mesures d'intervention dépendent

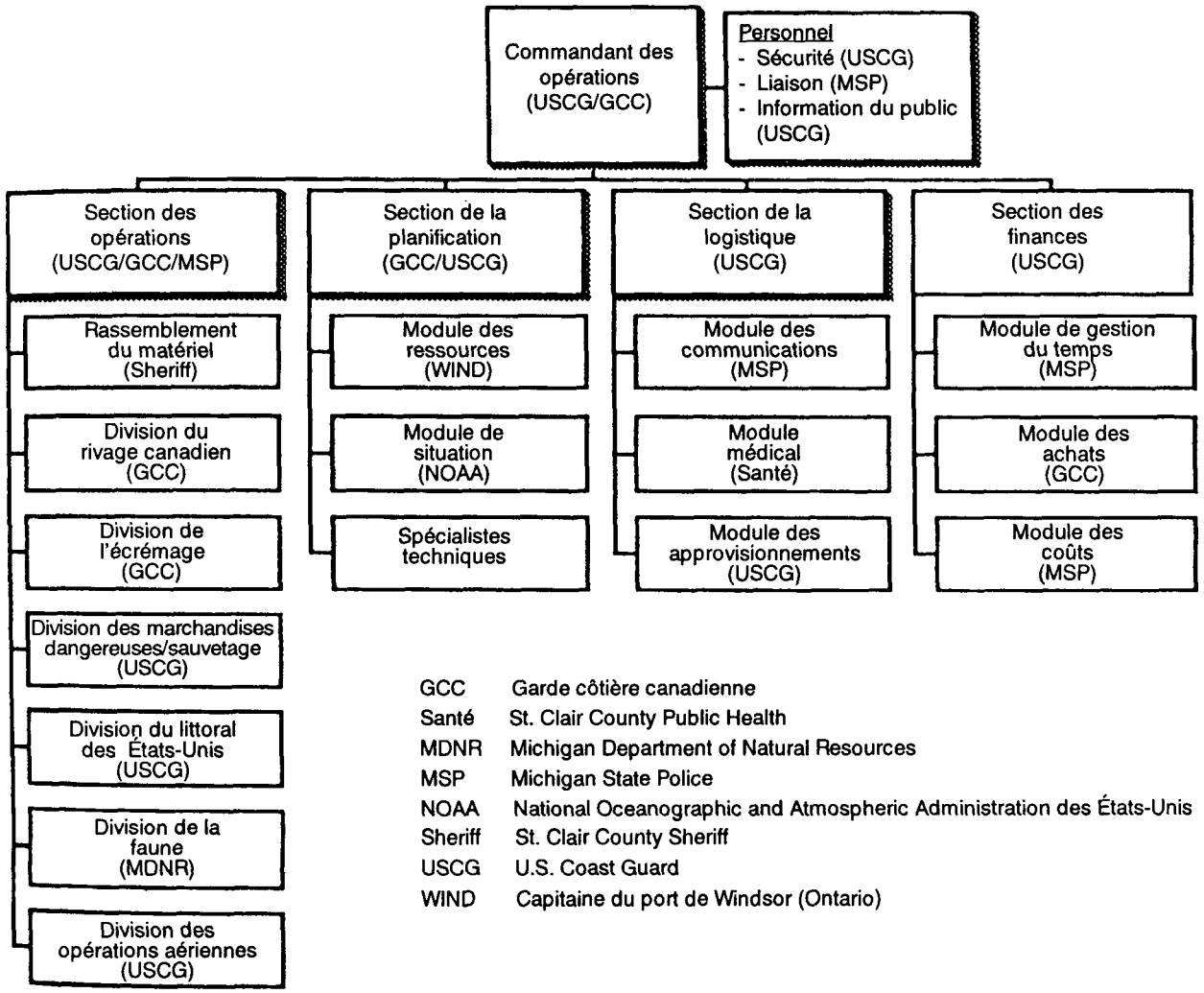


Figure 69 **Organisation des opérations d'intervention du CANUSLAK** (avec mention de l'organisme dont relèvent les postes de chef et de sous-chef) (extrait de Spitzer, 1992)

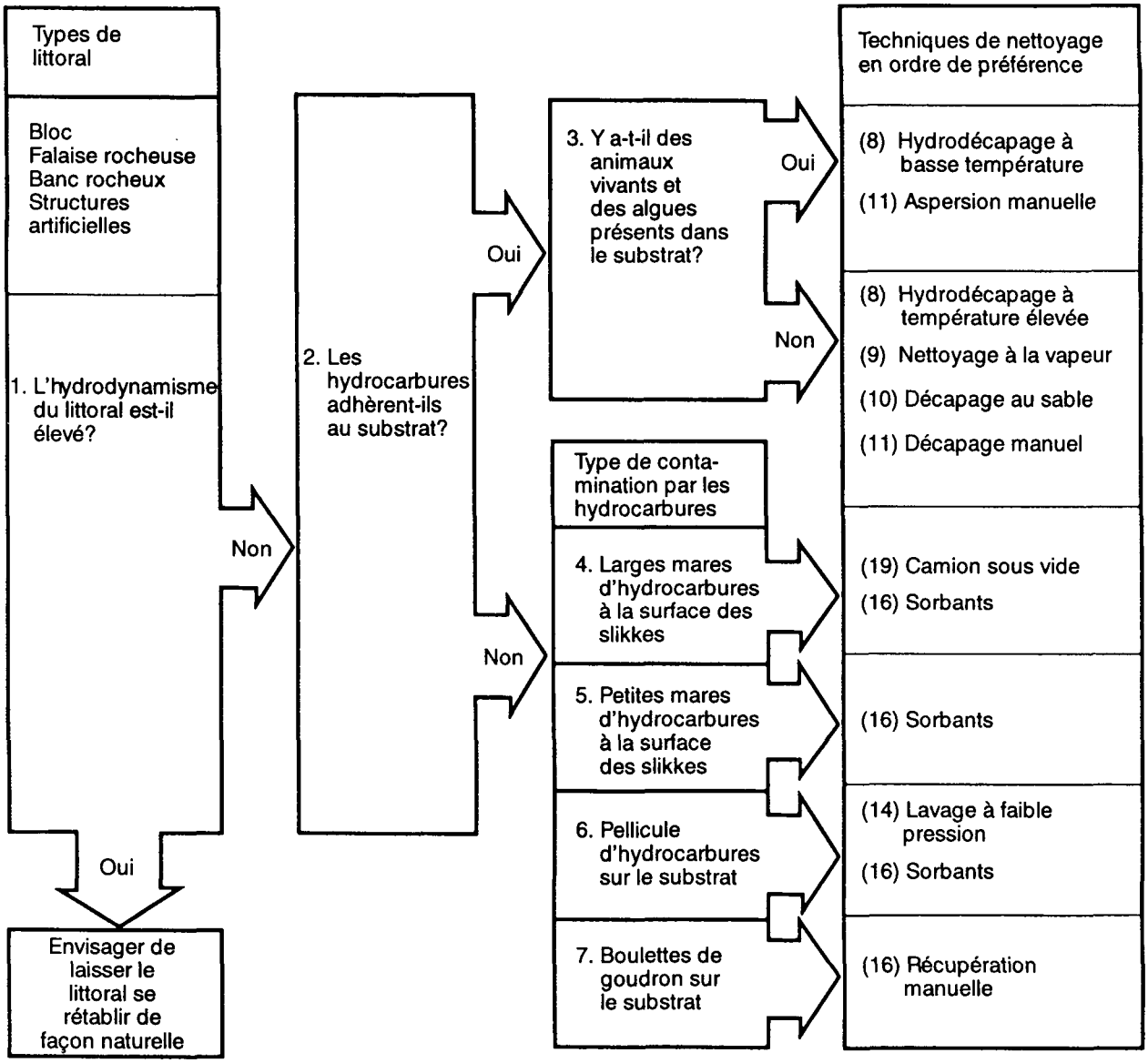


Figure 70 **Exemple d'un guide de décision pour le nettoyage d'un littoral** (les chiffres entre parenthèses indiquent le numéro de la section du manuel)
(Foget *et al.*, 1979)

souvent de la qualité de l'information que l'on possède déjà. Une grande partie de ces données et de ces informations peuvent être emmagasinées dans des ordinateurs portatifs pour être extraites à tout moment, et elles sont faciles à mettre à jour régulièrement. Il convient également de savoir quoi faire des hydrocarbures ou des matériaux mazoutés qui ont été recueillis au cours des activités de nettoyage. La localisation de sites d'élimination temporaires ou permanents peut constituer une partie importante de cette planification.

Au moment d'un déversement, le plan d'urgence sert à définir le cadre des opérations d'intervention. Dans la plupart des cas, il sera nécessaire d'élaborer des plans opérationnels propres au site, étant donné que chaque déversement possède ses propres caractéristiques. On élabore un plan de protection si l'on dispose d'une période de temps suffisante pour déployer les ressources disponibles. Un plan de nettoyage et de traitement du littoral définit les objectifs, l'échelle et les méthodes de traitement des hydrocarbures sur le rivage. Un plan de gestion des déchets est nécessaire pour savoir quoi faire des matériaux mazoutés et non mazoutés produits par les opérations d'intervention.

La question de la planification d'urgence et des décisions d'intervention en cas de déversement a fait l'objet d'une attention considérable, mais le lecteur ne pourra trouver que dans quelques publications un sommaire complet ou utile de cette question. Environnement Canada (Fingas *et al.*, 1979) a produit une étude générale, mais informative, du nettoyage du littoral dans le sud du Canada. L'Organisation maritime internationale (OMI) des Nations Unies (1988b) et l'International Tanker Owners Pollution Federation (ITOPF) (1987) présentent des études détaillées du problème des déversements en milieu marin et des mesures d'intervention. L'OMI (1988a) fournit un ensemble de lignes directrices de base pour l'établissement d'une organisation d'intervention et l'élaboration de plans aux niveaux local et national. L'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis a publié un ensemble de manuels détaillés et de guides de décisions qui portent particulièrement sur les techniques de protection et de nettoyage du littoral (Foget *et al.*, 1979), les marais salés (Maiero *et al.*, 1978), l'utilisation d'agents de traitement chimiques (Castle *et al.*, 1982) et les déversements dans les régions de climat froid (Deslauriers *et al.*, 1982). Une étude pilote a été consacrée à l'élaboration de cartes d'intervention pour le sud de l'île de Vancouver (Owens, 1981) et ces cartes ont été à la base des projets subséquents de cartographie du littoral sur les côtes de l'Atlantique et de l'Arctique. De plus, il existe de nombreux rapports et documents sur différentes composantes des activités d'intervention en cas de déversement, comme l'atténuation des incidences écologiques (API, 1985); la protection et le nettoyage du littoral (CONCAWE, 1981; ITOPF, 1987; Owens *et al.*, 1992); l'utilisation de dispersants (Environnement Canada, 1984); les écrémeurs (Solsberg, 1983); les barrages (S.L. Ross Ltd., 1986); la gestion des déchets (Marty *et al.*, 1993) et les techniques d'élimination (van Oudenhoven *et al.*, 1980). Des études de ce genre, tout comme le présent rapport, sont des exemples du type d'informations qui pourraient être utilisées lors de l'élaboration d'un plan de mesures d'urgence ou d'un manuel d'intervention. Le compte rendu de la Conférence semestrielle sur les déversements d'hydrocarbures (parrainée par l'American Petroleum Institute) et le Colloque technique annuel de l'AMOP (Programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures en mer et dans l'Arctique)

(parrainé par Environnement Canada) sont deux précieuses sources d'information en ce qui a trait aux interventions en cas de déversement.

3.2 *Priorités en matière d'intervention*

Si nous voulons nous préparer en vue d'un déversement d'hydrocarbures en milieu côtier, nous protéger contre une telle éventualité ou nettoyer les dégâts, nous ne pourrons garantir l'efficacité de la planification et des interventions efficaces en cas de déversement que si nous disposons d'une méthode d'évaluation des effets d'un tel déversement sur les importantes ressources côtières. Il est souvent impossible de protéger ou de nettoyer toutes les sections d'une côte touchée ou menacée. La planification devrait se concentrer sur les ressources disponibles aux endroits où elles seront le plus efficaces pour prévenir ou minimiser les dommages possibles. Le processus de l'évaluation de la vulnérabilité ou de la sensibilité de la zone côtière et l'élaboration d'opérations d'intervention efficaces recommandées donnent généralement lieu à l'établissement de priorités en matière d'intervention. L'évaluation de la menace et des incidences possibles doit être basée sur les données actuelles, précises et locales relatives aux ressources physiques, biologiques, culturelles ou d'utilisation humaine ainsi que sur la sensibilité et la vulnérabilité* de ces ressources vis-à-vis d'un déversement d'hydrocarbures.

La zone côtière est un milieu dynamique en termes d'activités physiques, biologiques et humaines dont un grand nombre sont imprévisibles (p. ex., le moment exact de l'arrivée des oiseaux migrateurs dans les marais côtiers). Il est donc impossible de prévoir tous les aspects d'une situation de déversement étant donné que seuls certains types de données et d'informations peuvent être rassemblées et évaluées à l'avance (tableau 11). Les effets probables d'un déversement sont envisagés lors de l'élaboration des priorités en matière d'intervention.

À l'exception de rares cas localisés, il est impossible de prévoir les incidences d'un déversement, aussi les plans devraient être souples afin de permettre de prendre les décisions appropriées au moment d'un déversement.

De nombreux modèles ont été mis au point pour établir le rang ou l'indice de sensibilité ou de vulnérabilité du littoral utilisé lors de la définition des priorités en matière d'intervention. Les thèmes communs qui lient les personnes de terrain aux décisionnaires, qu'il s'agisse des gestionnaires environnementaux ou des coordonnateurs sur place, sont les suivants :

- une certaine souplesse pour tenir compte de la variabilité temporelle et spatiale relativement à l'abondance, la taille, la distribution et l'activité des ressources côtières vulnérables ou menacées;

- la prise en considération de la valeur écologique ou humaine réelle, ainsi que perçue, de la ressource;

- l'attribution d'une valeur ou d'une priorité d'importance à chaque ressource à un moment ou à un endroit particulier (Robilliard *et al.*, 1983; Dickins *et al.*, 1987, 1990a,b).

---

* Les termes vulnérabilité et sensibilité sont souvent utilisés comme synonymes, mais ont une signification très différente : «vulnérabilité» signifie la probabilité qu'une ressource sera touchée par un déversement d'hydrocarbures alors que «sensibilité» est la réponse ou la réaction d'une ressource au contact des hydrocarbures ou en présence de ceux-ci.

Tableau 11 Exemple des exigences en matière d'information et de données pour les activités de nettoyage (extrait d'Owens, 1981)

Études préliminaires au déversement

Facteurs du déversement
- Nature du danger potentiel
- Type probable des hydrocarbures
- Volume maximal déversé

Facteurs physiques
- Caractère du littoral
  - sédiments, morphologie
  - cycles de la plage
  - caractère de l'arrière-plage
  - caractère de l'avant-plage
- Processus littoraux
  - vents, vagues, marées, courants
  - régime des vagues, fréquence des tempêtes
  - cycles des glaces

Facteurs biologiques
- Rapports espèce/habitat
  - cycles de reproduction/d'alimentation/de mue
  - régimes de résidence ou de migration
- Paramètres des populations
  - abondance et cycles
- Espèces rares ou en danger de disparition
  - distribution, abondance et cycles d'activité
- Réserves ou zones protégées
  - emplacement, espèces

Facteurs humains
- Activités commerciales ou récréatives
  - distribution et caractère de l'activité
  - moment de l'année où se déroule l'activité
  - niveau d'activité économique/main-d'oeuvre

Facteurs environnementaux
- Caractère du littoral et capacité portante des sédiments
- Bathymétrie de l'avant-plage
- Morphologie de l'arrière-plage
- Hydrodynamisme faible (zones d'accumulation possible des hydrocarbures)

Facteurs logistiques
- Accès au littoral
- Propriété de la zone littorale
- Distance par rapport aux bases logistiques (terrains d'aviation, quais, etc.)
- Sites d'élimination approuvés
- Zones appropriées pour le rassemblement temporaire du matériel
- Emplacement approprié pour l'établissement d'un poste de commandement
- Ressources en personnel
- Ressources en équipement

Contraintes tactiques
- Géologiques
- Biologiques
- Activités humaines
- Ressources culturelles

Levés en temps réel du déversement

Facteurs du déversement
- Volume des hydrocarbures
- Type d'hydrocarbure
- Caractéristiques physiques et chimiques des hydrocarbures
- Emplacement des hydrocarbures
- Trajectoire du déversement (s'il a lieu dans l'eau)

Facteurs physiques
- Conditions météorologiques
- Conditions océanographiques
- Régimes et pronostic des conditions atmosphériques régionales
- Étape du cycle de la plage

Facteurs biologiques
- Distribution et abondance de l'espèce
- Étape des cycles biologiques (reproduction, mue, etc.)
- Emplacement des espèces mobiles ou migratoires

Facteurs humains
- Activités commerciales réelles
- Activités récréatives réelles
- Perturbations possibles des espèces commerciales/récréatives qui se trouvent dans la zone en question ou qui y pénètrent
- Danger possible pour la sécurité ou la santé du public

Facteurs du déversement
- Emplacement des hydrocarbures
- Caractéristiques des hydrocarbures
- Profondeur de pénétration des hydrocarbures
- Épaisseur des hydrocarbures

Facteurs environnementaux
- Température de l'air
- Vents et vagues
- Courants littoraux
- Moments et hauteurs prévus de la marée
- Indice de résistance à la pénétration
- Distribution des débris ou des billes

Facteurs logistiques
- Autorisation d'accès
- Disponibilité du soutien des communications
- Disponibilité des ressources en main-d'oeuvre et en équipement

Contraintes tactiques
- Océanographiques
- Météorologiques

3.2.1 Indices de sensibilité du littoral

Les indices de sensibilité des littoraux vis-à-vis des déversements d'hydrocarbures ont évolué considérablement depuis qu'on a proposé un rapport de base entre le type de littoral, la persistance des hydrocarbures et la sensibilité biologique (figure 71). Le rapport entre l'hydrodynamisme du littoral et la persistance des hydrocarbures échoués a été reconnue dès le début (Owens, 1977a, 1978) et n'a guère changé au fil des ans (Owens, 1985). Ce type d'indice de persistance est précieux lorsqu'on se préoccupe du temps de séjour des hydrocarbures (p. ex., Tsouk *et al.*, 1985). Cette approche initiale a été élargie par Michel *et al.* (1978) à dix types de littoraux, ces auteurs ont également tenu compte de la persistance physique des hydrocarbures dans chaque milieu en l'absence de mesures de nettoyage. Gundlach *et al.* (1980) ont incorporé d'importantes ressources biologiques sensibles, comme les oiseaux et les mammifères marins, dans l'indice de vulnérabilité de Gundlach et Hayes (1978) qu'ils ont rebaptisé «indice de sensibilité environnementale».

Ces premières tentatives étaient trompeuses étant donné que l'accent était mis sur le type de littoral comme facteur déterminant de la sensibilité. La connaissance du seul caractère du littoral est insuffisante pour évaluer les effets d'un déversement. On s'est rendu compte par la suite que les activités humaines devaient être incluses dans l'évaluation et que, par exemple, certaines zones de plages de sable pouvaient recevoir le même indice de sensibilité que certaines zones marécageuses. De même, un endroit peut être une zone de ressources clés pendant seulement une courte période de l'année. Voici trois questions importantes pour l'évaluation des dommages possibles dont on n'a pas tenu compte lors de l'établissement de ces indices :

- Où se trouvent les ressources qui pourraient être menacées?
- À quels moments de l'année seraient-elles vulnérables?
- Quelle est la nature de la menace?

L'inclusion de la saisonnalité et la référence à des activités biologiques ou humaines données ont fait des simples indices originaux une évaluation plus complexe mais plus réaliste de ce qui pourrait arriver dans le cas de déversements de différents types d'hydrocarbures à différents moments de l'année.

Foget *et al.* (1979) ont présenté un indice de sensibilité, modification de l'indice de Michel *et al.* (1978) d'après :

- le type d'hydrocarbure;
- la pénétration et l'enfouissement des hydrocarbures;
- l'hydrodynamisme du littoral;
- la température ambiante;
- la persistance prévue des hydrocarbures;
- la sensibilité biologique.

La sensibilité biologique était une évaluation subjective basée sur les taux de décès prévus des principales espèces, la recolonisation prévue par les espèces écologiquement dominantes et la vitesse globale de rétablissement de la communauté. Ces auteurs ont ensuite élaboré une matrice de classement de la sensibilité basée sur dix types de littoraux et quatre niveaux relatifs de sensibilité et types d'hydrocarbures.

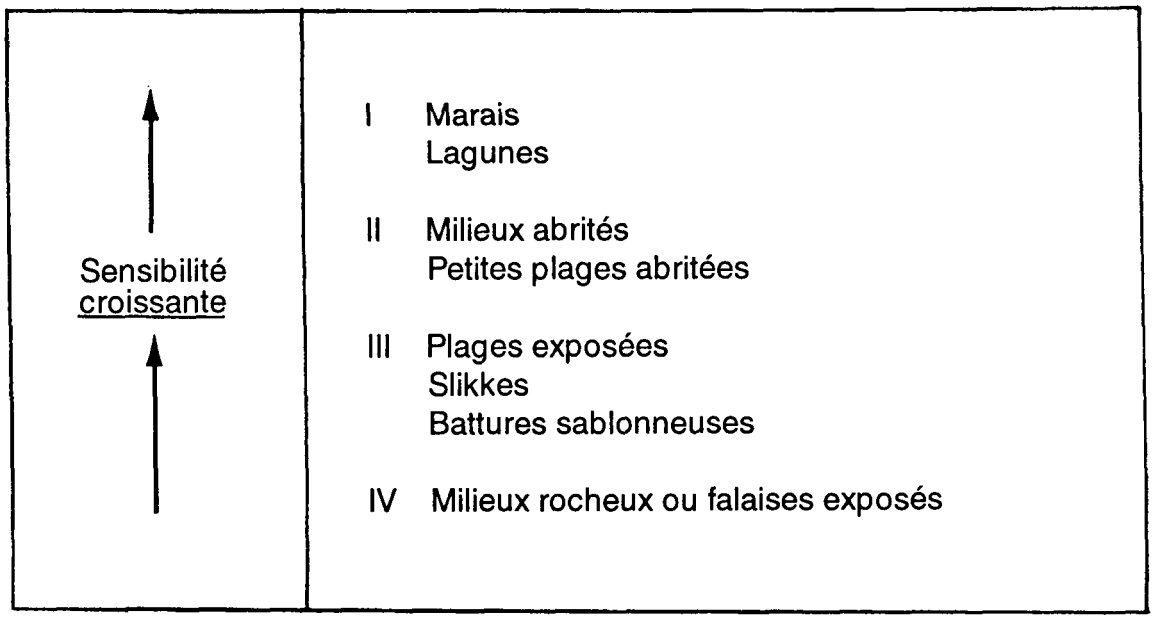


Figure 71 **Exemple d'une approche précoce de sensibilité du littoral** (extrait d'Owens, 1977a)

Robilliard *et al.* (1980) ont décrit une combinaison d'indices de vulnérabilité et de sensibilité du littoral en termes :

- de potentiel de mazoutage, de caractéristiques physiques et de persistance des hydrocarbures;
- de processus physiques (c.-à-d. les courants, la météorologie) au moment du déversement;
- de biologie;
- de géologie et de sédiments;
- d'utilisation humaine de la région;
- de contraintes opérationnelles (logistique, rendement de l'équipement, faisabilité et efficacité des mesures d'intervention);
- d'effets du nettoyage.

Les deux derniers *critères* ont été élaborés principalement pour aider les gestionnaires des opérations préoccupés par la faisabilité des mesures d'intervention en matière de protection contre les déversements d'hydrocarbures ou de nettoyage, ainsi que les gestionnaires environnementaux préoccupés par les incidences possibles de ces interventions.

Lors de l'élaboration des indices, l'évaluation des effets possibles d'un déversement risque de donner lieu à un ensemble de critères ou de formules complexes et peu pratiques. Dans un cas, l'élaboration d'un programme informatique convivial a permis de combiner un grand nombre de variables dans le processus décisionnel pour l'utilisation des dispersants (Trudel et Ross, 1987). Cette approche pourrait être adoptée pour les décisions relatives aux priorités en matière d'intervention. Le produit final d'une évaluation doit être une échelle ou un

ensemble de priorités relativement simples, faciles à comprendre et, au besoin, faciles à modifier au moment d'un incident. Une approche qui a été beaucoup utilisée au Canada (Owens, 1981) définit les effets du déversement en termes de nécessité d'une intervention (tableau 12). Dans le cas d'une *priorité absolue*, il ne fait aucun doute qu'une intervention s'impose. De tels cas sont rares, mais ils existent, comme dans le cas où des prises d'eau ou des réserves d'eau potable sont vulnérables. À l'extrémité opposée de l'échelle se trouvent les sections de la côte où les incidences d'un déversement seraient minimes, la côte est presque inaccessible ou le nettoyage naturel peut être efficace dans une période de temps acceptable. Entre ces deux extrêmes, il existe toute une gamme de situations qui peuvent être groupées en une catégorie nécessitant une intervention, et une autre catégorie pour laquelle des mesures ne sont prises que si elles sont nécessaires ou s'il y a suffisamment de ressources.

En guise d'exemple de l'application de cette approche, le tableau 13 présente les définitions de niveaux d'intérêt utilisés pour établir les priorités en matière d'intervention pour une section de la côte atlantique du Canada. De façon plus particulière, ces niveaux d'intérêt sont définis en termes d'effets potentiels sur les activités humaines (tableau 14) et en termes de facteurs biologiques (tableau 15). Un exemple de l'élément saisonnier de l'évaluation est donné à la figure 72 qui indique les secteurs préoccupants probables dans le cas d'un déversement sur une section de 100 km de côte. Dans cette étude, le caractère physique de la zone littorale et l'emplacement des zones ou des ressources définies comme étant d'intérêt primaire ou secondaire figurent sur une série de cartes.

Un aspect important du processus décisionnel consiste à définir l'efficacité probable des activités de protection. Une ressource ou une activité importante et très vulnérable peut être menacée, mais s'il est probable que les opérations d'intervention proposées ne réussissent pas à protéger cette ressource ou cette activité, il convient alors de songer à utiliser des ressources pour protéger une autre ressource ou une autre activité (moins prioritaire) dans un secteur où l'intervention peut se révéler efficace.

Tableau 12 Priorités en matière d'intervention basées sur les incidences du déversement

ABSOLUE Danger pour la santé ou la sécurité des humains
PRIMAIRE Intervention nécessaire pour tous les types de déversement, à tout moment de l'année
SECONDAIRE Intervention probablement nécessaire à certains moments de l'année
TERTIAIRE Intervention probablement pas nécessaire

Tableau 13 Niveaux d'intérêt relativement aux opérations d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures (extrait d'Owens, 1981)

Intérêt primaire Intervention nécessaire pour tous les types de déversement, à tout moment de l'année
Intérêt primaire (saisonnier) Intervention nécessaire pour tous les types de déversement, à certains moments de l'année seulement
Intérêt secondaire Intervention probablement nécessaire à certains moments de l'année
Intérêt tertiaire Aucune perturbation grave connue des activités biologiques ou humaines; intervention probablement pas nécessaire

Il n'existe pas de méthode ou de modèle universel d'élaboration de priorités en matière d'intervention. Il est préférable, pour un secteur donné, de faire des évaluations individuelles qui répondent aux besoins des utilisateurs et qui tiennent compte des facteurs environnementaux locaux. La valeur des conseils ou des recommandations concernant les priorités en matière d'intervention à l'intention d'un décisionnaire est basée sur le fait que l'approche ainsi élaborée est réaliste et pratique et se fait à une échelle appropriée.

3.3 Logistique et contraintes opérationnelles

Le Canada est un immense pays où de vastes régions entières ne sont presque pas peuplées. Les communications et les installations de transport dans la zone côtière se limitent au sud de la Colombie-Britannique, de l'Ontario et du Québec ainsi qu'aux provinces maritimes. Un élément majeur de la plupart des plans d'intervention doit donc porter sur la logistique et sur les aspects opérationnels ainsi que sur la disponibilité des ressources humaines et matérielles pour l'application des mesures d'intervention désirées. À titre d'exemple, une série d'atlas d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures (Dickins *et al.*, 1987, 1990a, b) indique, à l'aide de symboles sur chaque carte, l'emplacement de tous les terrains d'aviation existants et la longueur approximative de la piste. Cet exemple souligne également l'importance de tenir compte de la variabilité saisonnière des conditions d'opération étant donné que les symboles font la distinction entre l'accès en hiver et en été en indiquant où les pistes de glace ont été utilisées régulièrement par le passé.

On peut s'attendre à des difficultés opérationnelles dans de nombreuses sections des côtes canadiennes soit en raison de l'état

Tableau 14 Exemple de niveaux d'intérêt en termes d'activités humaines

Intérêt primaire · la présence d'hydrocarbures aurait un effet sur les activités commerciales ou de survie d'une grande partie de la population ou causerait un stress économique à la collectivité (>1 000 habitants) ou · les débarquements de poissons commerciaux sont supérieurs à 1 000 tonnes annuellement ou · la présence d'hydrocarbures pourrait entraîner une perte de valeur d'agrément (récréatif ou esthétique) à la collectivité (>1 000 habitants) ou · la présence d'hydrocarbures menacerait un parc national, un site historique national ou un point d'intérêt semblable de grande importance culturelle ou nationale
Intérêt primaire (saisonnier) · n'importe lequel ou tous les intérêts primaires susmentionnés qui se présenteraient pendant une certaine partie de l'année seulement · aux moments de l'année où il n'existe pas de danger possible, le niveau d'intérêt deviendrait secondaire ou tertiaire
Intérêt secondaire · la présence d'hydrocarbures aurait un effet sur les activités commerciales ou de subsistance des collectivités comptant jusqu'à 1 000 habitants ou causerait un stress économique ou · les débarquements de poissons commerciaux atteignent $1\ 000 \times 10^6$ tonnes annuellement ou · des plages et des parcs publics provinciaux ou autres seraient touchés par les hydrocarbures dans la zone littorale · aux moments de l'année où il n'y a pas de danger possible, le niveau d'intérêt deviendrait tertiaire
Intérêt tertiaire · la présence d'hydrocarbures ne devrait pas menacer *a*) la vie, la santé ou la sécurité des personnes; *b*) le bien-être économique d'une collectivité adjacente en termes d'activités commerciales ou de subsistance ou *c*) la valeur d'agrément de la côte

Tableau 15 Exemple de niveaux d'intérêt en termes de facteurs biologiques

Intérêt primaire · un effet grave ou à long terme pour une grande partie des populations d'espèces concernées ou · le lieu ou la zone supporte un grand nombre d'espèces considérées comme importantes et reconnues comme étant touchées de facon néfaste par les hydrocarbures déversés ou · le lieu ou la zone est essentiel aux activités spécifiques, généralement l'alimentation, la reproduction ou le repos d'importantes populations d'espèces concernées ou · le lieu ou la zone est un habitat productif écologiquement important reconnu comme étant gravement touché par les hydrocarbures, par exemple un estuaire ou · le lieu ou la zone est utilisé par une espèce rare, menacée ou en danger de disparition, qui serait gravement touchée par la présence d'hydrocarbures ou · réserves de faune, zones protégées ou refuges d'oiseaux désignés
Intérêt primaire (saisonnier) · n'importe lequel ou tous les intérêts susmentionnés seraient valables pour une partie de l'année seulement · aux moments de l'année où il n'y a pas de danger possible, le niveau d'intérêt deviendrait secondaire ou tertiaire
Intérêt secondaire · effets mineurs ou à court terme, le cas échéant, sur une espèce ou un habitat concerné ou · le lieu ou la zone supporte de faibles populations d'une espèce sensible · le niveau d'intérêt deviendrait tertiaire les saisons durant lesquelles cette espèce est absente, non touchée, par conséquent, par la présence des hydrocarbures
Intérêt tertiaire · la présence d'hydrocarbures ne devrait pas avoir d'effet sur les populations d'une espèce concernée, même si certains individus pourraient être touchés · l'habitat ne devrait pas être gravement touché par la présence d'hydrocarbures

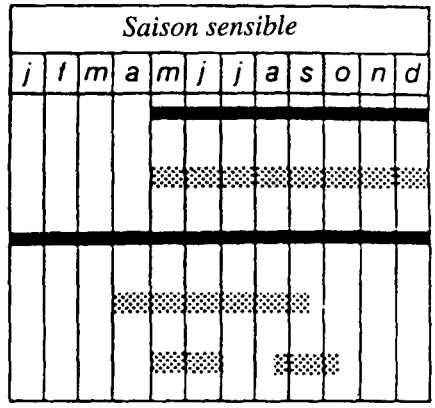
Activité de la zone littorale

i) activités portuaires - Fleur-de-Lys
- villages côtiers

ii) loisirs, esthétique - Baie-Verte

iii) oiseaux de mer présents

iv) saumon présent à l'embouchure du cours d'eau



Interprétation

i)
- les activités portuaires à Fleur-de-Lys et dans les villages côtiers pourraient être perturbées entre mai et décembre
- la perturbation possible des activités humaines à Fleur-de-Lys constitue un intérêt primaire (mais saisonnier) étant donné qu'il s'agit d'un important port de pêche avec 1 427 tonnes débarquées en 1980
- la perturbation possible dans les villages côtiers de Coachman's Cove et de Ming's Bight constitue un intérêt secondaire étant donné qu'il s'agit de collectivités de pêche, mais les activités y sont moins importantes qu'à Fleur-de-Lys

ii)
- Baie-Verte est une grande collectivité (population de 2 528) et les incidences possibles en termes de valeur d'agrément du littoral (loisirs et esthétique) sont de première importance tout au long de l'année

iii)
- les oiseaux de mer reproducteurs, principalement les petits pingouins, sont présents dans l'île Tin Pot d'avril à la mi-septembre; étant donné que cette colonie n'est pas importante, l'intérêt est considéré comme étant secondaire

iv)
- le saumon passe dans la zone côtière par le ruisseau South West durant les périodes de mai à juin et de la mi-août à la mi-octobre; c'est l'un des nombreux cours d'eau à saumon de la région et l'intérêt possible est secondaire

Figure 72 **Exemple d'une description de sensibilité saisonnière** (les lignes horizontales en caractère gras représentent les intérêts primaires, les lignes ombrées représentent les intérêts secondaires)

de la mer, particulièrement sur le littoral même dans la zone de déferlement, soit en raison de la présence de glace à la surface de la mer ou sur la zone littorale. Il est donc important d'inclure des données environnementales pertinentes (figure 73) à la fois pour élaborer et planifier des options viables et pour mettre en application les mesures d'intervention choisies, dans des zones différentes et à différents moments de l'année. Lors de l'incident du *Nestucca*, les opérations au large de la côte ouest de l'île de Vancouver au milieu de l'hiver (janvier-février) ont été limitées par deux facteurs opérationnels clés : les conditions des vents et des vagues qui influaient sur les déplacements des embarcations et des hélicoptères dans la zone côtière d'une part et la rareté des dépôts de carburant pour les hélicoptères d'autre part. La sécurité est primordiale lors des opérations sur le terrain.

Une grande partie des côtes du Canada est caractérisée par un relief accidenté d'affleurements de la roche en place, d'où les difficultés d'accès direct au littoral dans ces régions. L'accès devrait être considéré à deux niveaux tout à fait différents : le déplacement du personnel, de l'équipement et du matériel dans la zone du déversement; et le transport de ces ressources sur la zone littorale à nettoyer ou à traiter. Lors des incidents de l'*Arrow* et du *Kurdistan* en Nouvelle-Écosse, l'accès à la zone littorale a fréquemment constitué un problème et il est souvent arrivé que les dommages les plus importants causés à l'environnement n'étaient pas attribuables aux hydrocarbures ni au nettoyage, mais à la construction de routes d'accès temporaires et au débroussaillement de l'arrière-plage (Taylor et Frobel, 1985b)

Les grumes constituent un facteur important dans bien des sections de la côte, particulièrement en Colombie-Britannique et dans la mer de Beaufort. Les grandes accumulations de ces grumes à la laisse de haute mer ou à proximité (figure 74) peuvent empêcher ou gêner l'accès à la zone intertidale et causer des difficultés considérables pour le nettoyage. Levine (1987) décrit une opération récente faite dans le détroit de Juan de Fuca, après le déversement de l'*Arco Anchorage*, qui mettait en cause des grumes mazoutées à la surface de l'eau. Les débris peuvent également constituer un problème dans les zones urbaines, car l'élimination des débris mazoutés demande un effort considérable.

Les contraintes environnementales peuvent limiter les opérations sur le terrain afin d'éviter de perturber inutilement les espèces qui n'ont pas été touchées par un déversement. Il existait de nombreuses contraintes lors des interventions suite au déversement de l'*Exxon Valdez* afin d'éviter de perturber les pygargues à tête blanche, la mise-bas et la mue des pinnipèdes, la fraie du saumon et du hareng, etc. (figure 75). L'examen du calendrier des diverses activités écologiques ou axées sur les ressources a permis de sélectionner une série de conjectures favorables à l'échelonnement des opérations sur le terrain (Teal, 1991). Les contraintes écologiques ou culturelles propres à chaque site, imposées aux opérations d'intervention, peuvent être élaborées dans le cadre du processus TERR (Technique d'évaluation pour la restauration des rives) (sous-section 3.4) et selon la description donnée dans Environnement Canada (1992).

3.4 Collecte des données et documentation sur les littoraux mazoutés

Il est souvent difficile d'obtenir des informations précises sur les conditions du

Données climatiques à des fins de logistique **Pointe Shingle**

Figure 1 Température de l'air

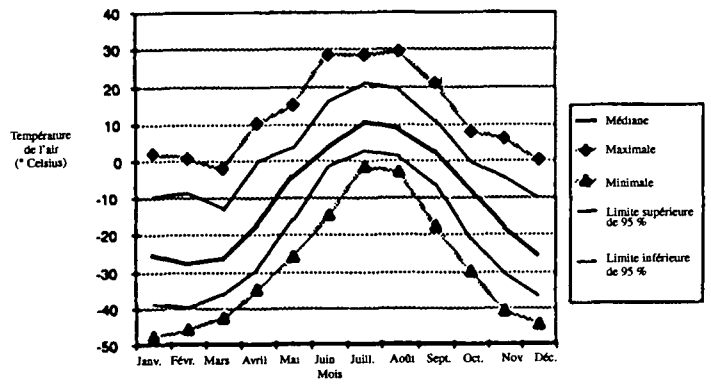


Figure 3 Fréquence de beau temps

Visibilité supérieure à 2 milles et vents inférieurs à 25 noeuds

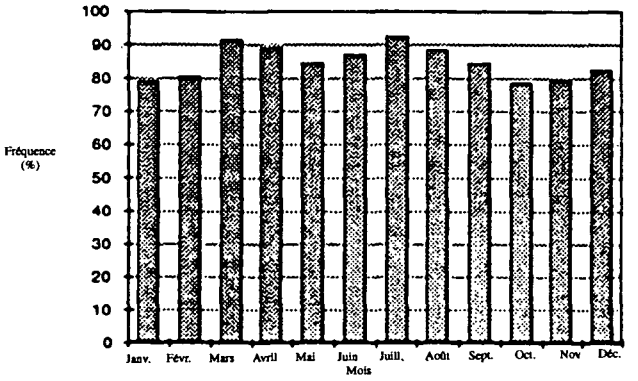


Figure 2 Fréquence des classes de refroidissement éolien

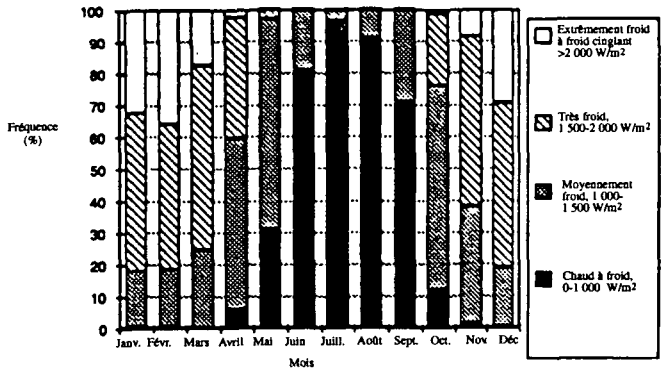


Figure 4 Fréquence de temps propice au vol

Règles de vol à vue, plafond >1 000 pieds et visibilité >2,5 milles

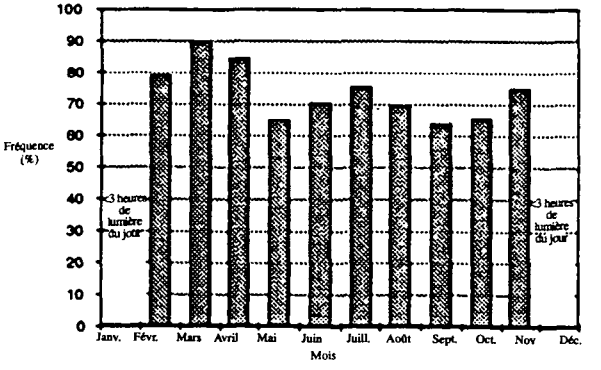


Figure 73 **Exemple de données environnementales** (extrait de Dickins *et al.*, 1987)

Figure 74 **Accumulation de grumes au-dessus de la laisse de haute mer à Long Beach, ouest de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique** (décembre 1976)

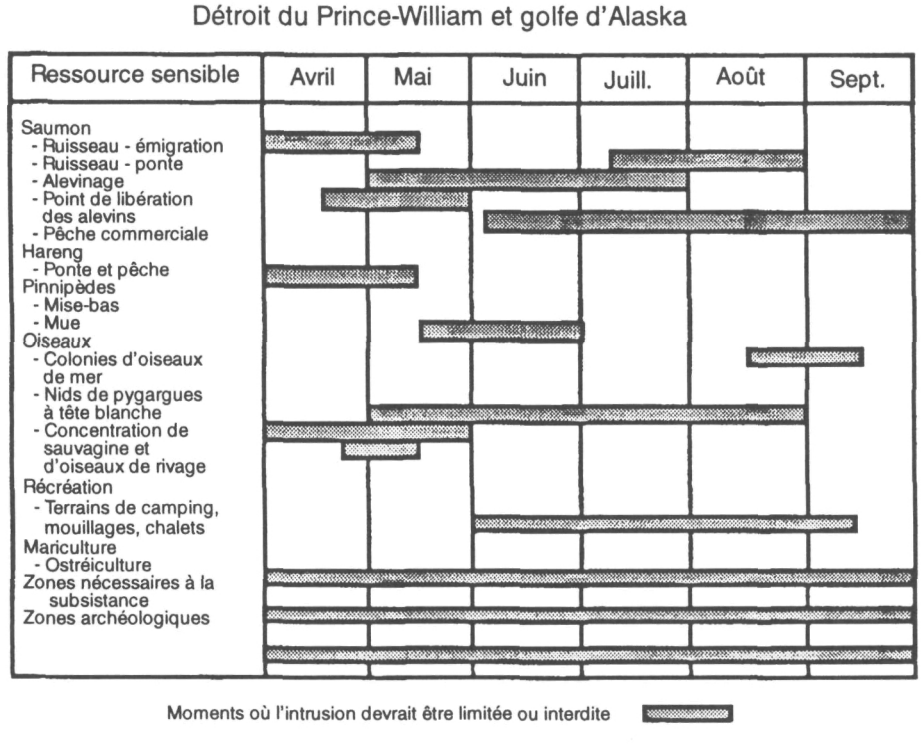


Figure 75 **Contraintes environnementales et culturelles sur les opérations sur le terrain**

littoral mazouté sur les lieux d'un déversement. Il se peut que les rapports sur le terrain ne fournissent pas des informations cohérentes suffisantes et normalisées. Le concept de la TERR a été conçu lors des déversements du Nestucca et de l'*Exxon Valdez* afin de résoudre le problème de la collecte des données.

Le programme TERR est une méthode systématique et complète de collecte des données qui peut être utilisée en cas de déversement d'hydrocarbures pour une évaluation en temps réel des conditions de mazoutage du littoral. Les levés effectués sur le littoral peuvent fournir une évaluation détaillée des hydrocarbures échoués, des caractéristiques géomorphologiques et des ressources environnementales ainsi que de l'utilisation humaine et des sensibilités culturelles le long des littoraux touchés en faisant appel à des procédures, une terminologie et des définitions normalisées. Ces données en temps réel peuvent ensuite être utilisées par le personnel responsable des opérations de nettoyage afin d'élaborer et de planifier des mesures d'intervention. Les décisions en matière de nettoyage du littoral prises à la suite du déversement de l'*Exxon Valdez* dépendaient en grande partie des rapports et de la base de données fournis par l'équipe TERR (Owens et Teal, 1990a,b; Owens, 1991a, b; Teal, 1990 et 1991). Cette information était essentielle pour répondre adéquatement aux besoins de communication, établir les priorités en matière de nettoyage, choisir les techniques de traitement appropriées, obtenir les autorisations du coordonnateur sur place et du propriétaire foncier, diriger les équipes de nettoyage, documenter les travaux et se tenir au courant de l'avancement des travaux.

Des formulaires ou des listes de vérification normalisés ont été utilisés durant de nombreuses années dans le cadre des programmes de formation (p. ex., Owens, 1979b) et ont été inclus dans les manuels d'intervention (p. ex., Foget *et al.*, 1979), mais n'ont pas été une caractéristique courante des mesures d'intervention en cas de déversement. On a tenté d'élaborer une approche plus systématique pour le rassemblement des données lors du déversement du *Nestucca*. Ce déversement relativement mineur a touché plus de 500 km de côte de la Colombie-Britannique en janvier 1989, et cette approche a été partiellement couronnée de succès (Owens, 1991a). Peu après, le déversement de l'*Exxon Valdez* a constitué un défi d'un tout autre ordre. En l'espace de quatre mois, les équipes sur le terrain ont fait des relevés systématiques sur plus de 5 500 km de côte pour documenter les conditions de mazoutage du littoral, les caractéristiques géologiques et écologiques du rivage et la présence de caractéristiques culturelles ou archéologiques (Owens et Teal, 1990a). À cette occasion, en 1989, le terme «Technique d'évaluation pour la restauration des rives» (TERR) a été retenu afin de décrire le processus de documentation. Au cours des années qui suivirent, les rives touchées par le déversement de l'*Exxon Valdez* ont fait l'objet de levés en plusieurs occasions et lors d'un de ces levés, 20 équipes ont étudié simultanément 2 000 km de littoral. La portée de cette opération a nécessité l'application d'un système normalisé simple.

Le processus a été raffiné depuis 1989 et une série de manuels ont été rédigés pour les côtes canadiennes (Colombie-Britannique - Environnement Canada, 1992; les Grands Lacs canadiens - Environnement Canada, 1992 et les provinces atlantiques - Environnement Canada, 1992) et contiennent une approche recommandée pour la documentation et un ensemble de termes et de définitions pour décrire les différentes caractéristiques dans la

documentation. Des exemples de formulaires TERR remplis dans le cadre des mesures d'intervention après le déversement de l'*Exxon Valdez* et autres levés sur le terrain sont présentés dans : Owens, 1990; Owens et Taylor, 1993 - **géologie/ mazoutage du littoral**; Stocker *et al.*, 1993 - **écologie du littoral**; Mobley *et al.*, 1990; Haggarty *et al.*, 1991 - **ressources culturelles**.

3.4.1 Objet du programme TERR (Technique d'évaluation pour la restauration des rives)

Le programme TERR vise à assurer plusieurs fonctions essentielles et peut :

- servir de **soutien technique** à l'organisme responsable des interventions en cas de déversement, au coordonnateur sur place ou aux opérations afin de les aider dans la prise de décisions, la planification et l'application des mesures d'intervention en cas de déversement;

- fournir **l'information et la documentation** nécessaires pour obtenir la contribution des organismes de réglementation et des propriétaires/gestionnaires fonciers;

- produire une **base de données** dans le but de faciliter la planification et la mise en oeuvre des opérations de traitement et de surveiller l'avancement des travaux.

Le soutien technique est fourni principalement sous forme de données sur les conditions de mazoutage du littoral, la géomorphologie, l'accessibilité ainsi que sur les contraintes d'ordre écologique, culturel et d'utilisations humaines. Ces données sont obtenues de façon systématique à partir de levés aériens ou au sol et sont résumées, souvent sous forme de cartes, afin d'être utilisées dans la planification et l'application des mesures d'intervention. Des levés vidéo aériens, des formulaires de documentation, des croquis et des recommandations en matière d'intervention sont particulièrement utiles lors du choix des techniques de traitement appropriées et des exigences opérationnelles et logistiques visant à mettre en application le programme d'intervention. Par exemple, les vidéocassettes peuvent être visionnées afin d'établir la nature précise du littoral, l'accessibilité aux embarcations et aux hélicoptères, l'exposition et les conditions générales de mazoutage. Les formulaires et les croquis définissent davantage les emplacements, le degré et le caractère du mazoutage et cernent les contraintes ou les problèmes. Les recommandations en matière d'intervention peuvent alors être examinées en termes de logistique disponible, de temps d'application, d'efficacité sur des littoraux semblables et d'autres facteurs afin d'établir les mesures d'intervention les plus appropriées et les plus efficaces. Cette information accroît l'efficacité globale de l'opération et réduit considérablement le risque de problèmes imprévus une fois que les équipes de traitement atteignent le littoral.

Un programme TERR facilite de deux façons l'apport des organismes de réglementation et à vocation autre. Premièrement, grâce à la participation possible des équipes de levés au sol, où les représentants de l'organisme peuvent participer à la documentation sur l'état des hydrocarbures et aux recommandations en matière de mesures d'intervention. Deuxièmement, par le biais du processus d'examen où des copies des levés d'évaluation du terrain faits par l'équipe TERR ainsi que des recommandations en matière d'intervention sont soumises aux agences de réglementation chargées de les examiner et d'y apporter leurs commentaires. L'équipe TERR n'est

cependant pas conçue comme organisme consultatif ou décisionnel en ce qui a trait aux questions de réglementation ou du mandat des autres organismes.

Le programme TERR permet d'obtenir un consensus qui facilite les autorisations nécessaires en vue du traitement. Les données sur le terrain peuvent être entrées dans une base de données et un système d'information géographique (SIG) permettra la production de statistiques et de cartes pour visualiser une variété d'informations, comme la distribution des hydrocarbures, l'emplacement et les limites des différents segments, les sensibilités du littoral, le nombre de kilomètres étudiés, le nombre de kilomètres traités, les activités de traitement par segment, la distribution des sédiments et l'exposition aux vagues. Ce type d'information s'est révélé essentiel lors de la planification, de la mise en oeuvre et de la surveillance des opérations d'intervention en cas de déversement majeur ou étendu.

3.4.2 Levés sur le terrain

Les levés d'évaluation au sol sont effectués sur des segments de littoral où se trouvent ou pourraient se trouver des hydrocarbures. Ces levés suivent un ordre de priorité établi en fonction des vols de reconnaissance et des levés vidéo aériens ainsi que d'atlas et de bases de données sur la sensibilité du littoral. L'évaluation au sol fournit des observations détaillées, systématiques et complètes en temps réel, utilisées pour choisir les techniques et procédés de traitement. Le programme d'évaluation au sol fait appel à un ensemble de formulaires, de termes et de définitions normalisés afin d'assurer un ensemble de données cohérentes entre chacun des segments et, lorsqu'il y a plusieurs équipes sur un même segment, entre ces équipes.

3.4.3 Termes et définitions normalisés

Un élément important du programme TERR consiste à décrire et à catégoriser de façon cohérente l'état des hydrocarbures (Owens et Taylor, 1993). D'autres termes et définitions géologiques et écologiques sont établis avant un levé sur le terrain et ceux-ci ne changent pas à l'intérieur d'un programme de levés, mais peuvent varier d'une région géographique à une autre.

À titre d'exemple, les descriptions de l'état des hydrocarbures de surface ou de subsurface ont été normalisées afin d'éviter les problèmes qui pourraient se présenter lors de l'utilisation de méthodes de levés différentes. Une approche échelonnée est utilisée pour permettre différents niveaux de détail, de façon à pouvoir documenter simplement **la superficie couverte par les hydrocarbures** [largeur de la zone mazoutée et distribution du pétrole (%)] ou, de façon plus détaillée, la **catégorie d'hydrocarbures de surface** (superficie couverte par le pétrole et épaisseur moyenne) ou la **catégorie d'hydrocarbures de subsurface** (profondeur de pénétration ou épaisseur des lentilles de pétrole et concentration relative des hydrocarbures). Tous les paramètres nécessaires pour les différents niveaux de documentation sont inclus dans le formulaire et peuvent être combinés afin d'obtenir le degré de détail désiré. Cette approche permet aux données provenant de levés différents faits à divers niveaux de détail d'être compatibles. Cette approche peut s'appliquer par exemple aux données provenant d'une reconnaissance au sol ou d'une reconnaissance aérienne (couverture des hydrocarbures de surface) ou d'un levé au sol plus détaillé (catégorie d'hydrocarbures de surface ou de subsurface).

3.5 Protection du littoral

La protection du littoral dans le milieu hauturier ou côtier vise à empêcher les hydrocarbures d'entrer en contact avec un littoral ou une zone sensible. La protection du milieu côtier permettra de minimiser l'effet des hydrocarbures qui viennent en contact avec un littoral ou une zone sensible.

La façon la plus efficace de protéger un littoral est de confiner et d'éliminer les hydrocarbures à la surface de l'eau avant qu'ils ne s'échouent sur le rivage. Dans un cas, soit le déversement du *Betelgeuse* dans la baie Bantry, dans le sud-ouest de l'Irlande, l'utilisation de dispersants déployés par la voie des airs a empêché la majeure partie des quelque 1 000 tonnes d'hydrocarbures déversés d'atteindre les littoraux adjacents (Nichols et White, 1979). Dans bien des cas cependant, il n'est pas conseillé d'appliquer des agents de dispersion dans les zones précôtières ou côtières étant donné que le mélange des hydrocarbures et de ces agents peut causer plus de dommages à la végétation, comme dans les marais, que les seuls hydrocarbures (Lane *et al.*, 1987). D'un point de vue pratique, il est préférable de récupérer les hydrocarbures en pleine mer plutôt que sur la côte étant donné qu'il est généralement difficile de confiner les hydrocarbures le long du littoral en raison de l'action des vagues (déferlantes) et des courants qui longent la côte. La récupération des hydrocarbures à la surface de l'eau coûte généralement beaucoup moins cher que les opérations de nettoyage sur le rivage. Les techniques utilisées pour confiner les marées noires en eau libre, dans les zones adjacentes du littoral, sont les mêmes que celles utilisées pour confiner les marées noires plus au large, mais les barrages flottants déployés dans la zone de déferlement sont généralement inefficaces en raison des vagues déferlantes.

Les mesures d'intervention visant à empêcher les hydrocarbures d'atteindre les sections vulnérables et sensibles du littoral peuvent comprendre le nettoyage sur l'eau, la dérivation et les techniques de protection sur le rivage (tableau 16). Le choix de la technique de protection appropriée pour une zone littorale ou aquatique dépend des facteurs suivants (extrait de Foget *et al.*, 1979) :

Tableau 16 Possibilités en matière de protection du littoral

(A) Sur l'eau	(B) Sur terre
Nettoyage Dispersants Écrémage Sorbants **Dérivation** Barrages flottants	**Isolation** Digues et bermes Barrages flottants Barrières filtrantes

- les caractéristiques du plan d'eau (baie, chenal de marée, côte ouverte);
- configuration côtière (p. ex., bras, entrée de port, côte linéaire);
- profondeur des eaux;
- présence et type de glace;
- vitesse des courants;
- état de la mer (vagues et vents);
- volume et type des hydrocarbures.

Les techniques de protection et leur déploiement ou leur utilisation dans des conditions exemptes de glace sont étudiés en détail par Foget *et al.* (1979). Deslauriers *et al.* (1982) et l'Industry Task Group (1983) fournissent des informations semblables pour les conditions de glace de mer. De plus, il existe de nombreux rapports qui donnent des descriptions de l'équipement conçu spécialement pour les interventions en cas de déversement d'hydrocarbures (p. ex., les écrémeurs - Solsberg, 1983; les barrages flottants - S.L. Ross Ltd., 1986) ou qui signalent les résultats des essais de ce type d'équipement. L'analyse suivante, fondée principalement sur les travaux de Foget *et al.* (1979) et Owens *et al.* (1992), couvre seulement les aspects généraux de la protection du littoral pour souligner quelques-unes des options et difficultés.

3.5.1 Barrages flottants

Des barrages flottants peuvent être déployés pour confiner, dériver ou isoler les hydrocarbures et sont généralement utilisés conjointement avec une technique de récupération, comme l'écrémage ou le pompage (figure 76). Lorsqu'on dispose de suffisamment de temps, on peut déployer des barrages de dérivation pour empêcher les

Figure 76 **Déploiement d'un écrémeur à disques à l'intérieur de la zone confinée par un barrage flottant lors d'un exercice de nettoyage portuaire** (Southampton, G.-B., avril 1982)

hydrocarbures d'atteindre une zone sensible. Les hydrocarbures peuvent être dérivés loin de cette zone ou en direction d'une zone littorale moins sensible ou plus facile à nettoyer. Les barrages de dérivation sont également utiles lorsque le courant est supérieur à 1 noeud; avec des courants très forts, les hydrocarbures s'écoulent sous la jupe du barrage, lequel est alors inefficace. Un exemple de technique de dérivation destinée à protéger une section vulnérable et sensible en aval, ou visant simplement à diriger les hydrocarbures dans une zone où il sera relativement facile de les récupérer, est présenté à la figure 77. Ce type de dérivation planifiée peut être très bénéfique à la fois du point de vue de la protection et des opérations. La dérivation des hydrocarbures sur une section en amont d'un marais peut protéger ce marais contre les effets des hydrocarbures et les effets possibles des opérations de nettoyage. La dérivation des hydrocarbures sur une section du littoral, comme une plage de sable, permet un nettoyage plus efficace. Les opérations peuvent également être moins coûteuses et moins dommageables pour l'environnement que si le nettoyage se faisait dans un milieu de marais.

L'utilisation de barrages d'isolement consiste à déployer un barrage en mode statique; ce type de barrage est utilisé principalement pour empêcher les hydrocarbures de pénétrer dans les ports, les marinas, les entrées de brise-lames et les bras. Un grand nombre de ces entrées ou chenaux sont soumis à des courants de marée supérieurs à un noeud ou à des vagues déferlantes. Dans ces conditions, les barrages doivent être disposés en direction des terres, à partir de l'entrée, dans les zones calmes du chenal, du port ou du bras. Dans les zones où les courants de marée changent de vitesse ou d'emplacement au cours de la marée montante, il peut être nécessaire de modifier la configuration ou la technique de déploiement du barrage au cours des différents moments de la marée montante afin de tenir compte de ces facteurs environnementaux physiques (Owens *et al.*, 1985).

On accorde souvent une grande priorité à l'isolement des marais ou des terres humides contre les hydrocarbures. Diverses méthodes sont employées à cet effet, notamment la construction de digues, le déploiement de barrages flottants et l'utilisation de barrières perméables. Les deux principaux types d'endiguement appropriés au confinement des hydrocarbures déversés consistent à bloquer complètement le passage des eaux de drainage réelles ou potentielles (un barrage de blocage) ou à bloquer l'écoulement des hydrocarbures tout en laissant l'eau s'écouler le long de la pente (un barrage à sous-écoulement). Une autre solution consiste à laisser l'eau s'écouler à travers une barrière perméable construite sur le site (figure 78). Les barrières perméables offrent l'avantage de ne pas perturber l'écoulement de l'eau, de se conformer à la forme du chenal et de permettre les variations du niveau de l'eau dues à l'action des marées.

3.5.2 Méthodes de protection sur le rivage

S'il existe peu de méthodes de protection sur le littoral qui soient pratiques, ces techniques permettent néanmoins de protéger certaines sections de la côte. Le tableau 17 présente l'applicabilité des méthodes disponibles pour les principaux types de littoraux.

La figure 79 illustre la configuration d'un système type de fossé-digue. Cette méthode est principalement utilisée sur les plages de sable et de gravier de faible hydrodynamisme pour protéger la zone intertidale supérieure et l'arrière-plage du mazoutage. Cette technique serait particulièrement utile lors des grandes

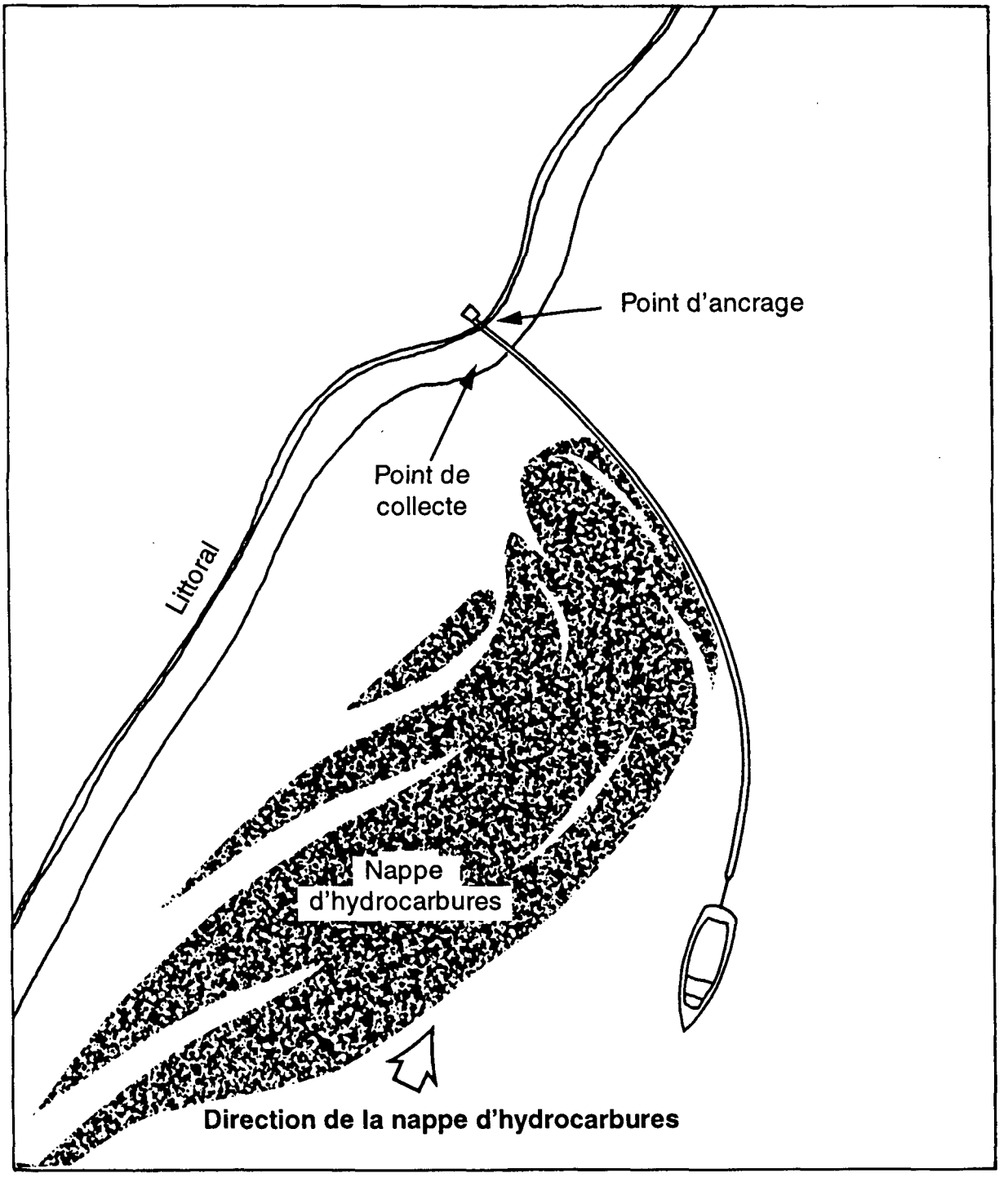


Figure 77 **Utilisation d'un barrage flottant pour dériver les hydrocarbures sur un littoral en vue de leur récupération** (extrait de Foget *et al.*, 1979)

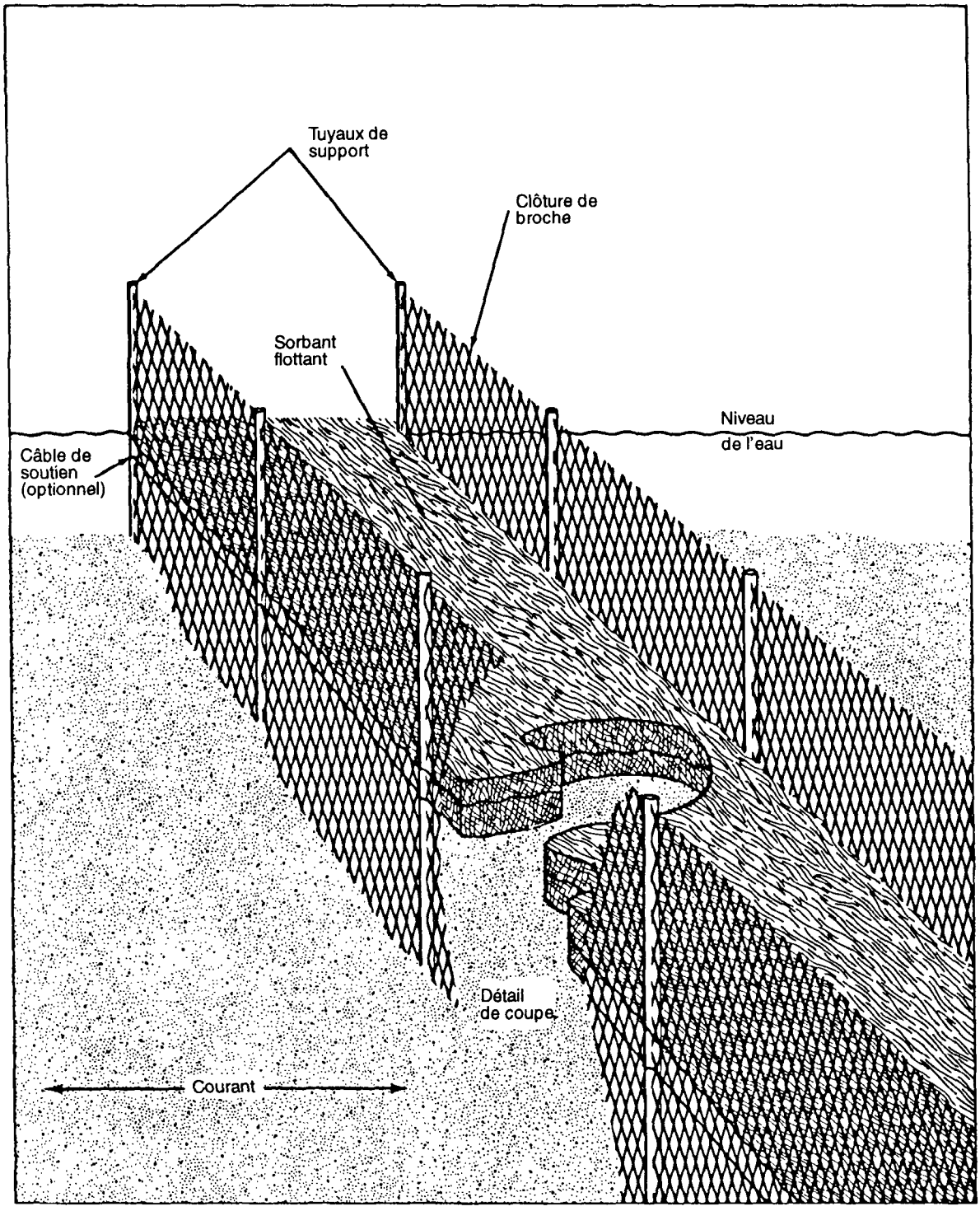


Figure 78 **Barrière perméable type** (extrait de Foget *et al.*, 1979)

Tableau 17 Méthodes de protection sur le rivage et types de littoral

Type de littoral	Méthode de protection sur le rivage
Rocheux artificiel	- les sorbants peuvent être utiles sur les pentes douces
Vase	- les sorbants pourraient être efficaces si la collecte pouvait se faire sans mélanger les hydrocarbures/sorbants avec les vases non contaminées
Sable Galets	- un système de digue-fossé pourrait être utile pour protéger l'arrière-plage - les sorbants pourraient empêcher ou réduire la pénétration des hydrocarbures dans le sol et faciliter leur élimination
Cailloux Blocs	- aucune protection efficace disponible sur le littoral - les sorbants sont difficiles à récupérer - un système de digue-fossé est trop perméable, mais pourrait empêcher les hydrocarbures d'être rejetés sur l'arrière-plage ou pourrait être utilisé conjointement avec des sorbants
Sédiments mixtes	- peuvent être traités de la même façon que les plages de sable et de galets
Marais	- un système de digue-fossé pourrait protéger la marge des marais si le marais est flanqué de dépôts sablonneux - des digues disposées en travers des canaux de marais pourraient empêcher les hydrocarbures de pénétrer dans les zones marécageuses de l'arrière-plage

marées ou des ondes de tempête, lorsque le niveau de l'eau se trouve au-dessus du niveau normal de la marée haute durant une courte période. Les hydrocarbures déposés sur le rivage à ce moment persistent jusqu'à la prochaine marée d'égale importance. La digue doit avoir une largeur d'environ 2 m et une hauteur d'environ 0,75 à 1,0 m, mais les dimensions dépendent de la hauteur maximale de la marée arrivante. Les digues peuvent être construites manuellement ou mécaniquement, selon la longueur de plage à couvrir, la disponibilité de l'équipement et l'accès à la plage. Le fossé de la digue qui se trouve du côté de l'eau doit également permettre d'emprisonner les hydrocarbures qui sont rejetés sur le rivage par les vagues. Les observations de l'action de la marée sur les digues artificielles révèlent que ces digues réussiraient à protéger les zones d'arrière-plage pendant au moins un cycle de marée et peut-être deux, à condition qu'il n'y ait pas de grosses vagues ou de grands vents de tempête.

Les barrages flottants peuvent servir à empêcher les hydrocarbures d'atteindre le rivage, mais seulement en eaux calmes. Des barrières filtrantes, ou perméables, peuvent être utilisées au travers des chenaux ou des

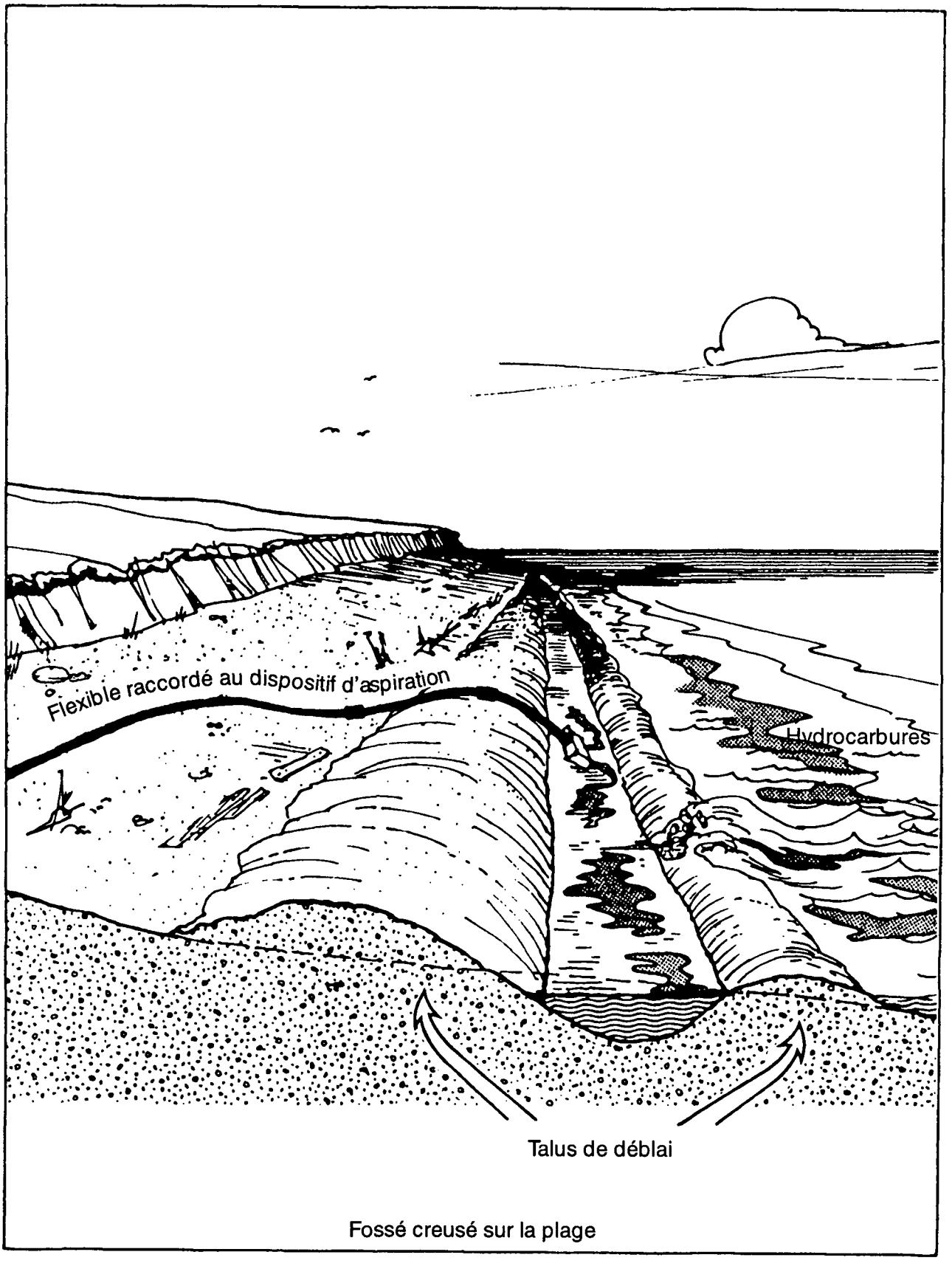


Figure 79 **Système de digue-fossé pour la récupération des hydrocarbures**

petits bras afin d'empêcher les hydrocarbures d'atteindre une zone d'arrière-plage. Des sorbants peuvent être employés, dans certains cas, pour récupérer les hydrocarbures échoués sur le rivage, mais cette technique ne s'applique qu'à des sections très localisées du rivage.

3.6 Nettoyage et traitement du littoral

Le nettoyage et le traitement du littoral ont pour objectif de minimiser les effets des hydrocarbures échoués et d'accélérer le rétablissement de la ressource ou de l'activité touchée.

Les caractéristiques physiques et biologiques du littoral mazouté constituent un facteur important dans le choix des techniques de nettoyage appropriées. Par exemple, la plupart des techniques qui s'appliquent aux plages sablonneuses ne pourraient pas être utilisées sur des falaises rocheuses; et l'équipement de nettoyage motorisé ne devrait pas être utilisé dans les marais salés en raison des dommages possibles à la végétation et à l'habitat. Les facteurs liés au type de mazoutage et au volume des hydrocarbures sont également pris en considération dans le processus décisionnel au moment d'une intervention.

Il faut tenir compte des facteurs opérationnels à court terme et à long terme lors de l'élaboration d'une stratégie de nettoyage. Par exemple, étant donné que toutes les matières mazoutées recueillies au cours d'une intervention devront être finalement éliminées, plus le programme de nettoyage planifié sera important, plus les besoins en élimination seront considérables. Voici les étapes généralement suivies au cours d'une opération de nettoyage :

- choix des priorités en matière de nettoyage/traitement (sous-section 3.2);
- choix des techniques appropriées (division 3.6.1);
- évaluation des incidences environnementales possibles (divisions 3.6.2 et 3.6.3);
- opérations de nettoyage et de traitement (divisions 3.6.4 et 3.6.5);
- élimination des matières mazoutées (sous-section 3.7);
- restauration, au besoin, des zones endommagées (sous-section 3.8).

3.6.1 Choix des méthodes de nettoyage ou de traitement appropriées

La planification et la compréhension du problème sont deux ingrédients clés du succès d'une intervention. Ce principe s'applique parfaitement aux activités de nettoyage. Cependant, les simples critères d'efficacité et d'efficience ne sont pas les seuls facteurs importants dans le choix d'une technique de nettoyage. Les facteurs environnementaux, comme le moment d'application d'une mesure pour tirer profit des périodes de marée basse, entrent également en jeu. De même, si une technique de nettoyage efficace privilégiée risque de causer des dommages aux habitats ou aux ressources, il peut être préférable de choisir une technique moins efficace, mais moins dommageable.

Le choix des mesures de nettoyage efficaces et efficientes dépend de plusieurs facteurs (voir également tableau 11), notamment :

- le type d'hydrocarbure;

- le type de substrat;
- la quantité d'hydrocarbures;
- la profondeur de pénétration des hydrocarbures dans les sédiments;
- la disponibilité du personnel et de l'équipement approprié;
- l'accès au site;
- la manoeuvrabilité de l'équipement;
- la présence de débris (p. ex., des billes de bois).

Foget *et al.* (1979) présentent une série de guides décisionnels (voir l'exemple de la figure 70) qui permettent l'évaluation de ces facteurs pour un littoral donné et facilitent le choix de la technique de nettoyage appropriée. En guise de directive générale, la figure 80 mentionne certaines des méthodes appropriées qui s'appliquent à différents types de littoral, mais il faut souligner que cette figure n'est utilisée qu'à titre d'exemple et que la décision sur place doit tenir compte des conditions locales, du type d'hydrocarbure et de l'importance du mazoutage.

Après avoir sélectionné une technique de nettoyage ou de traitement pour une zone littorale donnée, il faut évaluer les effets de cette technique et les exigences en matière d'application. Si les incidences environnementales de cette technique sont inacceptables ou que la technique en cause ne peut être appliquée, il faut choisir la technique classée au deuxième rang ou envisager de laisser le littoral se rétablir naturellement. La technique la plus appropriée peut changer avec le temps, comme l'ont démontré les mesures prises à la suite du déversement de l'*Amoco Cadiz*. La majeure partie des hydrocarbures avaient été récupérés à l'aide de techniques de pompage au cours des trois premières semaines (figure 81) mais, par la suite, alors qu'il ne restait presque plus de pétrole dans les mares et les puisards, on a dû faire davantage appel à une technique de récupération manuelle qui consistait à recueillir le pétrole dans des sacs de plastique (Hann *et al.*, 1978).

Si le mazoutage est très important, l'équipement lourd permet un nettoyage plus efficace et efficient que le nettoyage manuel. Cette dernière technique est efficace en cas de léger mazoutage du littoral, au cours de la dernière étape du nettoyage et en cas d'inaccessibilité de l'équipement lourd au littoral. Certains types d'équipement de terrassement peuvent être utilisés pour nettoyer les plages composées de matériaux dont la granulométrie va du silt aux cailloux. Les autres techniques qui ont des applications particulières comprennent l'utilisation d'équipement d'arrosage sous pression, généralement efficace pour le nettoyage des plages de roches et de blocs, des levées de blocs, des falaises rocheuses et des ouvrages artificiels. Les petits écrémeurs de pétrole, le lavage à faible pression et les sorbants constituent les meilleures techniques de nettoyage des marais salés.

Il est important de vérifier continuellement la performance sur le terrain des techniques choisies afin d'assurer l'efficience de la technique de nettoyage. Par exemple, on peut constater que, dans un endroit particulier, les véhicules à chenilles mélangent en fait d'importantes quantités d'hydrocarbures avec les sédiments, faisant ainsi pénétrer les hydrocarbures plus profondément que si on n'avait effectué aucun traitement. Il faudrait alors choisir une autre technique de nettoyage.

MÉTHODE / HABITAT	Eaux libres - large/littoral	Eaux libres - baies et ports abrités	Intertidal rocheux exposé	Intertidal rocheux abrité	Plages sablonneuses (exposées)	Wadden abrités	Plages sablonneuses (abritées)	Wadden abrités	Plages de gravier/cailloux (exposées)	Plages de gravier abritées	Plages de cailloux abritées	Marais salés
Machines pour le nettoyage de la page						S	S					
Barrages/écrémeurs	S	S	V	S				S				S
Enfouissement						E	E	E	E	E		
Brûlage	NC	NC	NC	NC		E	E			E		E
Dispersants	S	V	V	NC		V	E	NC	S	E	V	V
Barrières de terre												
Concentration	V	V										V
Lavage à haute pression			NC	NC		E	E	E	NC	E	NC	E
Lavage à basse pression			V	V			V	S	S	V	S	S
Gestion (drainage)												S
Récupération manuelle			V	V		S	S	V	NC	S	NC	E
Nettoyage naturel	S	S	S	NC		S	V	S	S	NC	S	S
Décapage au sable			E						NC		E	
Agents de coulage	E	E										
Sorbants	V	V	V	V		V	V	S	NC	V	V	V
Nettoyage à la vapeur			E	E					E		E	E
Déplacement du substrat						S	E	E	E		E	
Récupération du substrat			E	E		S	NC	E	E	NC	E	E
Pompage sous vide	V	V	V	V		S	S	V		S		V
Enlèvement de la végétation			NC	NC								NC

S = Souhaitable V = Viable NC = Non conseillé E = Éviter

Figure 80 **Méthodes de nettoyage recommandées pour différents milieux et différents types de littoral** (adapté de l'API, 1985)

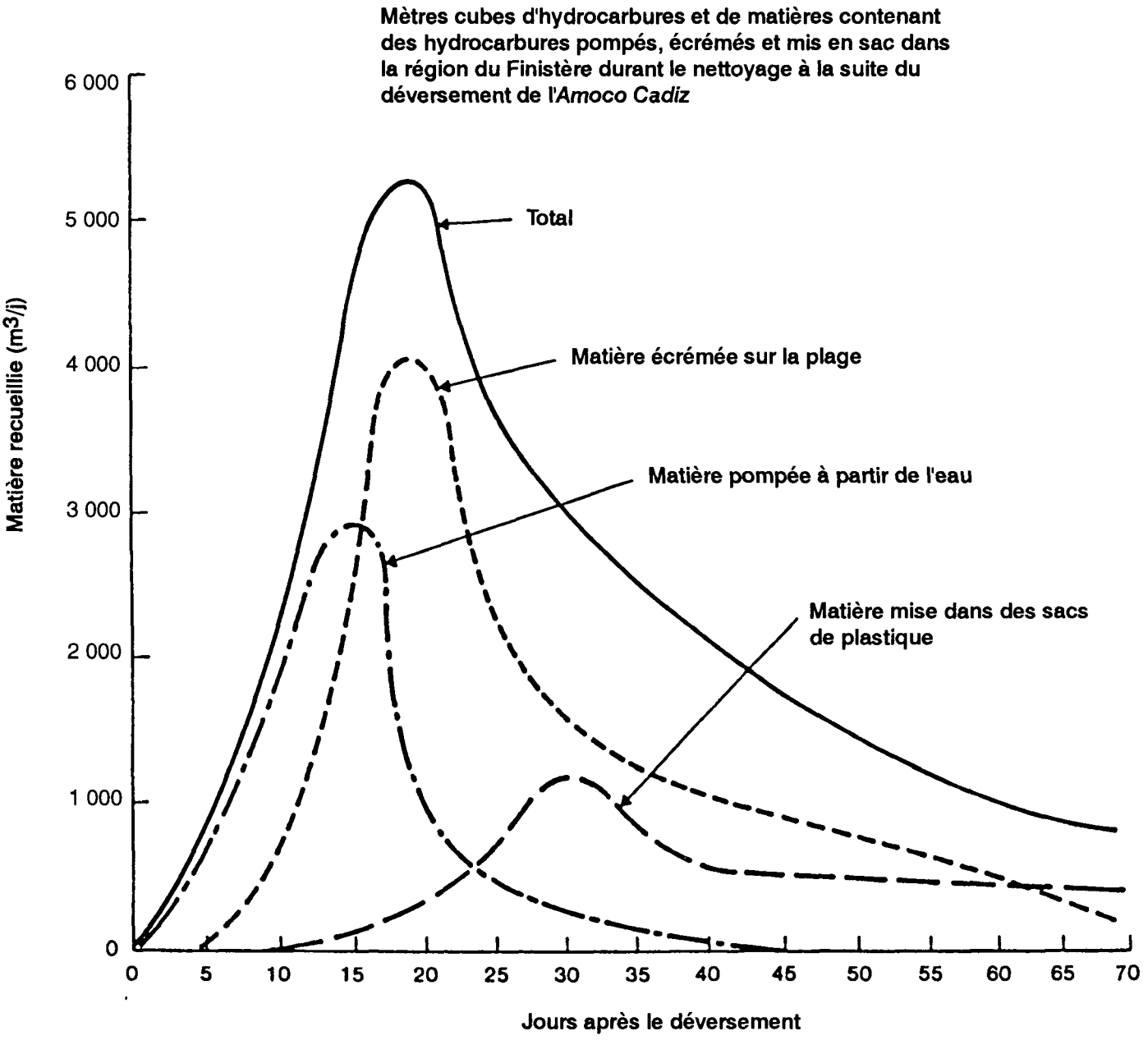


Figure 81 **Progression des différentes méthodes de nettoyage suite au déversement de l'*Amoco Cadiz*** (extrait d'Exxon Corporation, 1979)

En outre, il est important de tenir compte de l'efficience et des coûts lors de l'élaboration de la stratégie globale de nettoyage et du choix des techniques. L'efficience diminue généralement avec le temps à mesure que les hydrocarbures s'altèrent, s'enfouissent ou se mélangent avec des débris; elle diminue également une fois que les sites les plus faciles à nettoyer et les plus accessibles ont été traités (figure 82). Dans une étude sur le nettoyage de l'*Amoco Cadiz*, Hann *et al.* (1978) ont établi que le volume des hydrocarbures récupérés sur la côte atteignait une valeur maximale dans les trois semaines suivant le déversement pour ensuite diminuer, rapidement au début, au cours de la première semaine, et par la suite de façon constante au cours des six semaines qui ont suivi. En général, le coût du nettoyage de chaque mètre additionnel de littoral ou de récupération de chaque litre additionnel de pétrole augmente en flèche une fois l'étape initiale terminée.

3.6.2 Incidences géologiques du nettoyage

Les activités de nettoyage peuvent causer des problèmes géologiques liés à l'élimination des sédiments sur les plages et à la déstabilisation des dunes. L'enlèvement de sédiments dans la zone littorale réduit le volume total des sédiments de la plage, ce qui ne pose pas de problème lorsque les sédiments sont abondants ou qu'ils peuvent être remplacés par des processus naturels. Si des quantités excessives de sédiments sont enlevées, ou que le volume des sédiments de la plage est faible, il peut en résulter un recul de la plage alors que les vagues tendent à rétablir l'équilibre (Owens et Drapeau, 1973). En particulier, les petites plages abritées, qui ont généralement peu de sédiments et sont caractérisées par un lent réapprovisionnement en sédiments, peuvent subir des dommages dus à l'enlèvement des sédiments (figure 83). L'enlèvement excessif de sédiments sur une plage entraîne soit un déplacement général de la plage vers l'intérieur des terres, si la plage est large ou raccordée à un marais ou une lagune (figure 84), soit une érosion de l'arrière-plage si la plage est adossée à des falaises ou des dunes. Dans les cas où une plage étroite est prolongée par des falaises de sédiments meubles, l'érosion peut être rapide jusqu'à ce que la zone littorale établisse un nouvel équilibre avec les vagues.

Dans tous les cas, le but de toute opération de nettoyage doit consister à enlever le moins de matériaux de plage possible. À cette fin, les hydrocarbures devraient être récupérés le plus vite possible après un déversement, afin d'empêcher leur enfouissement et de minimiser ainsi leur pénétration dans les sédiments de la plage. Si une élimination d'envergure s'impose, il est conseillé de prévoir le remplacement du matériau enlevé par un volume égal de sédiments de granulométrie semblable (sous-section 3.8). Le remplacement des sédiments sur les plages de galets, de cailloux ou de blocs est particulièrement important étant donné que le remplacement naturel de ce type de sédiments est très lent.

Le deuxième sujet de préoccupation d'ordre géologique se rapporte aux réseaux dunaires qui peuvent être gravement endommagés si le personnel et l'équipement détruisent la végétation des dunes qui stabilise le sable de façon naturelle. Le piétinement ou l'enlèvement de la végétation peuvent causer une grave érosion en cas de *déflation* (enlèvement de sable par l'action du vent) avant que la végétation puisse stabiliser à nouveau le sable. S'il faut absolument traverser des dunes, il conviendrait de limiter le personnel ou les véhicules au plus petit nombre possible et d'utiliser des matelas pour améliorer la traction et réduire les dommages.

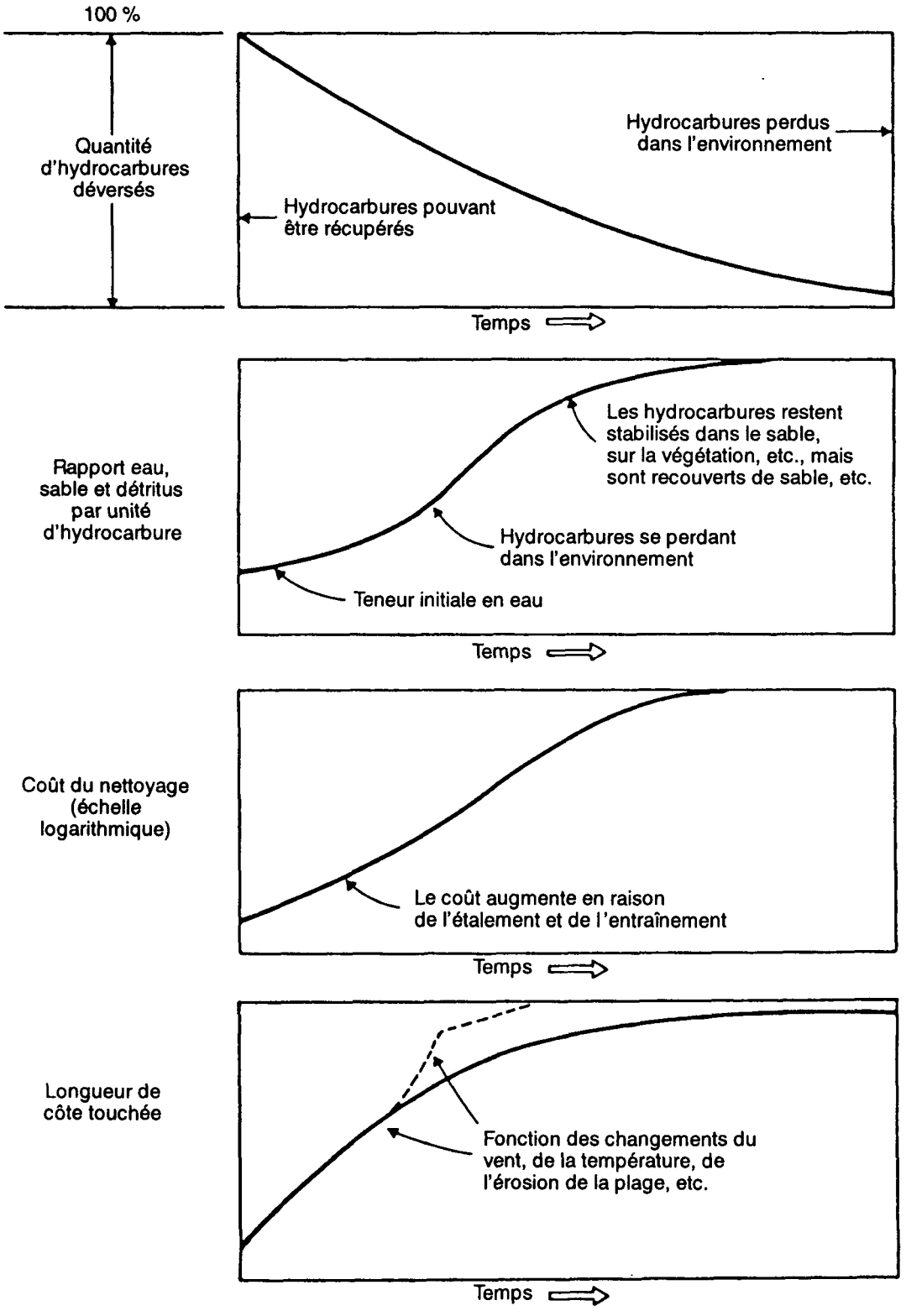


Figure 82 **Efficience du nettoyage et incidences du retard des opérations de nettoyage** (extrait d'Exxon Corporation, 1979)

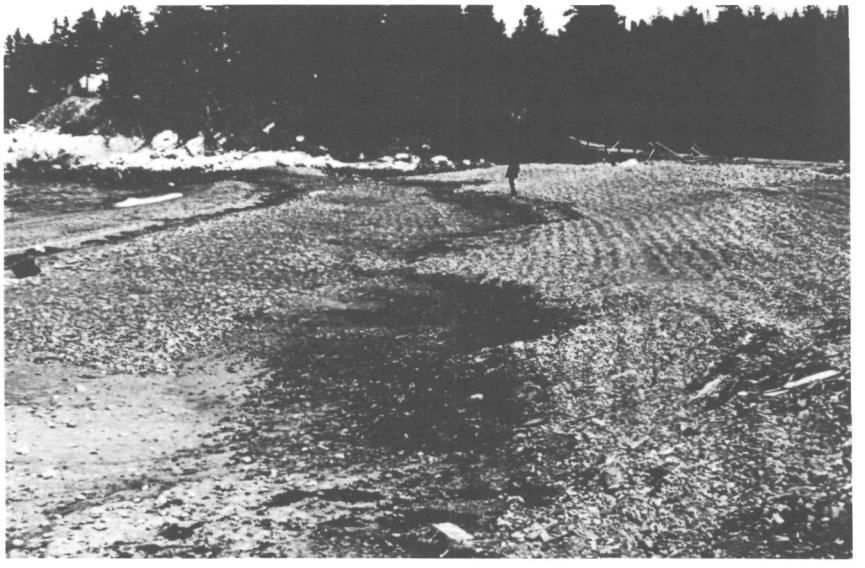


Figure 83 **Petite plage abritée dans l'anse Indian, Nouvelle-Écosse, recontaminée après l'enlèvement de sédiments** (la plage a une longueur de 250 m)

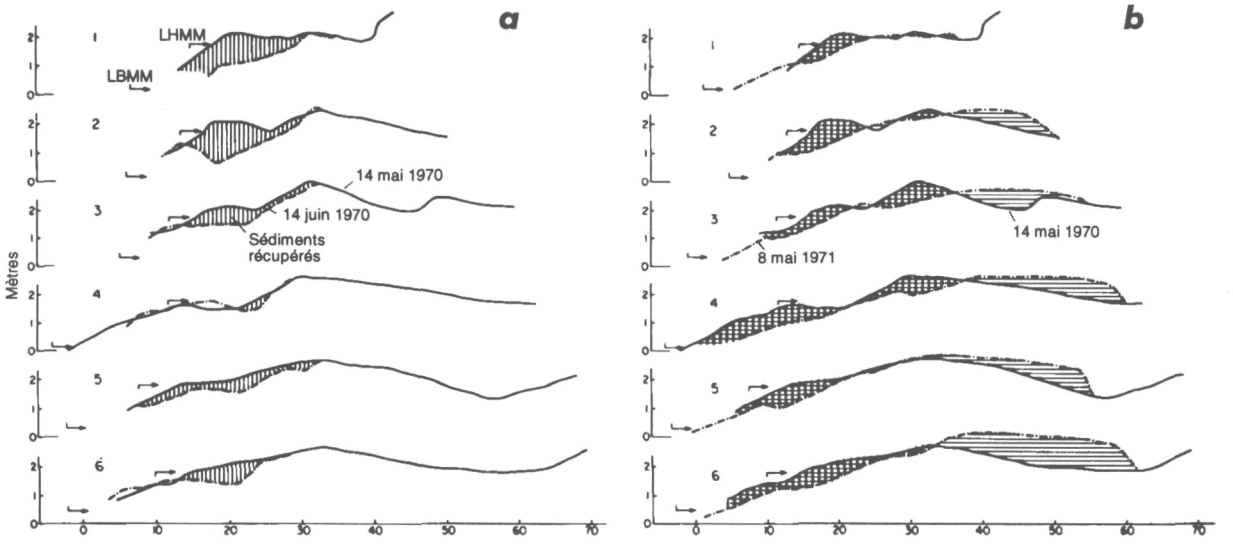


Figure 84 **Séquence de profils de plage à l'anse Indian, Nouvelle-Écosse, contaminée par le déversement de l'*Arrow*** (figure 83). La première paire de profils *a*) représente la plage avant le 14 mai 1970, et immédiatement après l'enlèvement de sédiments durant un programme de nettoyage (14 juin 1970). Un levé ultérieur *b*), un an plus tard (8 mai 1971), met en évidence le recul de la crête de la plage. Les zones horizontales ombrées indiquent les endroits de gain net en sédiments, la zone quadrillée, une perte nette de sédiments (d'après Owens et Rashid, 1976).

3.6.3 Incidences écologiques du nettoyage

Les effets des opérations de nettoyage varient selon le type de littoral, les méthodes utilisées et la saison. Il sera toujours nécessaire d'évaluer les dommages que pourrait causer une méthode choisie afin d'établir si ces dommages sont acceptables ou si la zone littorale se rétablira plus rapidement sans nettoyage. Baca *et al.*

(1987) ont affirmé que le rétablissement des marais suite au déversement de l'*Amoco Cadiz* a été retardé de deux à trois ans à cause des activités de nettoyage. Rétrospectivement, le nettoyage pourrait être considéré comme acceptable en tenant compte du mazoutage considérable causé par ce déversement et de la migration possible d'hydrocarbures du marais vers les milieux adjacents sensibles et vulnérables. Comparativement à la décennie précédente, il est beaucoup plus facile maintenant de prendre des décisions éclairées étant donné les leçons tirées à partir des études détaillées menées à la suite de ces opérations de nettoyage et des autres opérations du genre. On trouve une multitude d'informations dans le manuel de l'API (1985) qui porte exclusivement sur la minimisation des incidences écologiques des opérations d'intervention en cas de déversement d'hydrocarbures, aussi bien en termes de choix que d'application de ces méthodes. La figure 80 résume les options considérées et les recommandations en matière de nettoyage.

Les interventions ont pour objectif d'accélérer le rétablissement des zones touchées par les hydrocarbures déversés. Lorsque la récupération ou le traitement des hydrocarbures peut causer plus de dommages que le simple fait de laisser le milieu ou l'habitat se rétablir de façon naturelle, il est préférable de laisser les hydrocarbures sur place et de surveiller le rétablissement. Après les opérations relatives au déversement de l'*Exxon Valdez*, Stoker *et al.* (1993) ont signalé que les effets écologiques à court terme des activités de nettoyage dans le détroit du Prince-William avaient été compensés par les bienfaits à long terme du rétablissement écologique de la zone intertidale, de sorte qu'à l'été de 1991, il restait très peu sinon aucun revêtement ou suintement bitumineux, et que les organismes vivants montraient très peu de signes des effets de la présence d'hydrocarbures résiduels. Dans ce contexte, on peut considérer que les opérations de nettoyage et de traitement ont atteint leur objectif.

3.6.4 Méthodes de nettoyage

Il existe un très grand choix de méthodes physiques et biochimiques qui peuvent être appliquées ou adaptées pour le nettoyage ou le traitement des hydrocarbures échoués sur le littoral; toutefois, ces méthodes peuvent être classées en quatre catégories principales (tableau 18). Certaines de ces techniques ont une application limitée, et les méthodes les plus couramment utilisées sont décrites brièvement et les impacts possibles des méthodes de nettoyage sont examinés.

Techniques de lavage. L'utilisation des techniques de lavage ou de lessivage est pratique courante lors du nettoyage suite à un déversement d'hydrocarbures. La pression et la température de l'eau peuvent être réglées pour répondre aux objectifs de l'opération. Par exemple, un système de déluge ou d'inondation, muni d'une lance basse pression et utilisant de l'eau de mer à température ambiante, peut suffire à déloger un pétrole léger d'une plage de sable ou de galets. Un fuel lourd altéré ne serait pas aussi facile à éliminer et il faudrait alors utiliser de l'eau à haute pression ou de l'eau chaude. Le volume, la pression et la température de l'eau les plus appropriés dépendent de la quantité et du type d'hydrocarbures ainsi que du substrat à nettoyer. Le lavage à basse pression et à l'eau froide d'un habitat marécageux peut être acceptable dans certains cas, alors que le nettoyage à haute pression et à l'eau chaude peut convenir aux ouvrages longitudinaux en béton.

Tableau 18 Techniques de nettoyage et de traitement du littoral

Nettoyage	Traitement
Lavage Inondation Lavage à basse pression à l'eau froide Lavage à haute pression à l'eau froide Lavage à basse pression à l'eau chaude Lavage à haute pression à l'eau chaude Nettoyage à la vapeur Décapage au sable **Récupération physique** Récupération manuelle des hydrocarbures Récupération mécanique Sorbants Sous vide Récupération de la végétation Agitation mécanique Déplacement des sédiments dans la zone de déferlement Brûlage sur place	**Biorestauration** Labourage (aération) Enrichissement en matières nutritives Ensemencement aux microbes naturels **Produits chimiques** Prétraitement du littoral Nettoyeurs de plage Solidifiants

L'utilisation de techniques de lavage a constitué la principale intervention suite au déversement de l'*Exxon Valdez* en 1989 et a permis de récupérer de grands volumes de pétrole sur le littoral du détroit du Prince-William (Nauman, 1991). Ce pétrole a été confiné par des barrages flottants et écrémé par des procédés mécaniques. Après altération du pétrole au cours du printemps et de l'été de 1989, les techniques ont changé, passant du lavage par inondation à faible pression à l'eau de mer à température ambiante (figure 85) au lavage par inondation à pression moyenne de 700 Kpa (environ 100 lb/po^2) et à l'eau chaude (60 à 65 °C). La diminution rapide des quantités de pétrole sur le littoral au printemps de 1990 (Owens, 1991a,b) peut être attribuée à la récupération d'importants dépôts de pétrole en vrac qui a permis un meilleur rétablissement naturel du littoral au cours de l'hiver de 1989-1990. Les vitesses de réduction des hydrocarbures de surface et de subsurface ont été accélérées sur les sections de la côte où le traitement de 1989 (lavage) a été effectué immédiatement après le déversement ou dans les endroits soumis à un nettoyage intensif et répété.

Récupération manuelle. La récupération manuelle des hydrocarbures échoués est jugée pratique et efficace pour la plupart des types de littoral (figure 80). Cette technique est utilisée sur des plages de vase, de sable, de gravier et de cailloux lorsque le mazoutage est léger ou sporadique et que les hydrocarbures ont pénétré légèrement dans les sédiments (figure 86), ou lorsque l'équipement lourd ne peut accéder à ce type de plage. Cette technique est moins utile dans des milieux de vase où les déplacements du personnel peuvent être limités. La récupération manuelle peut être impossible lorsque les hydrocarbures échoués ont pénétré profondément dans les espaces interstitiels des sédiments de

Figure 85 **Lavage d'une plage après le déversement de l'*Exxon Valdez*** (avril 1989)

Figure 86 **Récupération manuelle des hydrocarbures sur une plage de sable, pointe Michaud, Nouvelle-Écosse** (mai 1979)

subsurface, sur les plages de gravier et de cailloux. Bien que pratique et efficace dans la plupart des cas, cette technique prend beaucoup de temps et nécessite une main-d'oeuvre nombreuse pour la récupération d'importants volumes d'hydrocarbures. Lors de l'application du nettoyage manuel, il faudrait veiller à obtenir des contenants ou des sacs qui ne se fendront pas ou qui ne se renverseront pas, ou qui ne déverseront pas les hydrocarbures, les sédiments et les débris qui auront été ramassés. Dans le cas de déversements majeurs dans des régions côtières habitées, le nettoyage manuel constitue souvent un élément principal des opérations d'intervention (p. ex., les déversements du *Torrey Canyon*, de Mizushima, de l'*Amoco Cadiz* et du *Nestucca*).

La récupération manuelle des hydrocarbures échoués ne devrait pas avoir d'effet significatif sur le système côtier, sauf dans les milieux de vase ou de marais. Cependant, lorsque les participants à ce genre d'opération sont nombreux, comme dans le cas de l'*Amoco Cadiz* où l'on a déclaré jusqu'à 6 000 personnes à pied d'oeuvre en période de pointe, à la mi-avril (Hann *et al.*, 1978), et lors du nettoyage qui a suivi le déversement de Mizushima et auquel ont participé 200 000 personnes (Nicol, 1976), il peut y avoir des problèmes à superviser correctement de tels effectifs et à s'assurer qu'on utilise les techniques appropriées pour minimiser les dommages écologiques. Dans la vase, le déplacement du personnel peut causer un mélange des sédiments de subsurface propres avec des matériaux de surface mazoutés si le personnel ne suit pas les procédures appropriées. De même, dans un milieu marécageux, les déplacements du personnel de nettoyage peuvent causer plus de dommages que la marée noire.

Une technique couramment utilisée consiste à répandre des matières absorbantes (sorbants) dans la zone littorale mazoutée où elles seront soumises à l'action des vagues, ce qui entraînera une mise en contact avec les hydrocarbures. Cette méthode passive de récupération des hydrocarbures est considérée comme une technique manuelle étant donné que les sorbants doivent être répandus et récupérés à la main.

Récupération mécanique. L'équipement de terrassement motorisé est très pratique et très efficace pour les littoraux sablonneux et, dans certains cas, pour certains types de littoral de sable et de gravier. Foget *et al.* (1979) décrivent l'applicabilité, les avantages et les inconvénients de cette méthode et définissent les procédures opérationnelles recommandées pour la plupart des techniques de récupération mécanique. On dispose d'un vaste choix d'équipements classiques, notamment des niveleuses, des chargeurs frontaux, des bulldozers, des pelles à benne traînante et des pelles à benne preneuse. De plus, certaines machines ont été spécialement conçues et produites à cette fin (Pasquet et Denis, 1983; S.L. Ross Ltd., 1984), comme les tamiseuses lorsque le pétrole se trouve sous forme particulaire. Cette technique est utilisée aux Bermudes depuis plusieurs années afin de récupérer les boulettes et les débris goudronneux des plages touristiques.

Sur les plages sablonneuses planes, des niveleuses motorisées peuvent récupérer efficacement les hydrocarbures de surface en décapant seulement la couche superficielle mazoutée (figure 87). L'équipement motorisé est moins efficace sur les littoraux de vase et de gravier et de cailloux en raison de la mauvaise traficabilité de la surface, mais peut être approprié lorsqu'on suit les procédures adéquates (figure 88). Les systèmes motorisés sous vide peuvent être

Figure 87 **Niveleuses en échelon décapant la surface de la plage pour former des bermes à Galveston, Texas, à la suite du déversement de l'*Alvenus*** (photo de W. Robson)

Figure 88 **Chargeur frontal récupérant soigneusement une mince couche** (10 à 20 cm) **d'hydrocarbures et de sédiments dans l'anse Indian, Nouvelle-Écosse** (mai 1970)

utilisés dans des milieux de vase, de sable ou de gravier sablonneux et peuvent être utiles à la limite extérieure des marais. Des pompes sous vide peuvent être souvent utilisées conjointement avec des puisards, comme ce fut le cas lors du nettoyage suite au déversement de l'*Amoco Cadiz* au cours duquel on a utilisé jusqu'à 200 camions sous vide de types différents disponibles sur place pour récupérer les hydrocarbures dans les

mares, les tranchées et les puisards (Hann *et al.*, 1978).

Si ces méthodes de nettoyage sont appliquées conformément aux procédés recommandés, elles ne devraient pas avoir d'effet dommageable sur les littoraux de sable, de gravier sablonneux ou de gravier-cailloux. L'utilisation d'équipement motorisé sur un substrat vaseux pourrait entraîner le mélange de sédiments propres avec des sédiments mazoutés, et l'utilisation d'équipement lourd dans les marais pourrait également avoir des effets dommageables soit en mélangeant des hydrocarbures avec le substrat, soit en détruisant directement la surface végétale ou les racines.

Déplacement et mélange des sédiments. Les techniques de déplacement ou de mélange peuvent être appliquées à des milieux sédimentaires afin d'accélérer les vitesses d'altération et de dispersion naturelles des hydrocarbures, ou lorsque l'enlèvement des sédiments peut entraîner l'érosion de la plage ou de l'arrière-plage. La technique consistant à pousser le matériau dans la zone de déferlement à marée basse serait principalement utilisée sur les plages de cailloux et de gravier légèrement mazoutées, bien que l'utilité de telles techniques sur une plage calme soit contestable en raison de la lenteur de la remise en place naturelle des matériaux propres poussés dans la zone de déferlement. Sur les plages de cailloux, de gravier ou de sable où d'épaisses couches d'hydrocarbures ont créé un revêtement à la surface de la plage, ce revêtement bitumineux peut être brisé à l'aide d'un bulldozer ou d'un chargeur frontal équipé d'une défonceuse à l'arrière du tracteur. Le disquage ou le défonçage des hydrocarbures peut être utilisé sur les plages de sable ou de gravier, et cette technique peut être rapide et efficace, bien que les hydrocarbures ne soient pas récupérés mais laissés sur place et éliminés par l'action des vagues et des marées.

Le mélange des hydrocarbures sur les plages de sable ou de gravier sablonneux devrait avoir des incidences moyennes lorsque ce processus entraîne l'enfouissement des sédiments mazoutés sous la surface de la plage. Les hydrocarbures ne sont pas éliminés directement par ce processus et une série d'essais sur le terrain (Owens, *et al.*, 1987) a démontré que le mélange n'a pas réduit sensiblement les concentrations des hydrocarbures et n'en a pas accéléré l'altération. Cette méthode a cependant été utilisée sur les plages du détroit de Juan de Fuca à la suite du déversement de l'*Arco Anchorage* et a permis l'élimination naturelle des hydrocarbures sur une section d'environ 2 000 m (7 000 pi) d'une plage de gravier et de cailloux (Chamberlin *et al.*, 1987; Levine, 1987; Miller, 1987). Les concentrations d'hydrocarbures totaux ont été sensiblement réduites et la différence entre cette situation de déversement réel et celle du déversement expérimental dépend de l'hydrodynamisme différent des deux sites. Sur le site expérimental BIOS, la plage était calme et il y avait donc peu d'énergie mécanique pour déloger les hydrocarbures agités par le brassage. Plusieurs méthodes de mélange des hydrocarbures ont été évaluées lors du déversement de l'*Arco Anchorage*. Un bulldozer équipé d'une défonceuse et d'un système de jets d'eau a été le plus efficace (tableau 19); il a cependant fallu procéder à un brassage répété des sédiments dans les sections très mazoutées (Miller, 1987). Une approche semblable a été utilisée dans le golfe Persique en 1991 (Benson *et al.*, 1993).

Un an après le déversement de l'*Exxon Valdez*, il restait encore une certaine quantité de pétrole dans les zones de subsurface et supratidales de certaines plages. Le pétrole

Tableau 19 Équipement utilisé pour mélanger les sédiments de la plage, mis à l'essai lors du déversement de l'*Arco Anchorage* (extrait de Miller, 1987)

Équipement	Efficacité	Avantages/Inconvénients
1. Équipement d'arrosage par jet d'eau à buses monté sur des barges	Limitée	Peut être utilisé dans les zones qui ne permettent pas l'accès à l'équipement de construction; nécessite une barge; efficace seulement dans le périmètre immédiat du jet d'eau
2. Équipement d'arrosage de la plage avec tuyau d'eau sous pression	Limitée	Encombrant à cause des flexibles; forte érosion de la plage; main-d'oeuvre nombreuse; efficace seulement dans le périmètre immédiat du jet d'eau
3. Tracteur à pneus de caoutchouc équipé d'une herse	Moyennement efficace	Manoeuvrable dans les espaces confinés; peut être équipé d'un appareil à jet d'eau; profondeur de pénétration limitée de la herse; seule une petite superficie peut être travaillée à la fois
4. Bulldozer avec dents ou tiges de labourage sur la lame frontale	Efficace	Manoeuvrable; profondeur type d'agitation jusqu'à 30 cm
5. Bulldozer avec défonceuse hydraulique et dents défonceuses multiples	Efficace	Rapide; opération courante; profondeur type de l'agitation : 30 à 45 cm
6. Bulldozer avec défonceuse et jets d'eau	Très efficace	Rapide; relativement facile à utiliser; profondeur type de l'agitation : 30 à 45 cm

qui était resté après les opérations de lavage de 1989 et l'action des vagues durant l'hiver de 1989-1990 a été traité par déplacement des sédiments. Le programme de traitement de 1990 avait pour but de déplacer les sédiments de surface et de subsurface mazoutés depuis les parties supérieures de la plage, où le pétrole avait été déposé au-dessus de la limite normale de l'action des vagues, jusqu'à la zone intertidale supérieure (figure 89). Les sédiments mazoutés ainsi déplacés ont été laissés dans cette zone où ils seront remaniés, érodés et redistribués vers le haut de la plage par l'action des vagues. La plupart des plages de cette région sont constituées de sédiments grossiers dont l'approvisionnement est lent. Dans certains cas, les plages n'ont aucune source contemporaine de réapprovisionnement en sédiments.

Figure 89 **Déplacement des sédiments de surface pour exposer et déplacer les sédiments de subsurface mazoutés de l'arrière-plage, île Ushagat, Alaska** (août 1990)

L'enlèvement des sédiments mazoutés de la zone supérieure ou supratidale de la plage pourrait donc entraîner une perte de matériaux et le rétablissement d'un équilibre du profil de la plage plus loin vers l'intérieur des terres (c.-à-d. le recul ou l'érosion de la plage). On a donc choisi le déplacement comme méthode de traitement afin d'éviter d'enlever des sédiments et de risquer une perte de sédiments et éventuellement l'érosion de la plage. Cette méthode tire également profit des processus de nettoyage naturels pour éliminer les hydrocarbures résiduels. Le degré de traitement variait considérablement d'un endroit à l'autre, mais on a ainsi réussi à traiter au total 3 000 m de littoral (Owens *et al.*, 1991).

Nettoyage des sédiments. Les nombreuses techniques chimiques, mécaniques (lavage) ou d'incinération pour le nettoyage et la remise en place des sédiments sur les lieux ne s'appliquent qu'aux types de littoraux sédimentaires (p. ex., Wotherspoon et Swiss, 1986). À certains égards, les techniques disponibles sont pratiques et efficaces pour certains types de littoraux sablonneux en particulier, bien que le rythme du nettoyage soit souvent lent en ce qui a trait au volume de matériaux nettoyés par jour.

On peut s'attendre à ce que ces méthodes aient peu d'incidences en raison de la faible sensibilité écologique des littoraux sédimentaires. Cependant, s'il fallait utiliser de telles techniques dans un milieu marécageux, les incidences seraient probablement importantes. Dans la plupart des cas, l'utilisation de ces méthodes n'est pas pratique en milieux marécageux.

Biorestauration. La biodégradation constitue un processus essentiel dans le nettoyage naturel des littoraux mazoutés. Les bactéries et les champignons qui existent à l'état naturel oxydent les hydrocarbures pour produire du dioxyde de carbone et de l'eau. L'addition d'un activateur pour accélérer la biodégradation fournit de l'azote et du phosphore aux microbes. Cette approche, appelée biorestauration, a été efficace dans certains cas (Hoff, 1992; Bragg *et al.*, 1993). La biodégradation et la biorestauration n'éliminent pas rapidement

de grands volumes d'hydrocarbures si ces derniers sont épais ou très altérés. Les principaux facteurs qui régissent la vitesse de la biodégradation sont la composition des hydrocarbures, la superficie des hydrocarbures exposés aux microbes, la disponibilité de substances nutritives et la température de l'air et de l'eau.

Traitement chimique. Des dispersants ou agents tensioactifs chimiques sont épandus sur les littoraux mazoutés pour récupérer les hydrocarbures. Les dispersants agissent sur les pétroles frais ou légers en les décomposant en petites gouttelettes, mais ce processus ne permet pas la récupération des hydrocarbures à l'aide de systèmes mécaniques. Les agents tensioactifs, ou agents de lavage de surface, ont une faible efficacité de dispersion, ce qui permet l'élimination mécanique des hydrocarbures. Des dispersants à base d'hydrocarbures peuvent être utilisés pour traiter des hydrocarbures visqueux ou altérés. Ils dissolvent ou amolissent les revêtements afin de permettre l'élimination par lavage, par décapage à l'aide de jets à haute pression, par nettoyage à la vapeur ou par l'action naturelle des vagues. Des dispersants à base d'eau peuvent être appliqués à l'aide de plusieurs méthodes, selon l'étendue du mazoutage, du type du substrat, de l'équipement disponible et de l'effet désiré. Ces dispersants peuvent être utilisés pour faciliter directement l'élimination des hydrocarbures ou éviter que se forment à nouveau des mares dans les cas où la méthode d'élimination est principalement mécanique. En général, on peut traiter de petites zones mazoutées à l'aide d'un pulvérisateur de jardin monté dans un havresac ou tenu à la main et contenant une solution prémélangée de dispersant et d'eau de mer (figure 90). Dans tous les cas, à moins de récupérer des eaux de ruissellement mazoutées, le traitement du littoral doit se limiter aux périodes précédant immédiatement la marée haute, lorsque l'agent de traitement et le matériau récupéré se diluent le plus rapidement. Les expériences sur le terrain indiquent que les dispersants chimiques ne sont pas efficaces dans les milieux abrités (plages sablonneuses, slikkes et marais) où l'hydrodynamisme est insuffisant pour brasser et redistribuer le mélange

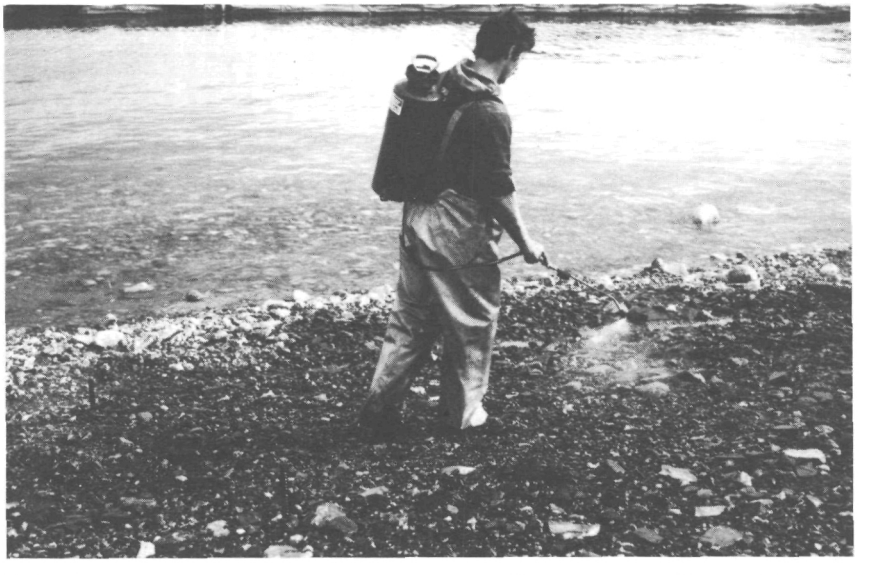


Figure 90 **Pulvérisation de dispersants à l'aide d'un appareil monté dans un havresac, Cape Hatt, île de Baffin, Territoires du Nord-Ouest** (juillet 1981)

hydrocarbures-dispersant (Baker *et al.*, 1984; Little *et al.*, 1986; Owens *et al.*, 1987).

Nettoyage naturel. Lorsqu'ils sont laissés intacts, les hydrocarbures échoués sont éliminés naturellement par les processus côtiers. Le nettoyage naturel constitue une option de nettoyage pratique et efficace si l'on considère que la persistance des hydrocarbures sur le rivage n'aura pas d'effet dommageable. Sur le site de l'étude BIOS, le nettoyage naturel a été considéré comme une option acceptable (Owens *et al.*, 1987a); toutefois, en certains endroits où s'était formé un revêtement bitumineux, d'importantes quantités d'hydrocarbures persistaient après six ans. L'absence d'hydrocarbures dans les baies très touchées, mais abritées des vagues, dans le nord de la baie de Chedabucto, est attribuée au nettoyage naturel par floculation argile-hydrocarbures (Owens *et al.*, 1993b). Les marais se rétablissent de façon naturelle en quelques années à peine, et, à l'exception de certains milieux abrités lorsque se forme un revêtement bitumineux ou lorsque d'importants volumes d'hydrocarbures sont échoués sur le rivage, le nettoyage naturel des plages et des rivages rocheux est probablement efficace dans une période maximale de une ou deux années.

3.6.5 Méthodes de nettoyage et types de littoral

Côtes rocheuses. Il est souvent difficile d'éliminer les hydrocarbures échoués sur les côtes rocheuses étant donné que l'accès au littoral est limité. Le lavage à basse pression est généralement efficace dans de tels cas, et les hydrocarbures dispersés devraient être confinés et récupérés à la surface de l'eau. La récupération manuelle et les systèmes à vide peuvent être utiles lorsque les hydrocarbures sont concentrés dans des creux et des dépressions. Le lavage à haute pression, le nettoyage à la vapeur et le décapage au sable sont déconseillés étant donné que ces techniques délogent la totalité des plantes et des animaux; cependant, si les animaux et les plantes ont déjà été tués par les hydrocarbures, ces techniques de nettoyage, ainsi que l'utilisation de dispersants chimiques, pourraient se révéler bénéfiques étant donné qu'elles favorisent l'amorce de la recolonisation. Les blocs et les surfaces artificielles, comme les quais, les jetées et les ouvrages de protection longitudinale en béton, pierre ou métal, appartiennent à la même catégorie que les surfaces rocheuses. Ces surfaces (p. ex., Nepco 140 et *Amoco Cadiz*) ont souvent été nettoyées à l'aide de diverses techniques de dispersion.

Milieux vaseux. Il arrive souvent que les techniques de nettoyage soient peu pratiques ou efficaces sur les segments vaseux de la côte. À bien des endroits, la vase ne supporte pas le trafic piétonnier et l'accès n'est possible que par bateau ou barge, à marée haute. Lorsque l'accès est possible, le lavage à basse pression et le confinement des hydrocarbures peuvent être efficaces et des pompes à vide peuvent être utilisées pour récupérer les hydrocarbures accumulés dans les ruisseaux ou les puisards. Dans tous les cas, il faut éviter de mélanger ou d'enfouir les hydrocarbures, car de tels processus auraient pour effet d'accroître considérablement leur persistance.

Milieux sablonneux. Il est ironique de constater que les plages de sable sont les milieux côtiers les moins productifs sur le plan biologique, cependant elles sont probablement les plus faciles à nettoyer. La récupération mécanique des hydrocarbures à la surface de la plage à l'aide de décapeuses ou de niveleuses constitue une technique très rapide et très efficace qui cause peu de dommages biologiques, voire aucun. Les techniques manuelles sont utiles lorsque le

mazoutage est faible ou moyen, mais moins efficaces lorsque la zone est très mazoutée.

La dispersion et le mélange peuvent être d'une certaine utilité, à condition d'éviter d'enfouir les hydrocarbures. De telles précautions sont essentielles dans tous les cas, et il faut également éviter de mélanger les hydrocarbures avec des sédiments propres. Le nettoyage ne doit récupérer que les matériaux mazoutés étant donné qu'une récupération excessive de sédiments peut entraîner l'érosion des plages où l'apport de sédiments ne suffit pas à remplacer ceux qui ont été déplacés. Si des hydrocarbures légers ont contaminé une plage, il est probablement préférable de laisser le lavage naturel réduire le mazoutage au lieu d'enlever un volume considérable de matières pour récupérer une quantité relativement faible d'hydrocarbures.

Les dunes d'arrière-plage stabilisées par des graminées rustiques sont un important élément de nombreux systèmes de plages de sable. Les systèmes radiculaires des graminées des sables sont très étendus et sont à la base de la formation initiale et de la stabilité continue des dunes. La circulation inutile de personnes ou de véhicules, qui a des effets sur les graminées ou leurs racines, peut entraîner l'érosion éolienne rapide des sables déstabilisés. Dans le cas des opérations de nettoyage des plages de sable, il importe de restreindre l'accès à travers les dunes à seulement quelques endroits judicieusement choisis qui, au besoin, peuvent être replantés afin de restaurer les dunes après les travaux de nettoyage.

Les battures de sable sont plus difficiles à nettoyer que les plages de sable, étant donné que de nombreux types de véhicules peuvent s'y enliser ou mélanger des sédiments propres avec des sédiments mazoutés. Dans ce type de milieu, tout comme dans les slikkes, il faut, dans la mesure du possible, essayer de protéger la zone à l'aide de barrages d'isolement ou de déviation. Les hydrocarbures échoués peuvent être délogés par lavage à faible pression ou avec des pompes sous vide, à l'aide de tranchées ou de puits de collecte.

Plages de sable et de gravier. Le nettoyage des littoraux de sable et de gravier se limiterait principalement aux techniques manuelles étant donné que la machinerie exercerait une faible traction et qu'elle risquerait de mélanger ou d'enfouir les hydrocarbures, ralentissant ainsi le processus de nettoyage au lieu de l'accélérer. L'approvisionnement de la zone littorale en gravier est très lent, c'est pourquoi il faudrait éviter autant que possible l'élimination de grandes quantités de sédiments avec la machinerie afin d'empêcher l'érosion de la plage. L'élimination manuelle constitue une méthode lente mais efficace de récupération des hydrocarbures de surface. Les techniques de lavage, à basse pression ou par dispersion de produits chimiques, permettraient, sur les côtes exposées, de pousser les hydrocarbures de la plage dans des tranchées préparées ou à la surface des eaux côtières pour y être recueillis (figure 85). Le brassage peut s'avérer efficace pour déloger les hydrocarbures des sédiments lorsque le pétrole n'est pas enfoui et que l'activité des vagues est suffisante. Ces hydrocarbures devraient être confinés et récupérés à la surface de l'eau afin d'éviter le mazoutage du littoral. Ces techniques de nettoyage causent très peu de dommages biologiques, voire aucun, à ce milieu relativement stérile, bien que dans les endroits abrités, l'utilisation d'agents de dispersion ne soit pas recommandée étant donné que les hydrocarbures ainsi dispersés ne peuvent être lavés que très lentement de la plage.

Plages de gravier et de cailloux. La seule différence majeure entre les plages de gravier et de cailloux et celles de sable et de gravier provient du fait que les techniques de lavage sont peut-être plus faciles à appliquer et plus efficaces sur les plages de cailloux étant donné que les hydrocarbures dispersés peuvent être déplacés rapidement à travers ces sédiments très poreux. En général, les bulldozers sont le seul genre d'équipement lourd qui peut fonctionner sur ce type de substrat. Il faudrait éviter d'enlever des sédiments, dans la mesure du possible, étant donné que le remplacement naturel de ce matériau grossier est très lent. À l'instar des plages de sable et de gravier, le brassage est une option possible lorsque l'action des vagues est suffisante pour récupérer les hydrocarbures ainsi libérés.

Marais. Les dommages qui pourraient être causés par les hydrocarbures, et les difficultés des interventions efficaces et efficientes en milieu palustre rendent les méthodes de protection hautement prioritaires, lorsque celles-ci peuvent être appliquées. Cela peut s'avérer difficile dans les larges estuaires aux courants rapides, ou dans les zones où la lisière du marais couvre une grande étendue. Des barrages ou des digues ont déjà été utilisés à l'embouchure de ruisseaux pour isoler les hydrocarbures, mais, dans de tels cas, il importe de prévoir, dans la mesure du possible, un mécanisme laissant l'eau entrer dans le réseau de canaux et en sortir. Si ce réseau est simplement bloqué, les animaux intertidaux qui ont besoin d'eau à chaque cycle de marée pourraient périr et ceux qui ont besoin d'air pourraient se noyer. Si une faible quantité d'hydrocarbures atteint le marais, elle pourrait probablement se dégrader naturellement et elle n'aurait alors que des effets localisés. Une zone très mazoutée peut être nettoyée efficacement à l'aide de techniques de lavage à basse pression qui causent peu de dommages aux plantes et aux animaux. Ce type d'opération peut nécessiter le creusage de tranchées pour dévier les hydrocarbures dans des zones de collecte préparées. Dans la mesure du possible, les opérations de nettoyage devraient être conduites à partir de petites embarcations afin d'éviter les déplacements à pied ou en voiture dans le marais. La coupe de la végétation mazoutée, le brûlage ou l'élimination manuelle ne sont habituellement pas recommandés étant donné que ces techniques peuvent perturber les réseaux radiculaires ou retarder le rétablissement des plantes. Si on peut couper les plantes sans endommager leurs racines, le rétablissement pourra se faire en l'espace d'un an. Les techniques mécaniques et le déplacement des véhicules devraient être évités à tout prix, bien qu'un chargeur frontal ou une benne preneuse opérant à partir d'une barge puisse constituer une méthode efficace et acceptable de récupération des hydrocarbures lorsque ces derniers sont échoués à la lisière d'un marais. La restauration des marais peut se produire rapidement à condition que les dommages causés par les hydrocarbures ou les opérations de nettoyage ne soient pas trop importants.

Côtes arctiques. Les techniques de protection et de nettoyage des déversements d'hydrocarbures sont les mêmes pour les littoraux de l'Arctique que pour les littoraux semblables des basses latitudes. La glace qui se trouve le long du littoral ressemble à un affleurement rocheux, sauf que la surface fondra rapidement durant les mois d'été, libérant les hydrocarbures qui se seront échoués dans les eaux côtières ou précôtières adjacentes. Cependant, les interventions dans l'Arctique sont entravées par l'éloignement de nombreuses régions, en termes d'accessibilité, de ressources locales disponibles, de logistique ainsi que par le

climat. L'absence de main-d'oeuvre, d'équipement et d'installations de transport, partout, à l'exception de rares zones localisées, fait que ces interventions constituent une tâche difficile (Owens et Robilliard, 1981). En cas d'opérations de nettoyage, il faut accorder une attention particulière au stockage, au transport et à l'élimination des hydrocarbures et des matériaux mazoutés récupérés. À ces difficultés viennent s'ajouter les problèmes d'un climat inhospitalier qui affecte grandement l'efficacité et l'efficience des personnes et des machines, aussi bien à terre que dans les eaux côtières. Les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique ne menacent pas directement la vie des humains, mais cette région est un milieu où il est difficile de travailler et où il peut être plus dangereux d'essayer de nettoyer un déversement dans les conditions de pack glaciaire ou de voile blanc.

3.7 Gestion et élimination des déchets

La manipulation des hydrocarbures et des matériaux mazoutés récupérés peut présenter des problèmes à la fois immédiats et à long terme. Les mélanges d'hydrocarbures et d'eau peuvent être séparés dans des réservoirs de traitement et les hydrocarbures ainsi récupérés peuvent être envoyés dans une raffinerie. L'élimination des débris mazoutés est plus difficile.

La plupart des aspects de la gestion des déchets comprennent la récupération physique des hydrocarbures et des débris mazoutés. Ces activités permettent de récupérer des mélanges d'hydrocarbures et d'eau, d'hydrocarbures et de sédiments, et d'hydrocarbures et de débris. La teneur en hydrocarbures des matériaux récupérés est variable, mais, en moyenne, elle est généralement inférieure à 1 % en poids. Même un déversement relativement mineur peut donc produire de grandes quantités de matériaux résiduaires. L'élimination de déchets mazoutés peut être difficile sur le plan de la logistique et, s'ils ne sont pas manipulés rapidement, ces déchets peuvent entraver ou compromettre les opérations de nettoyage.

3.7.1 Traitement in situ

La minimisation des déchets est un des objectifs des interventions en cas de déversement d'hydrocarbures et il faut tenir compte des options autres que la récupération physique, notamment le traitement *in situ* et le rétablissement naturel, au cours de la planification de ces opérations. Un programme de gestion des déchets porte sur toutes les étapes entre la collecte initiale des matériaux et leur élimination finale :

- collecte;
- tri des différents types de déchets à la source;
- emballage et entreposage temporaire sur place;
- transport;
- entreposage temporaire à l'extérieur du site;
- élimination.

Les techniques de minimisation des déchets ont des avantages considérables par rapport à l'élimination globale des déchets, principalement pour le traitement des sédiments (Marty *et al.*, 1993). Le traitement *in situ* a pour but d'accélérer le rétablissement naturel de la zone littorale en choisissant les options qui font appel à des activités sur place sans exiger l'élimination

des déchets à l'extérieur du site. Le traitement *in situ* est l'option souhaitable en termes de minimisation des déchets.

Il existe plusieurs techniques pour traiter sur place les sédiments et autres matériaux mazoutés tout en minimisant ou en éliminant la production de déchets. Ces techniques sont appelées mesures de traitement *in situ*, notamment :

- biorestauration;
- traitement chimique;
- brûlage des billes/débris;
- déplacement dans la zone de déferlement;
- labourage des sédiments;
- rétablissement naturel.

Lorsqu'il est utilisé de façon appropriée, le brûlage *in situ* des hydrocarbures déversés dans les eaux côtières est rapide, mais il doit être effectué avant que les hydrocarbures s'étalent, avant qu'ils ne perdent leurs éléments volatils et que des émulsions ne commencent à se former (Allen, 1988). Le brûlage *in situ* a permis de détruire de façon efficace les hydrocarbures flottants lors de plusieurs incidents, notamment le plus récent, celui de l'*Exxon Valdez,* au cours duquel des brûlages d'essai ont permis d'éliminer 98 % des hydrocarbures à la surface de l'eau (Allen, 1991). Le brûlage *in situ* ne permet pas toujours une combustion complète, mais la quantité de résidus est relativement très petite et la réduction du volume des matériaux à éliminer est considérable.

Les mesures de traitement *in situ* sont privilégiées, étant donné :

- que les matériaux restent sur place, diminuant ainsi les risques d'érosion;
- que les techniques sont relativement rapides et augmentent l'efficacité du nettoyage;
- que les techniques nécessitent une main-d'oeuvre peu nombreuse et diminuent les incidences environnementales secondaires du nettoyage et de l'élimination.

Le traitement *in situ* est également souhaitable étant donné que ce type de technique réduit les coûts des opérations. Les coûts sont une préoccupation constante lors des interventions en cas de déversement et ils augmentent lorsque les déchets mazoutés sont éliminés à l'aide d'un procédé élaboré ou à une grande distance du site du déversement. Le traitement *in situ* et la minimisation des déchets permettent de diminuer les coûts de transport et d'élimination.

3.7.2 Méthodes de nettoyage et production de déchets

Les méthodes de traitement ou de nettoyage utilisées lors d'une intervention en cas de déversement d'hydrocarbures produisent différentes quantités et divers types de déchets (tableau 20). En général, plusieurs techniques sont appliquées et plusieurs types de déchets sont produits sur un site de nettoyage (Owens *et al.*, 1992). Les interventions produisent des hydrocarbures, des débris mazoutés ainsi que des déchets non mazoutés. Dans certains cas, les matériaux mazoutés peuvent être traités sur place (traitement *in situ*) ou laissés en vue de leur élimination naturelle.

Tableau 20 Déchets produits par les méthodes de nettoyage du littoral

Méthode de nettoyage / traitement	Production de déchets		
	Quantité	**Type**	
Déplacement dans la zone de déferlement	Aucune	-	
Labourage des sédiments	Aucune	-	
Biorestauration	Aucune	-	
Brûlage des billes/débris	Faible	Solides	Certains résidus du brûlage
Traitement chimique	Aucune	-	
Rétablissement naturel	Aucune	-	
Récupération manuelle	Moyenne	Solides	Sédiments, débris mazoutés, etc.
Récupération mécanique	**Grande**	Solides	Sédiments, débris mazoutés, etc.
Vide/écrémage	**Grande**	Liquides	Hydrocarbures et eau mazoutée
Coupe de la végétation	Moyenne	Solides	Matières organiques mazoutées
Décapage au sable	**Grande**	Solides	Sable mazouté
Inondation	**Grande**	Liquides	Hydrocarbures et eau mazoutée
Lavage	**Grande**	Liquides	Hydrocarbures et eau mazoutée
Lavage ponctuel	Moyenne	Liquides	Hydrocarbures et eau mazoutée
Nettoyage à la vapeur	Moyenne	Liquides	Hydrocarbures et eau mazoutée
Lavage des sédiments	Faible	Liquides	Hydrocarbures et eau mazoutée
Collection passive	Faible	Solides	Sorbants mazoutés

Les termes *grande, moyenne et petite* du tableau 20 ne sont mentionnés qu'à titre d'indication pour préciser les quantités relatives d'hydrocarbures et de déchets mazoutés qui peuvent être directement produites par les opérations. Ces termes sont destinés à faciliter la planification de la minimisation des déchets et ne tiennent pas compte des déchets produits par l'opération en soi (p. ex., vêtements souillés). En général, les techniques manuelles produisent d'autres déchets associés au personnel de soutien sur le terrain. Bien que la quantité de déchets produits lors d'un déversement soit liée directement à la quantité d'hydrocarbures déversés et à l'envergure des interventions, chacune des techniques de nettoyage du littoral produit des quantités et des types différents de déchets.

3.7.3 Types de déchets produits lors du nettoyage

Les opérations d'intervention et le nettoyage peuvent produire une variété de matières résiduaires, allant des hydrocarbures récupérés aux détritus ordinaires produits par les activités humaines. En général, les déversements d'hydrocarbures persistants,

comme le pétrole brut ou le mazout lourd, produisent des quantités de déchets mazoutés supérieures à celles produites par des hydrocarbures moins persistants, comme les bruts légers et les produits tel le diesel (ITOPF, 1987). Les solides et les liquides mazoutés prédominent généralement, mais les opérations types produisent également des matières résiduaires contaminées par des solvants, des dispersants et des combustibles; des eaux grises et des détritus non mazoutés.

La méthode d'élimination de ces déchets est souvent déterminée une fois le nettoyage terminé. La stratégie privilégiée de gestion des déchets consiste à trier les déchets dès qu'ils sont produits en catégories établies en fonction de leurs propriétés. Les matériaux suivant la même voie de transport et d'élimination peuvent être mélangés une fois les options d'élimination établies.

Toute la gamme des matériaux résiduaires possibles a été divisée en neuf catégories :

- liquides mazoutés;
- matériaux artificiels mazoutés;
- matières organiques naturelles mazoutées, petites et moyennes;
- matières organiques mazoutées, grosses et énormes;
- matières inorganiques mazoutées naturelles (sédiments);
- liquides non mazoutés contenant des solvants, des dispersants ou des combustibles;
- solides non mazoutés mélangés à des solvants, des dispersants ou des combustibles;
- eau et eaux usées non mazoutées;
- détritus non mazoutés.

Dans la plupart des opérations de nettoyage, l'établissement d'un site d'élimination temporaire des déchets mazoutés à proximité de la zone de nettoyage constitue une étape très importante avant le transport des hydrocarbures et des matières contaminées vers leur site d'élimination finale (Foget *et al.*, 1979).

3.7.4 Élimination des déchets

Il existe plusieurs méthodes d'élimination, notamment la séparation des hydrocarbures et de l'eau, l'enfouissement et la dégradation naturelle (CONCAWE, 1981). La méthode choisie dépend de la nature des matières contaminées par les hydrocarbures ainsi que de l'emplacement du déversement. La séparation des hydrocarbures et de l'eau peut se faire dans les installations existantes de traitement et de séparation qui se trouvent dans les raffineries ou sur les lieux de production du pétrole. Cependant, lorsque le déversement est mineur ou qu'il se produit à une grande distance de ces installations, des séparateurs efficaces peuvent être construits afin de récupérer les hydrocarbures avec des barils de 55 gallons (208 litres) ou des feuilles de métal soudées. Une deuxième méthode utilisée pour récupérer les hydrocarbures dans un puisard naturel ou excavé consiste à utiliser un baril ou un réservoir portatif quelconque afin de pouvoir séparer les hydrocarbures de l'eau. Plusieurs méthodes innovatrices d'élimination ont été mises au point pour les endroits les plus reculés, notamment une variété de techniques de brûlage et d'incinération (p. ex., Swiss *et al.*, 1985; Wotherspoon et Swiss, 1986). D'autres informations sur la gestion et l'élimination des déchets se trouvent dans ITOPF(1987), Owens *et al.*

(1993a), EPA (1977) et van Oudenhoven *et al.* (1980).

3.8 Restauration

La restauration doit être considérée comme une façon de minimiser les dommages causés par un déversement d'hydrocarbures ou les mesures d'intervention. Avant de mettre en oeuvre une opération de nettoyage, il faut tenir compte des dommages qui pourraient être causés par les mesures de nettoyage et de la façon de les réparer une fois les travaux de nettoyage terminés. Il peut être préférable de remplacer les sédiments de la plage si, par exemple, l'enlèvement des sédiments mazoutés a réduit considérablement le volume de matériaux de la plage ou a abaissé la crête de la plage sous le niveau normal des marées hautes de vives-eaux. En règle générale, le matériau de remplacement devrait toujours être de taille égale ou plus grosse que celui qui a été enlevé. Dans les cas où des animaux ou des plantes ont été délogés ou endommagés par des hydrocarbures ou le nettoyage, il serait peut-être possible de faciliter leur rétablissement en recolonisant ou en replantant certaines espèces clés. Les graminées de marais et de dunes peuvent être replantées lorsque les dommages causés aux plantes ou à leurs racines entraîneraient vraisemblablement l'érosion du substrat. La restauration des dunes peut également nécessiter la mise en place de clôtures pour emprisonner le sable avant de procéder à la plantation.

Les côtes du Canada

4.1 Introduction

Le Canada est entouré par trois océans et s'étend des latitudes moyennes à l'Extrême-Arctique (44° N. à 83° N.) (figure 91); ses côtes mesurent 250 000 kilomètres de long (tableau 21). Le Canada borde en outre le système des Grands Lacs, le plus vaste bassin d'eau douce du monde (245 000 km^2).

La physionomie du Canada se compare à un grand bassin centré sur le Bouclier canadien (bouclier laurentien), noyau de roches anciennes et résistantes correspondant à 50 % de la superficie totale. Le centre de ce bassin est aujourd'hui occupé en partie par une vaste mer intérieure, la baie d'Hudson. Le Bouclier est bordé de régions montagneuses, soit la Cordillère à l'ouest, les Appalaches au sud-est, les massifs montagneux du Labrador et l'île Baffin à l'est et la chaîne Inuitienne au nord.

Les côtes du Canada sont si longues et couvrent une gamme si étendue de milieux géologiques et océanographiques qu'il n'est pas étonnant d'y retrouver tous les principaux types de littoraux, à l'exception de ceux associés aux côtes tropicales (coralliennes ou à mangroves). La côte est en majeure partie rocheuse (tableau 22) et la présence de plages s'explique par l'érosion locale de la roche en place ou de sédiments d'origine glaciaire. Dans les régions d'accumulation de sédiments et de formation de plages, on observe généralement un placage relativement mince de sédiments sur la roche en place. Il existe quelques exceptions notables : les milieux deltaïques des fleuves Mackenzie et Fraser, la côte de la mer de Beaufort et la région de la baie James et du sud de la baie d'Hudson.

Dans tout le Canada, la côte a été modelée lors des périodes glaciaires. Ainsi, la dernière glaciation a atteint son maximum il y a environ 18 000 ans; elle couvrait alors presque tout le pays et de nombreuses régions marines adjacentes. Le niveau relatif des mers a baissé de 100 m par endroits; simultanément, les terres se sont enfoncées parfois jusqu'à 200 m. Le modelé d'origine glaciaire, tel les fjords, domine la côte de la Colombie-Britannique, de Terre-Neuve, du Labrador et de l'île de Baffin. Quoique moins évident, le surcreusement des bassins et vallées, tels la baie d'Hudson, le détroit de Lancaster et bon nombre de chenaux de l'archipel arctique est aussi d'origine glaciaire. L'emplacement et la nature des bassins des Grands Lacs résultent de l'affouillement de l'inlandsis qui a progressé vers le sud en quatre grandes avancées. Sous le poids de l'inlandsis, la croûte terrestre s'est affaissée dans une grande partie du pays; les effets du rajustement sont manifestes aujourd'hui sur toutes les côtes marines, avec encore des variations du niveau des mers. Ces variations eustatiques présentent parfois un caractère étonnamment complexe qui n'a pas encore été entièrement élucidé partout. L'effet de ce rajustement se fait le plus sentir dans la partie centrale de l'Arctique, notamment dans la baie d'Hudson, près du coeur de l'inlandsis. Là, la croûte s'est enfoncée sous le poids de la glace de telle sorte que, lorsque la mer a envahi le continent après la déglaciation, le niveau des eaux dans le golfe Richmond

Tableau 21 Longueur du littoral (d'après Cooper *et al.*, 1971; Canada-États-Unis, 1977)

Littoral		Longueur totale (km)	
Côte pacifique		25 717	(10,14 %)
Île de Vancouver	3 496		
Îles de la Reine-Charlotte	2 623		
Côte arctique		172 950	(68,22 %)
Îles de la Reine-Élisabeth	34 259		
Baie d'Hudson	13 348		
Île de Baffin	28 302		
Île d'Ellesmere	10 747		
Île Victoria	7 089		
Île Devon	3 588		
Île Melville	3 107		
Île Axel Heiberg	3 060		
Île Prince of Wales	2 576		
Côte atlantique		45 369	(17,90 %)
Baie de Fundy	1 413		
Golfe du Saint-Laurent	7 496		
Terre-Neuve/Labrador	13 656		
Île du Cap-Breton	1 883		
Île-du-Prince-Édouard	1 260		
Grands Lacs*		9 471	(3,74 %)
Lac Supérieur	2 380		
Rivière St. Mary's	207		
Lac Huron	4 810		
Rivières Sainte-Claire/Détroit	340		
Lac Érié	639		
Rivière Niagara	58		
Lac Ontario	618		
Fleuve Saint-Laurent	419		
Total, terre ferme	[4 376]		
Total, îles	[5 095]		
TOTAL		253 507	
Trait de côte total, continent		63 592	(74,9 %)
Trait de côte total, îles		189 915	(25,1 %)
Trait de côte au nord du cercle polaire		110 863	(43,7 %)

* Longueur au Canada

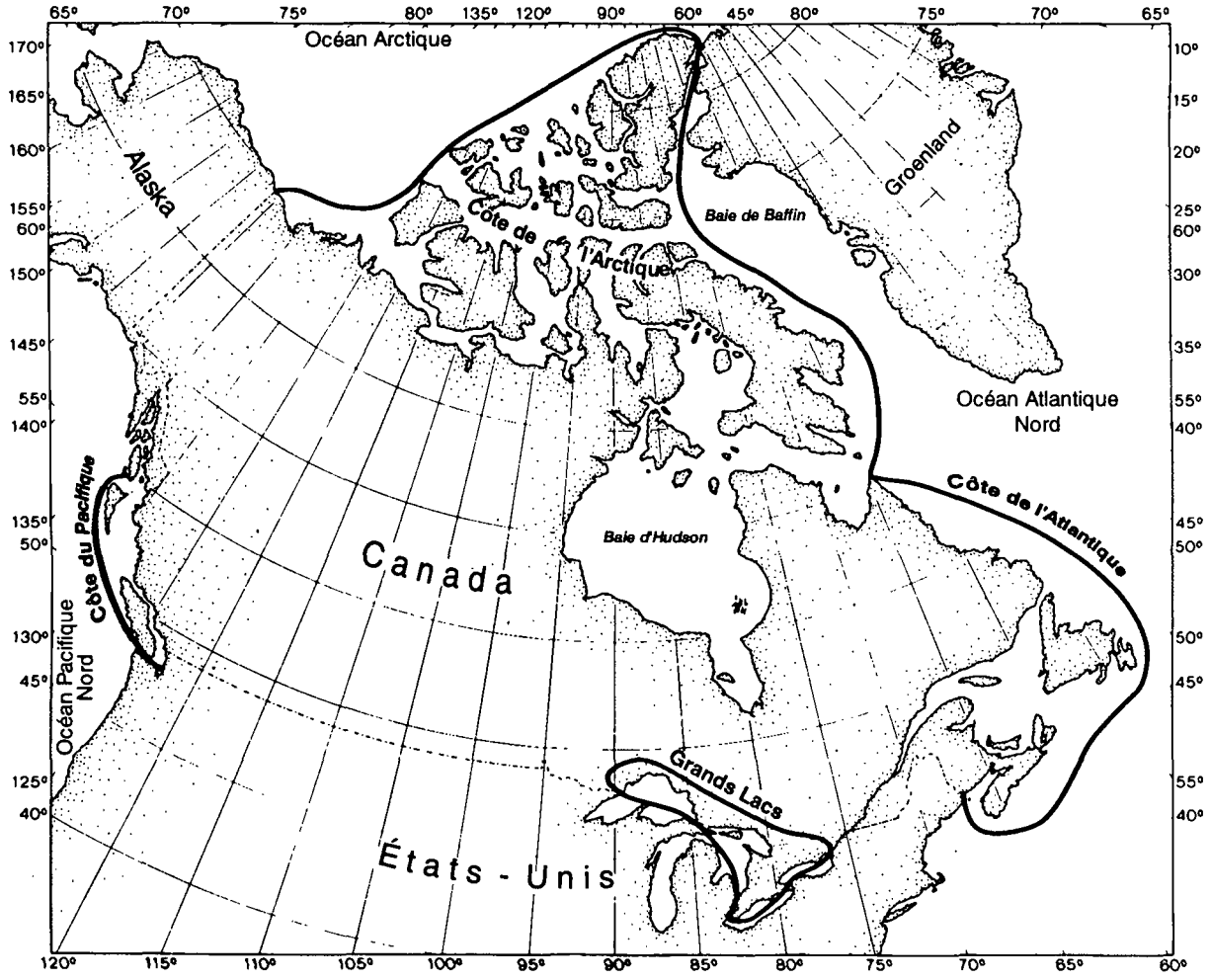


Figure 91 **Principales subdivisions des côtes du Canada**

Tableau 22 **Fréquence relative estimée des types de littoraux** (tiré de S.L. Ross Ltd., 1984)

Type de littoral	C.-B.	Grands Lacs	Atlantique	Arctique	TOTAL
Sable	4	30	10	20	17 %
Gravier	7	25	20	30	25 %
Cailloux	3	10	15	13	12 %
Blocs	2	5	5	10	8 %
Battures intertidales	2	--	10	5	6 %
Marais	2	5	5	2	3 %
Roche en place	80	25	35	20	29 %

était à plus de 300 m au-dessus du niveau actuel de la mer (Peltier et Andrews, 1983). On observe d'ailleurs, dans de nombreuses régions côtières de l'Arctique et de la baie d'Hudson, des plages soulevées, anciennes, qui ne sont plus aujourd'hui soumises à l'action de la mer. Le relèvement du continent se poursuit toujours et s'accompagne d'un abaissement du niveau relatif de la mer qui atteint 1,0 m/siècle dans certaines parties de la baie d'Hudson et ce, malgré une tendance mondiale de remontée du niveau marin de l'ordre de 0,1 m/siècle. Au contraire, les côtes atlantiques du Canada ont été ennoyées par endroits à cause d'un relèvement du niveau relatif de la mer d'environ 0,4 m/siècle. Les sédiments grossiers (galets, cailloux, blocs) qui parsèment les côtes dans tout le pays ont été formés par les inlandsis et les glaciers sous l'effet des processus d'érosion, de transport et de dépôt. Ainsi, de nombreuses plages canadiennes sont constituées de dépôts glaciaires remaniés; les plages sont souvent minces ou inexistantes lorsque cet apport de sédiments est limité ou nul.

4.2 Milieux côtiers et subdivisions

La principale division des côtes canadiennes tient compte des processus physiques qui s'exercent sur le littoral ainsi que de la géologie et du relief de la zone côtière (tableau 23, figure 91). Dans chacune des quatre principales unités, on a établi des subdivisions secondaires en fonction d'éléments géologiques et océanographiques. On a ainsi obtenu 34 milieux côtiers. La région de l'Arctique, qui englobe plus des deux tiers des côtes totales du Canada, est de loin l'unité la plus importante, ce qui s'explique en partie par l'immensité de l'archipel. Dans chacun des 34 milieux côtiers, il peut exister des variations considérables dans les types de littoraux mais, compte tenu de l'échelle de la présente étude, ces différences sont négligeables par rapport à l'homogénéité générale de la région. L'approche choisie dans le cadre du présent rapport consiste à subdiviser les milieux côtiers afin de pouvoir procéder à un examen plus détaillé et d'intégrer cet examen dans un contexte de caractéristiques régionales plus générales. Chacune des quatre divisions principales fait d'abord l'objet d'une présentation générale, puis d'un examen plus détaillé des milieux côtiers constitutifs.

Le présent rapport ne traite que les caractéristiques générales des côtes canadiennes; des études plus détaillées des milieux côtiers de la baie de Fundy, des Grands Lacs, de l'Île-du-Prince-Édouard et des Maritimes, et fondées sur la même approche, sont présentées ailleurs (respectivement, Owens, 1977b, 1979a,b; Owens et Bowen, 1977). D'autres publications donnent de brefs résumés régionaux des caractéristiques côtières des principales régions pour les côtes de l'Atlantique (McCann, 1985), de l'Arctique (Bird, 1985), de la Colombie-Britannique (Harper et Owens, 1983; Owens et Harper, 1985) et des Grands Lacs (Carter et Haras, 1985).

4.3 Milieux côtiers du Pacifique

Au Canada, la côte du Pacifique est divisée en six milieux, en fonction de l'exposition aux vagues et des caractéristiques géologiques de la zone littorale (figure 92 et tableau 24). Étant donné la nature complexe de cette côte, on peut y observer de nombreuses variations locales, mais, aux fins du présent rapport, on ne considérera que les caractéristiques générales de la côte.

Tableau 23 Caractéristiques des principales unités côtières du Canada

	Vagues/marées	Climat	Géologie/relief	Zone côtière
Côte du Pacifique	Milieu exposé; hydrodynamisme élevé sur les côtes exposées; hauteurs de vagues >1,5 m, 40 à 50 % de l'année; marnage : de 2 à 5 m.	Étés chauds, hivers frais; vents généralement de l'ouest en hiver et du sud-est en été.	Montagnes élevées (Cordillère), roches résistantes : le trait de côte suit les directions structurales nord-ouest-sud-est.	Côte rocheuse complexe d'îles, de bras de mer et de fjords; rareté de sédiments sauf en quelques endroits (p. ex., deltas du Fraser et de la Skeena, plaine Argonaut).
Côte de l'Arctique	Milieu abrité; hydrodynamisme très faible et courte saison d'eau libre; hauteurs de vagues >1,5 m moins de 20 % de la période d'eau libre; marées <3 m sauf dans la région du détroit d'Hudson.	Étés froids et courts, hivers froids et très longs; glace présente sur la mer et les plages de 6 à 12 mois par année.	Relief généralement bas dans l'ouest et dans la baie d'Hudson; côtes montagneuses sur les bordures orientales; en grande partie un archipel.	Littoraux très variés allant du delta du Mackenzie et de la plateforme de glace d'Ellesmere aux côtes à fjords; littoraux généralement rocheux.
Côte de l'Atlantique	Milieu d'ondes de tempête; hauteurs de vagues >1,5 m de 30 à 40 % de la saison d'eau libre; glace présente jusqu'à 4 mois par année; marnage <2 m sauf dans la baie de Fundy, l'estuaire du Saint-Laurent et le nord du Labrador.	Étés chauds, hivers froids; glace sur le littoral au moins 3 mois chaque année sauf dans le sud de Terre-Neuve, la côte extérieure de la Nouvelle-Écosse et la baie de Fundy.	Segment nord des Appalaches; relief généralement faible sauf dans le nord du Labrador; surtout roches résistantes.	Côte rocheuse à l'exception des cordons littoraux du golfe du Saint-Laurent et des battures intertidales de sable ou de vase de la baie de Fundy et de l'estuaire du Saint-Laurent.
Rives des Grands Lacs	Milieu abrité à faible hydrodynamisme; hauteurs de vagues >1,5 m de 20 à 30 % de la période d'eau libre; milieu non soumis à la marée, les fluctuations des niveaux des lacs peuvent atteindre 0,8 m sur un an.	Étés chauds à très chauds, hivers froids; glace sur les lacs et les plages 3 à 4 mois chaque année, il est rare que les lacs soient complètement gelés.	Lac Supérieur et bordure de la baie Georgienne - roches résistantes du Bouclier canadien; ailleurs, roches moins résistantes fréquemment recouvertes de dépôts glaciaires meubles.	Surtout falaises basses; vastes accumulations de sédiments à quelques endroits.

En 1977, la côte de la Colombie-Britannique avait été peu étudiée et on disposait donc de peu d'informations sur la distribution des types de rivages, sur les processus littoraux et sur les taux de changement des littoraux. Depuis lors, d'importantes études des caractéristiques physiques des littoraux (Clague et Bornhold, 1980) et de l'océanographie physique (Thomson, 1981) ont permis d'avoir une bonne vue d'ensemble de la zone côtière. Grâce à des études détaillées de certains sites, notamment dans les régions du sud et dans la partie sud de l'île de Vancouver, on possède des informations locales détaillées et on comprend mieux les processus qui s'exercent sur les côtes de cette région (Canada, 1974, 1975a,b, 1976a,b,c, 1977, 1979; Eis et Craigdallie, 1980; Environnement Canada, 1981; Groves *et al.*, 1988; Hale et McCann, 1982; Harper, 1980a,b, 1981; Harper *et al.*, 1992; Holden, 1980; Howes et Harper, 1984; Krauel, 1980; McCann et Hale, 1980; Owens, 1980b, 1981; Woodward-Clyde Consultants, 1982a). Dans presque tout le reste de la province on

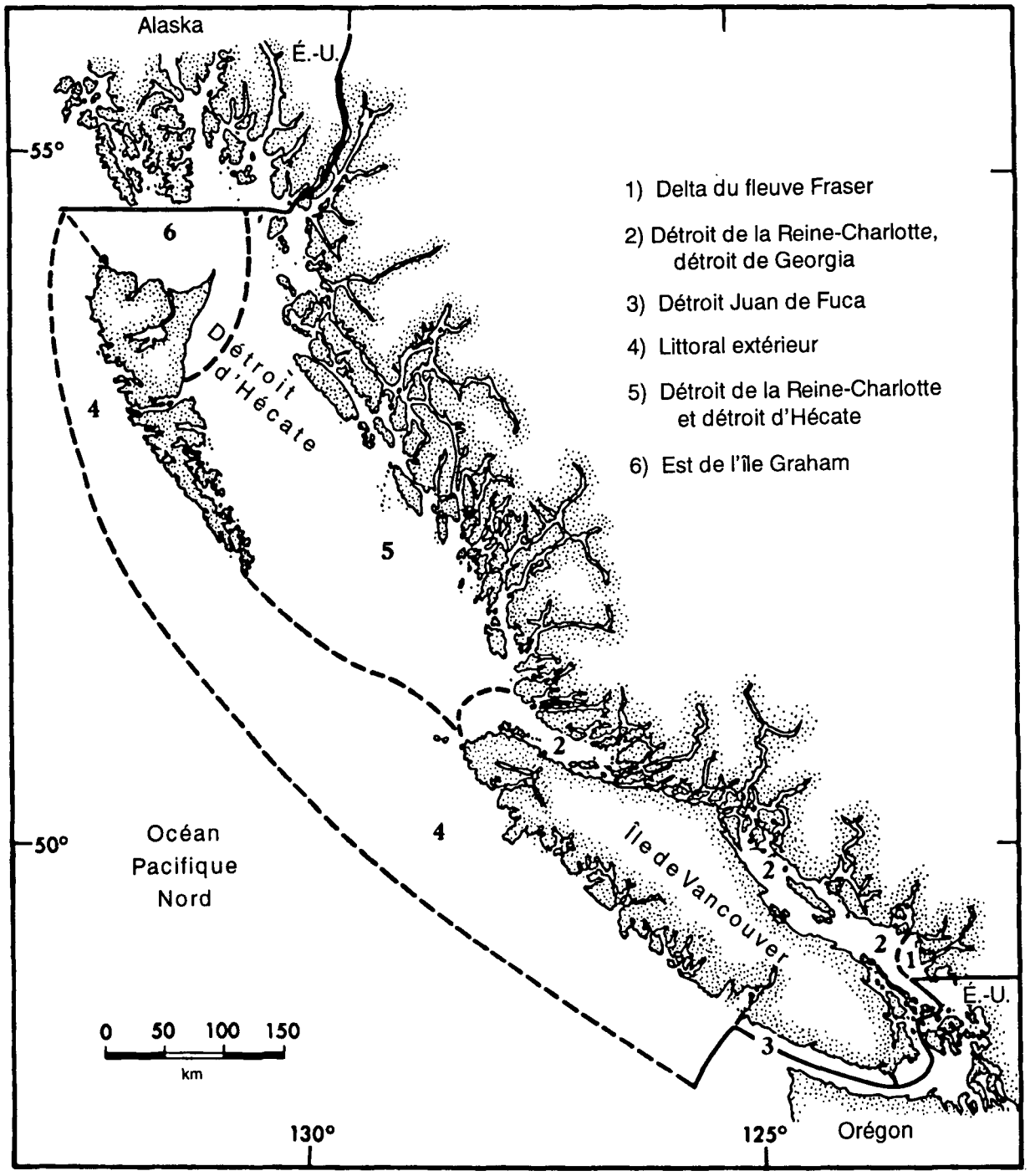


Figure 92 **Milieux côtiers du Pacifique** (*cf.* tableau 24)

Tableau 24 Caractéristiques des milieux de la côte du Pacifique

	Caractéristiques géologiques	Zone côtière		Fetch et exposition aux vagues	Marnage moyen (m)	Disponibilité des sédiments
		Haute-plage	Plage			
1. Delta du fleuve Fraser	Sédiments fins meubles; accumulations de matériaux transportés par les cours d'eau.	Basse : marais, généralement endigués.	Zone plane intertidale de sable et de boue atteignant 6 km de largeur à marée basse; *pas de plage.*	<50 km, très abrité.	3	Très abondants.
2. Détroit de Georgia	Roches ignées résistantes sur le continent; roches volcaniques et sédimentaires sur l'île de Vancouver.	Basse plaine côtière adossée à des montagnes entaillées par des fjords; falaises de roches moins *résistantes ou* de dépôts glaciaires.	Absente ou étroite avec galets et cailloux; près de dépôts glaciaires sur les côtes basses.	Atteignant 200 km; côtes extérieures exposées, très abritées ailleurs.	3	Rares; concentrés par endroits.
3. Détroit Juan de Fuca	Laves résistantes.	Basse plaine côtière; falaises atteignant jusqu'à 10 m.	Galets et cailloux, étroite à l'est; absente ou étroite à l'ouest, plateformes rocheuses intertidales.	De plus en plus abrité en direction de l'est; rive ouest très exposée.	2,5	Rares; concentrés par endroits.
4. Littoral extérieur du Pacifique	Laves ou roches volcaniques résistantes.	Montagnes ou hautes-terres entaillées par des fjords à versants raides; étroite plaine côtière sur l'île de Vancouver.	Absente ou étroite avec galets et cailloux; larges plages sablonneuses isolées près de dépôts glaciaires en cours d'érosion.	>1 000 km, exposé, hydrodynamisme très élevé; zone côtière intérieure abritée.	3	Très rares; concentrés en peu d'endroits.
5. Détroit de la Reine-Charlotte et détroit d'Hécate	Roches ignées résistantes sur la terre ferme; laves ou roches volcaniques sur les îles de la Reine-Charlotte.	Basses-terres côtières, puis montagnes ou hautes-terres découpées par des fjords.	Absente ou étroite avec galets et cailloux; deltas de têtes de fjords.	300 à >1 000 km, rives extérieures exposées, zone côtière intérieure abritée.	3 à 5	Très rares; concentrés en quelques endroits.
6. Est de l'île Graham	Dépôts glaciaires non consolidés ou sable et gravier fluvioglaciaires.	Falaises atteignant 100 m de hauteur; relief <200 m.	Large plage de sable ou de sable et de gravier.	Jusqu'à 300 km, exposé.	3 à 5	Abondants.

n'a toutefois ni étudié, ni cartographié les caractéristiques et les processus côtiers. Certaines études ont porté sur les processus deltaïques dans les fjords (p. ex., Syvitski et MacDonald, 1982; Kostaschuk et McCann, 1983; Kostaschuk, 1985; Prior et Bornhold, 1986) ou sur les variations régionales du niveau marin (Clague *et al.*, 1982). Des données régionales sur l'écologie de la zone intertidale ont été fournies par Carefoot (1977) et Snively (1978). La présente section s'inspire essentiellement des études de Harper et Owens (1983).

Selon un premier inventaire régional des types de littoraux (Clague et Bornhold, 1980), près de 83 % de tout le littoral est formé de roche en place (tableau 25). Des relevés subséquents et plus détaillés ont permis de montrer que ce chiffre est probablement élevé et que 50 à 75 % des côtes sont formées de roche en place, parfois recouverte de sédiments (Environnement Canada, 1992). D'après deux études récentes (Environnement Canada, 1992; Harper *et al.*, 1992), plus de 50 % des côtes de la Colombie-Britannique se composent de sédiments, entrecoupés par endroits d'affleurements de la roche en place. La présence de sédiments constitue un facteur déterminant dans le comportement et le devenir des hydrocarbures échoués, d'autant plus que les sédiments sont, pour la plupart, de la taille des cailloux et des galets grossiers et que le sable recouvre à peine 10 % des plages. La roche en place est souvent présente, en affleurement ou directement, sous nombre de plages. La distribution régionale des formes du relief et des caractéristiques côtières est illustrée à la figure 93.

4.3.1 Vue d'ensemble de la côte du Pacifique

Au Canada, la côte du Pacifique représente 10,5 % (25 717 km) de tout le littoral océanique (voir tableau 21). Son tracé, avec ses montagnes et ses fjords, est fortement influencé par les traits structuraux. Les pics culminent à 4 000 m dans les chaînes côtières et la présence d'îles, de bras et de fjords donnent à cette côte un relief accidenté et irrégulier. Il s'agit d'une côte des moyennes latitudes, orientée vers l'ouest et exposée à des vagues engendrées dans le Pacifique Nord par les vents d'ouest dominants. La côte exposée est donc battue par les vagues de tempête à forte composante secondaire de houle (*cf.* division 1.2.1) et soumise à un hydrodynamisme élevé durant toute l'année. Au contraire, dans les régions abritées, l'hydrodynamisme est très faible.

Vents. Dans cette région, les vents dominants sont du nord-ouest en été et du sud-ouest en hiver. S'ajoutent à cette variation saisonnière distincte de direction des vitesses supérieures durant l'hiver à cause du passage régulier de systèmes de basse pression dans la région. À l'échelle locale, la variabilité considérable des directions de vent est due à l'effet topographique qui s'exerce dans la plupart des fjords et des vallées. Les données pour Victoria expliquent ainsi l'effet de canalisation du détroit Juan de Fuca.

Vagues. Sur les côtes exposées, la hauteur d'onde significative annuelle est de 2,2 m en haute mer (figure 94). Les vagues dépassent 3 m de hauteur 30 % du temps en hiver, mais seulement 5 % du temps en été (tableau 26). La côte extérieure est le plus souvent battue par des vagues de houle à longue période (jusqu'à 15 s) venant de l'ouest et la période de houle annuelle significative est de 10,9 s. La variation saisonnière de la hauteur de houle et de l'hydrodynamisme (figures 6 et 94) résulte de la plus grande intensité des vents d'ouest au-dessus du Pacifique Nord durant l'hiver. Ces vitesses supérieures sont

Tableau 25 **Fréquence (%) des principaux types de littoraux de la Colombie-Britannique et du sud de l'île de Vancouver**

a) **Nature du littoral, Colombie-Britannique** (tiré d'Environnement Canada, 1992)

	a) Colombie-Britannique	*b*) Détroit Juan de Fuca	*c*) Havre Sooke	*d*) Péninsule Saanich	*e*) Île Saltspring	*f*) Îles de la Reine-Charlotte
Roche en place						
Falaises rocheuses	83	31	25	3	38	29
Plateformes rocheuses		36	0	40	21,5	38
Sédiments						
Sable	14,5	11	4	30	0	4
Mixtes/gravier		19	44	14	33,5	21,5
Wadden (sable-vase)	0,5	4	25	5	6	7,5
Deltas	2	0	0	4	0	
Artificiel	4	4	2	4	1	0

Sources : *a*) Clague et Bornhold, 1980
b) Owens, 1981
c) Owens, 1981
d) Howes et Harper, 1984
e) Owens, 1980b
f) Groves *et al.*, 1988

b) **Présence des principaux substratums côtiers** (tiré de Harper *et al.*, 1992)

Emplacement	Source	Roche	Roche et sédiments	Sédiments
Sentier de la côte ouest	Harper, 1981	44 %	32 %	23 %
Détroit Juan de Fuca	Owens, 1981	44 %	7 %	49 %
Parc national Pacific Rim	Harper et Sawyer, 1983	38 %	32 %	31 %
Côte intérieure sud	Howes *et al.*, 1992	32 %	25 %	43 %
Réserve de parc national et réserve de parc marin national Moresby-Sud et Gwaii Haanas	Harper *et al.*, 1992	48 %	27 %	25 %

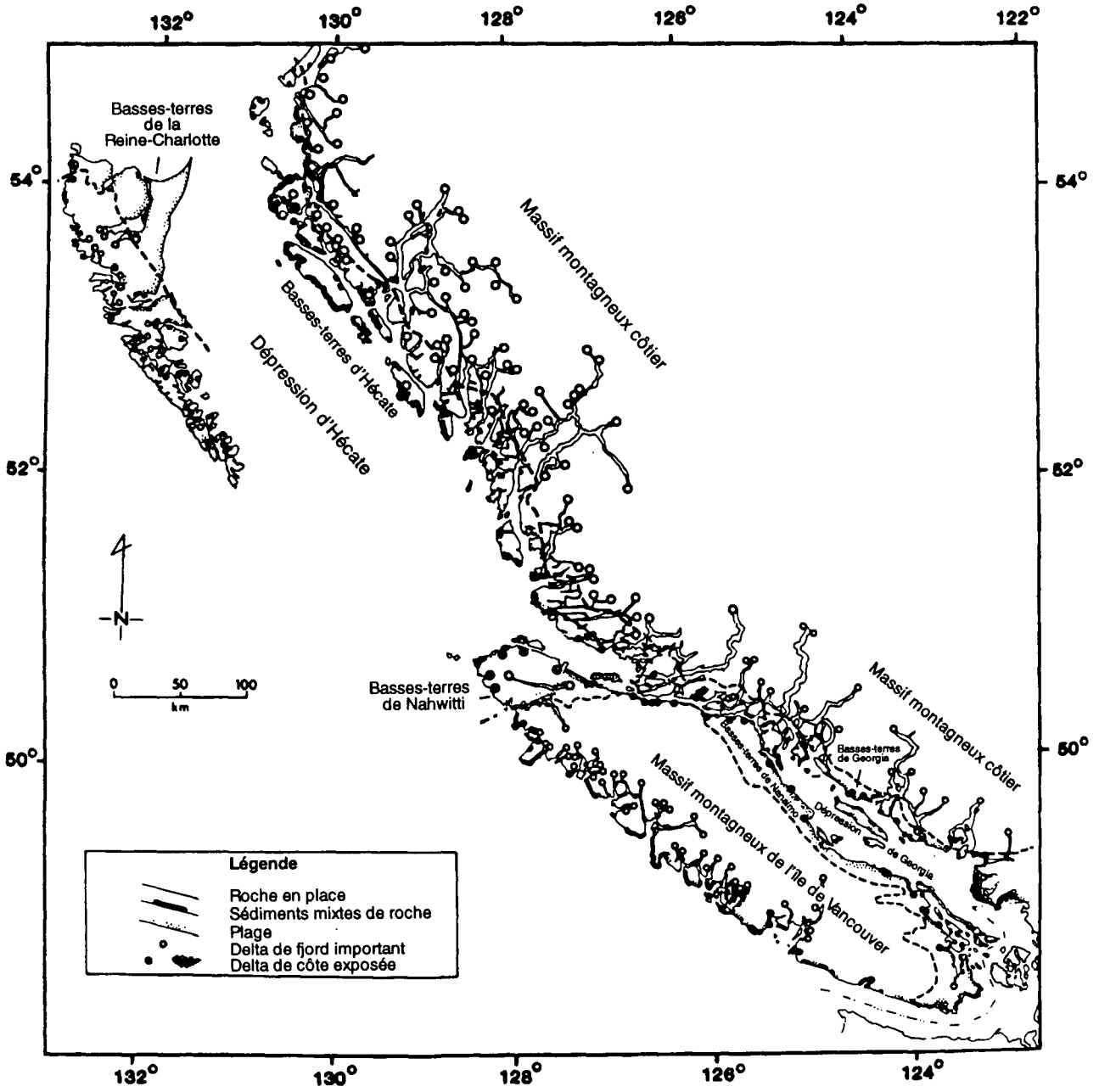


Figure 93 **Principales formes de relief côtier de la Colombie-Britannique** (d'après Clague et Bornhold, 1980)

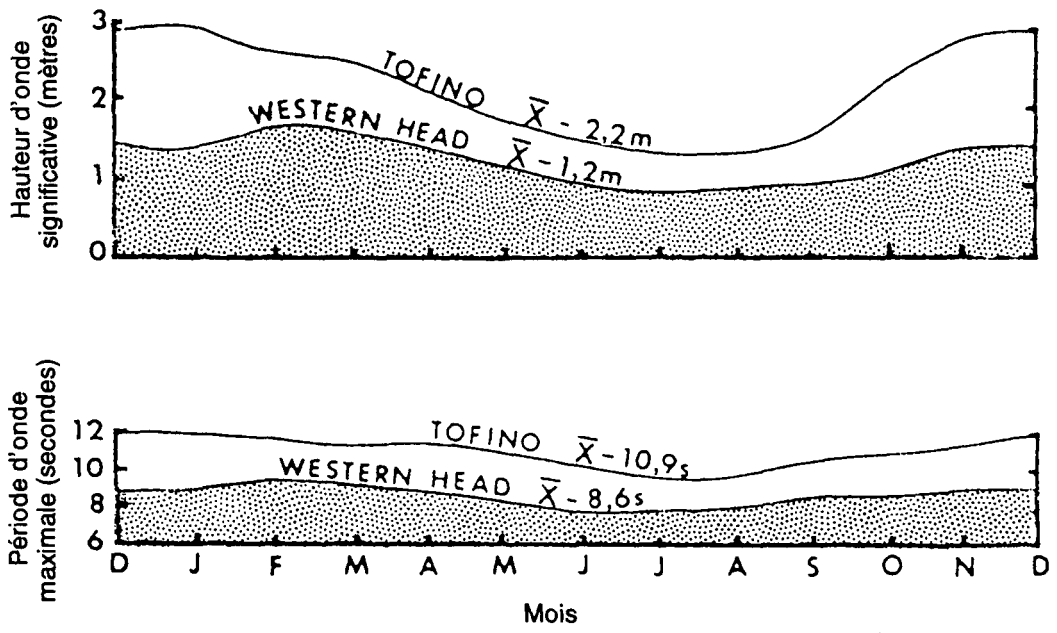


Figure 94 **Moyenne des données mensuelles moyennes sur les vagues, Tofino, Colombie-Britannique, et Western Head, Nouvelle-Écosse**

Tableau 26 **Données sur la hauteur des vagues pour la région du Pacifique** (tiré de SHC, 1974a)

	Vagues forcées				Vagues libres			
	Été		Hiver		Été		Hiver	
	>1 m	>3 m	>1 m	>3 m	>1 m	>2 m	>1 m	>2 m
Côte exposée	50 %	8 %	70 %	20 %	50 %	10 %	80 %	30 %
Détroit de Georgia	15 %	2 %	35 %	5 %	30 %	5 %	40 %	10 %
Détroit d'Hécate	25 %	8 %	pas de données		20 %	5 %	8 %	0 %

à leur tour liées à l'accroissement des gradients de pression entre la dépression des Aléoutiennes et le système de haute pression centré sur le Pacifique Nord. Cette différence de pression en hiver provoque également la formation d'ondes de tempête sous l'effet des vents associés aux dépressions qui se déplacent d'ouest en est dans la région.

Dans les eaux côtières abritées du détroit d'Hécate et du détroit de Georgia, les vagues sont engendrées par les vents locaux dont l'orientation est quasi parallèle à ces plans d'eau. La hauteur et la période d'onde significative annuelle sont respectivement de 0,3 m (presque dix fois moins que sur la côte extérieure) et 3,5 s. On note encore dans ce cas une différence saisonnière associée à une plus grande fréquence de tempêtes en hiver. La hauteur des vagues dépasse 3 m généralement 10 % du temps en hiver, mais moins de 5 % en été (tableau 26). L'hydrodynamisme est très variable selon les endroits et dépend du fetch sur lequel le vent

lève les vagues battant une section donnée du littoral.

Glace. La glace joue un rôle très mineur, quasi négligeable, dans les processus côtiers de la région. En effet, les températures de l'eau de mer sont toujours au-dessus du point de congélation et la glace ne se forme que dans les bras où se jettent des cours d'eau douce.

Marées. L'amplitude moyenne des marées semi-diurnes sur cette côte passe de 5 m dans les portions nord à un minimum de 2 m près de Victoria. Une amplitude maximale de 8,4 m a été enregistrée à Prince Rupert. De puissants courants de marée sont engendrés dans les zones où l'eau traverse d'étroits chenaux étranglés, par exemple dans les passages Discovery et Seymour, à l'extrémité nord-ouest du détroit de Georgia. Autre caractéristique des courants de marée dans les bras : la marée descendante dure généralement plus longtemps et est généralement plus marquée que la marée montante, à cause des effets d'écoulements d'eau douce; ce phénomène s'observe en particulier au moment du ruissellement printanier.

Géologie. Sur la côte du Pacifique, des montagnes résistantes atteignant jusqu'à 4 000 m d'altitude bordent l'océan. Cette chaîne de montagnes (la Cordillère) fait partie d'un système qui s'est développé sur le rebord oriental de l'océan Pacifique, depuis l'Alaska jusqu'au Chili. Sur le continent, la chaîne Côtière est séparée par la dépression Hécate-Georgia d'un chaînon insulaire qui s'élève à 1 200 m sur les îles de la Reine-Charlotte et culmine à 2 200 m sur l'île de Vancouver. Côté mer du chaînon externe, le plancher océanique descend de façon prononcée et la plateforme continentale, très abrupte, mesure en général à peine 50 km de largeur.

La Cordillère, qui s'étend du nord-ouest au sud-est, détermine l'orientation principale de la côte. Les côtes se composent de roches essentiellement intrusives ou volcaniques résistantes avec de rares affleurements de roches sédimentaires moins résistantes. Ces affleurements sont parfois recouverts de dépôts glaciaires, souvent minces et d'étendue limitée, sauf sur les plaines côtières.

La zone côtière montagneuse a été considérablement modifiée par les effets de la glace au cours du Pléistocène. Des glaciers se sont formés sur les îles de la Reine-Charlotte et sur l'île de Vancouver, ainsi que sur la chaîne Côtière. Le relief accidenté des montagnes et la présence de fjords sur la côte résultent directement de l'action érosive de ces glaciers. L'entrée Dixon, le détroit d'Hécate, le détroit de la Reine-Charlotte, le détroit de Georgia et le détroit Juan de Fuca ont été modifiés par les effets d'affouillement de la glace.

Géomorphologie côtière. Dans la région du Pacifique, la forme du littoral est principalement attribuable à l'action structurale exercée par la Cordillère et aux modifications topographiques résultant de l'érosion d'un vaste système de fjords par les glaciers du Pléistocène. La zone côtière est caractérisée par un relief élevé, la présence d'affleurements rocheux résistants et l'absence générale de sédiments. Même si les côtes sont généralement accores, les véritables falaises érodées par les vagues ne sont pas fréquentes, quelques exceptions étant celles de la côte ouest de l'île Moresby (du groupe des îles de la Reine-Charlotte) et de la côte est de l'île de Vancouver. Les nombreux fjords pénètrent profondément dans les terres, parfois jusqu'à 110 km, donnant ainsi à la côte un aspect très échancré. Ces fjords, dont la forme est généralement en U, résultent de l'envahissement par la mer des étroites et

profondes vallées, érodées ou surcreusées par les glaciers.

Étant donné la résistance générale des affleurements rocheux, il y a peu de sédiments qui peuvent être remaniés sous l'effet des processus littoraux. De petits deltas occupent les secteurs abrités des fonds de fjords (p. ex., à Kitimat et Bella Coola) et deux grands deltas en progradation se sont formés aux embouchures du Fraser et de la Skeena. Quelques vastes plages se sont développées à plusieurs endroits, notamment à Long Beach sur la côte ouest de l'île de Vancouver et sur la plaine Argonaut dans le nord-est de l'île Graham, où l'érosion locale de roches tendres ou de dépôts glaciaires constitue la source des sédiments accumulés sur la zone littorale. D'autres petites plages sont issues d'un apport de sédiments dû à l'érosion par les vagues et se localisent dans des secteurs où l'avant-plage est relativement peu profonde. On observe le long de nombreuses sections du littoral la présence de grumes à la laisse de pleine mer, ou tout près. Dans certaines sections, ces accumulations constituent la caractéristique majeure du rivage (figure 95).

4.3.2 Delta du fleuve Fraser

Le delta du Fraser est un milieu essentiellement fluvial qui se caractérise par un important système deltaïque en progradation. Le delta occidental moderne, face au détroit de Georgia, mesure 37 km de largeur, et il est borné par la péninsule pointe Roberts et la péninsule Burrard. Un delta abandonné (13 km de largeur) est orienté vers le sud dans la baie Boundary (figure 96). Les deux systèmes deltaïques sont séparés par la péninsule pointe Roberts, constituée d'un dépôt de sédiments glaciaires meubles.

Le cours principal du Fraser se divise, à New Westminster, en deux chenaux principaux, le bras North et le bras Main (plus au sud). Ces chenaux débouchent dans le détroit de Georgia, juste au nord de la frontière avec les États-Unis; toutefois, environ 80 à 85 %

Figure 95 **Grumes empilées dans la zone intertidale supérieure d'une plage de sable à Clo-oose, Colombie-Britannique** (mars, 1976) (photo de J.R. Harper)

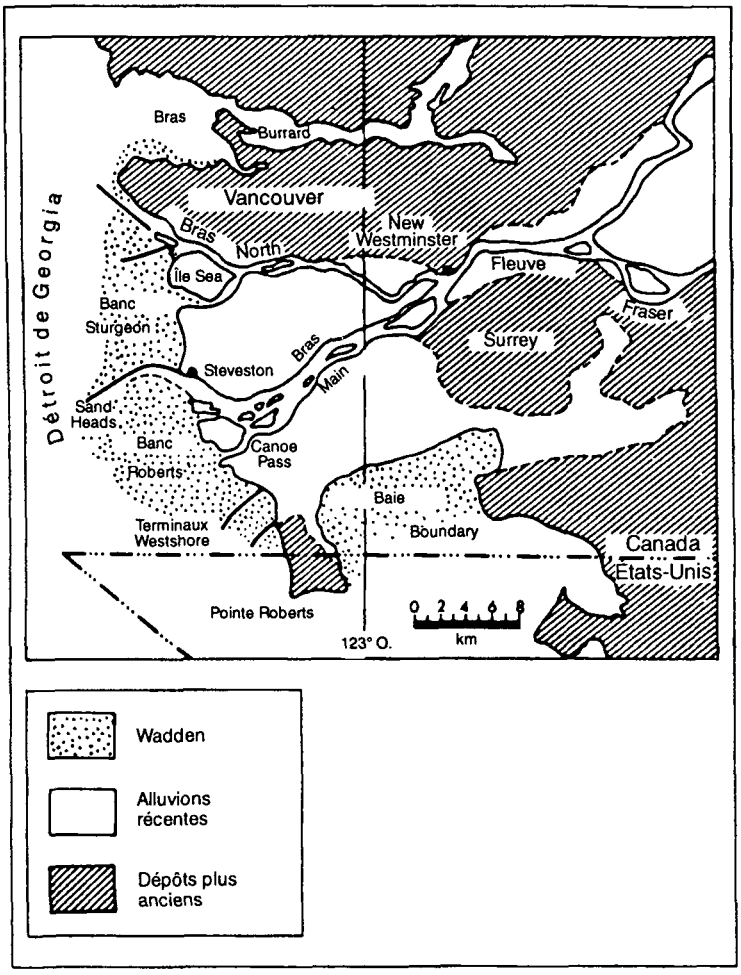


Figure 96 **Carte géologique du delta du fleuve Fraser, Colombie-Britannique** (tiré de Luternauer, 1980)

de l'écoulement du fleuve sont déversés en mer par le bras Main. Le bras North du Fraser longe le rebord nord du delta pour se jeter dans l'océan, tandis que le bras Main découpe le delta pour former deux immenses wadden de superficie à peu près égales (le banc Sturgeon au nord, et le banc Roberts au sud; figure 96).

Le delta est un marais autour duquel on a construit des digues de protection et qu'on a mis en valeur à de nombreux endroits. Du côté de la mer, le front du delta progresse au rythme de 2,5 m/a par accumulation de sédiments fluviatiles (Glass, 1972). Sur le front du delta, des wadden de vase et de sable mesurant environ 6 km de largeur sont exposés aux marées basses et descendent en pente douce; ils sont prolongés par une plateforme qui présente une rupture de pente à environ 9 m au-dessous du niveau des plus basses mers (Luternauer, 1980). Sur les battures intertidales, la granulométrie des sédiments varie de la vase, dans la partie inférieure de la zone intertidale, au sable, dans la partie supérieure. À son tour, le sable est remplacé par des marais colonisés par la végétation, dont il est parfois séparé par des dépôts boueux. Les marges des chenaux (figures 97 et 98) sont caractérisées par des dépôts de sable moyen à fin (Luternauer et Murray, 1973).

Figure 97 **Embouchure du chenal Middle Arm, delta du Fraser, Colombie-Britannique** (décembre 1976)

Figure 98 **Embouchure du chenal Canoe Pass, delta du Fraser, Colombie-Britannique** (décembre 1976)

La plupart des sédiments grossiers que charrie le fleuve passent par le bras Main puis sont évacués vers le nord en direction du banc Sturgeon dans les conditions normales de courant et de marée. La redistribution des sédiments superficiels par le fleuve, les vagues et les courants de marée a entraîné la formation d'une série caractéristique de formes sur les wadden dont les petites buttes de sable (figure 99), les mares de boue et les réseaux de drainage dendritiques (Luternauer, 1980). Le milieu deltaïque a été modifié par la construction de jetées et de brise-lames qui ont altéré les processus naturels locaux.

Figure 99 **Cordons sablonneux intertidaux exposés à mi-marée entre la jetée du chenal North Arm et le pont-jetée Iona du delta du Fraser, Colombie-Britannique** (décembre 1976)

Même si la position du marais est relativement stable (Medley et Luternauer, 1976), ces ouvrages artificiels pourraient avoir entraîné une érosion locale ou une progression du marais (Luternauer, 1980).

Dans la zone deltaïque, les processus naturels varient beaucoup durant l'année, par suite du changement saisonnier du débit fluvial. Ainsi, le débit est à son minimum entre janvier et mars et atteint son maximum de la fin de juin à la mi-août, avec environ 80 % de l'écoulement annuel enregistré entre mai et juillet (Luternauer et Murray, 1973). Durant cette dernière période, les courants atteignent environ 3 m/s et l'écoulement est suffisant pour empêcher l'eau de mer de pénétrer dans les chenaux à la marée montante. Il arrive souvent que le panache de sédiments érodés du delta soit nettement visible et s'étende sur 30 km dans le détroit de Georgia. Le delta est largement abrité des vagues et l'énergie des vagues arrivantes est dissipée sur les marges sous-marines, en pente faible et peu profonde ou encore dans la partie inférieure de la zone intertidale. Les marées mixtes semi-diurnes ont une amplitude moyenne de 3 m et maximale de 4,7 m durant les marées de vives-eaux.

Le rivage du delta en progression est caractérisé par de larges battures intertidales de sable et de vase et par de vastes marais de haute-plage (figure 100). Les marais endigués sont rarement inondés, tandis que les régions non protégées sont recouvertes d'eau durant la période d'écoulement maximal et les grandes marées de vives-eaux. Le delta abandonné de la baie Boundary est caractérisé aussi par des wadden de sable et de vase atteignant 4 km de largeur.

4.3.3 Détroit de la Reine-Charlotte - détroit de Georgia

La côte du détroit de Georgia, y compris le détroit de Johnson et le détroit de la Reine-Charlotte au nord, a été formée par l'inondation de la dépression de Georgia, d'orientation nord-ouest-sud-est. Cette dépression se trouve entre les roches ignées intrusives de la chaîne Côtière et les roches volcaniques et sédimentaires des montagnes de l'île de Vancouver. Un arc de roches

Figure 100 **Slikkes intertidales adossées à des marais endigués et mis en valeur du banc Sturgeon, delta du Fraser, Colombie-Britannique** (décembre 1976)

ignées résistantes s'étend jusque dans la dépression dans la région du détroit de Johnson, séparant le détroit de Georgia du détroit de la Reine-Charlotte. Dans le détroit de Georgia, la côte est constituée d'une étroite plaine juxtaposée à des hautes-terres ou des montagnes qui atteignent 2 000 m à 30 km de la côte.

La région a été en grande partie recouverte de glaciers descendant des chaînes de montagnes adjacentes de part et d'autre. Du côté est de la dépression, les anciennes vallées fluviales sont devenues des vallées très profondes et escarpées par surcreusement glaciaire, puis des fjords à la suite de l'envahissement par la mer, lors du retrait des glaciers. Ces fjords sont généralement étroits (<5 km) et le plus long entaille la chaîne Côtière sur plus de 70 km. L'ennoyage de ce réseau complexe de fjords explique la présence des nombreuses îles qui parsèment la côte. Du côté ouest de la dépression, on note une large plaine côtière et la présence de quelques rares fjords (figure 101). Sur le littoral sud-est de l'île de Vancouver, l'érosion différentielle des roches sédimentaires tendres a conduit à la formation d'une série d'îles parallèles et linéaires (les îles Gulf) (figure 102). Dans toute cette région, des dépôts de sédiments glaciaires ont été remaniés par endroits et ont servi de matériaux à l'élaboration des formes du relief côtier.

L'amplitude de la marée dans ce milieu varie du nord au sud, le marnage moyen étant de 3 m dans les portions sud et de 3,5 m dans la partie nord. De puissants courants de marée s'observent dans les passages entre les îles, à cause du phénomène d'étranglement. Dans les passages entre les îles Gulf, les courants atteignent 4 m/s, et dans le passage Seymour, dans la région du détroit de Johnson, des courants atteignant 7 m/s sont fréquents (SHC, 1982). Dans ces milieux, les vents sont généralement du nord-ouest l'été; ils sont plus forts en hiver et viennent de l'est ou du nord-est. Entre octobre et mars, il se produit des tempêtes associées à des vents dont la vitesse est supérieure à 60 km/h en moyenne trois ou quatre jours tous les mois; étant donné que les courses sont très courtes dans la plupart des endroits, la majeure

Figure 101 **Le lac Buttle, un ancien fjord, aujourd'hui séparé de la mer, près de Campbell River dans la partie est de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique** (décembre 1976)

Figure 102 **Les îles Chain dans le port de Ganges, île Saltspring** (dans cette région, la configuration du littoral résulte de l'érosion associée à la lithologie et à la structure de la roche en place)

partie du littoral n'est cependant pas exposée à des vagues à énergie élevée. Toutefois, les vents soufflant le long de l'axe du détroit peuvent engendrer de hautes vagues; en hiver, les vagues atteignent 3 m de hauteur environ 5 % du temps (SHC, 1974a). Il s'agit donc d'une côte à mode mixte, où les vagues constituent le principal processus physique sur les sections exposées, mais où les marées prennent une plus grande importance dans les secteurs abrités (McCann et Hale, 1980). Les brises de mer sont fortes par endroits, notamment sur la rive est du détroit; elles peuvent atteindre en fin d'après-midi des vitesses de 4 à 7 m/s (c.-à-d. 8 à 14 noeuds) (Thomson, 1981).

Les hautes-plages de ces milieux sont généralement boisées, basses, résistantes et rocheuses (figure 103). De nombreux fjords escarpés dont le fond est souvent marqué de petits deltas à marais et slikkes échancrent les montagnes côtières du continent. L'érosion de sédiments meubles a entraîné la formation de falaises d'abrasion, surtout le long de la côte sud-est de l'île de Vancouver et dans les îles Gulf, où les roches sont moins résistantes. Les vitesses de recul de ce type de falaise sont en moyenne de 0,5 m/a. On en trouve à la pointe Grey, sur la péninsule Burrard et sur la péninsule Saanich, au nord de Victoria (Clague et Bornhold, 1980).

Dans les sections abritées, les plages sont généralement composées d'un mélange de sable et de cailloux; s'y accumulent souvent de grandes quantités de grumes à la laisse de pleine mer ou près de celle-ci (figure 104). Sous l'action des ondes de tempête, les plages des secteurs exposés s'érodent ou engraissent; la différence d'élévation de la plage varie de 0,2 à 0,5 m (Harper, 1980a). Les battures intertidales sablonneuses, dont la largeur atteint 1 200 m à marée basse, sont exposées dans les baies et les estuaires de certains secteurs de la côte est de l'île de Vancouver. Ces battures, recouvertes d'un mince placage de sable reposant sur des dépôts glaciaires meubles, présentent fréquemment des crêtes de sable peu élevées (<0,5 m). Ces crêtes constituent des éléments permanents de la zone intertidale et présentent une stabilité considérable, tant dans leur forme que dans leur position (Hale et McCann, 1982). Des deltas relativement importants se sont formés aux embouchures des rivières Courtenay, Cowichan et Nanaimo mais, ailleurs, les sédiments sont relativement rares. En général, une grande partie de la côte de cette unité est caractérisée par la présence d'affleurements de la roche en place (tableau 25, figures 105 et 106), même si les plages (figure 107) et les petits deltas (figure 108) sont courants.

4.3.4 Détroit Juan de Fuca

Le détroit Juan de Fuca est un long passage étroit qui marque une discontinuité géologique majeure entre les laves résistantes du sud de l'île de Vancouver et les roches sédimentaires de la

Figure 103 **Côte rocheuse basse dans les îles Gulf, détroit de Georgia, Colombie-Britannique** (décembre 1976)

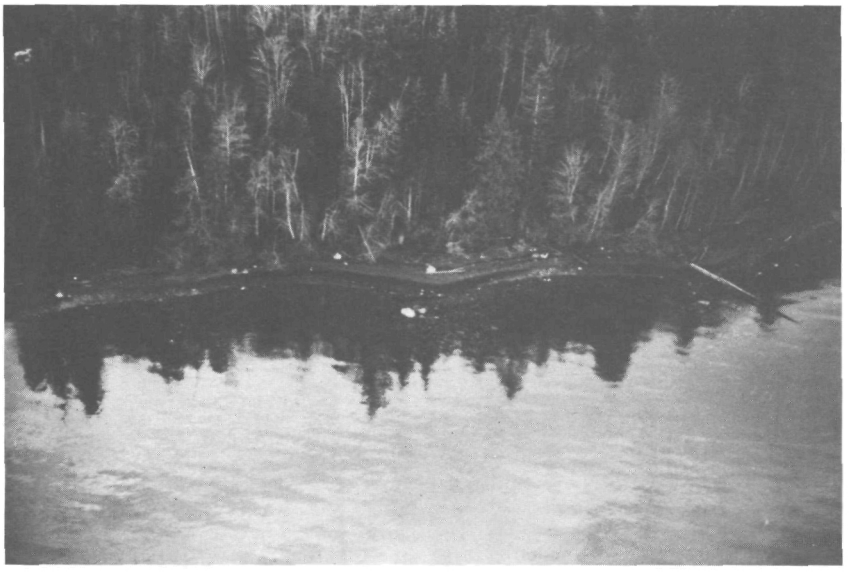


Figure 104 **Milieu littoral abrité et plage de galets, de cailloux et de blocs, près de Courtenay, île de Vancouver, Colombie-Britannique** (décembre 1976)

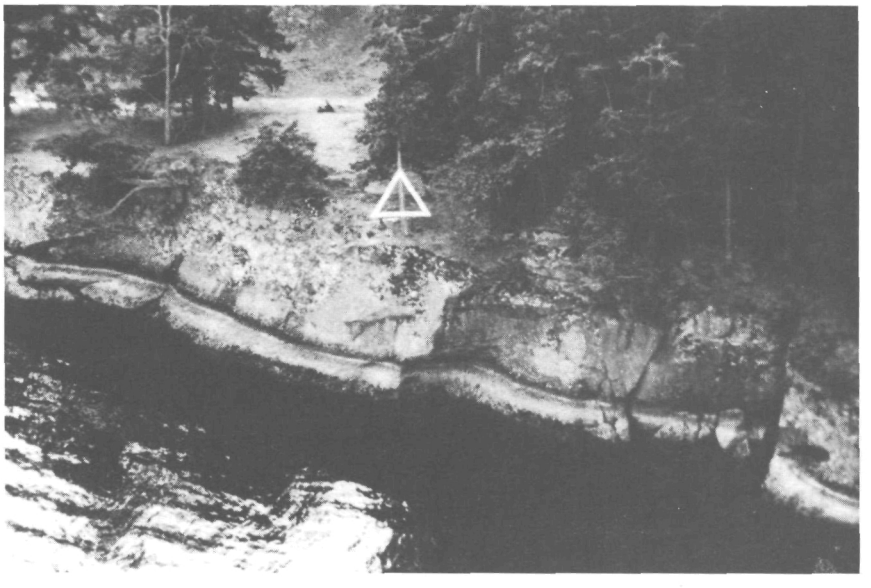


Figure 105 **Falaise verticale juste au nord de la pointe Nose, île Saltspring** (la zone intertidale est particulièrement développée à cet endroit) (photo prise à marée basse)

chaîne Olympic, au sud. Dans ce milieu, les directions structurales sont ouest-nord-ouest à est-sud-est et parallèles au détroit. Par ailleurs, il semble que la principale zone faible ait été surcreusée par les glaciations subséquentes (Tiffin *et al.*, 1972).

La côte ouest est exposée à de fortes vagues dont les hauteurs diminuent rapidement en direction de l'est, la côte étant abritée par le détroit. Les marées sont de type mixte semi-diurne, avec une amplitude de 2,5 m à l'ouest et de type mixte diurne avec une

Figure 106 **Plateforme rocheuse intertidale horizontale au nord-est de l'île Saltspring**

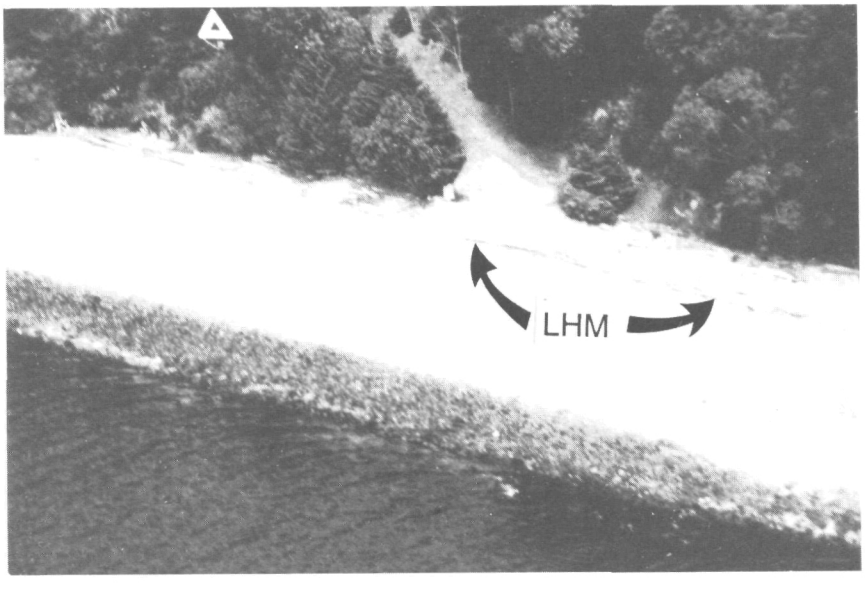


Figure 107 **Plage de galets et de cailloux près du cap Keppel, île Saltspring** (noter la ligne de grumes au-dessus de la laisse de pleine mer sur le gradin de plage)

Figure 108 **Petit delta fluviatile à marée basse, passage Samsum, île de Vancouver**

amplitude de 2 m à l'est. Les courants de marée sont généralement inférieurs à 1 m/s à l'entrée du détroit et atteignent 3 m/s sur la côte près des rochers Race à l'est (SHC, 1974a).

La morphologie côtière du détroit Juan de Fuca est dominée par des formes érosives; la présence d'affleurements de la roche en place sédimentaire a entraîné la formation de grandes plateformes rocheuses intertidales. Environ un tiers de la côte est formé de falaises quasi verticales et un autre tiers de plateformes rocheuses (figure 109); le dernier tiers est formé de plages dont à peu près la moitié sont composées de sable, et l'autre moitié de sédiments mixtes (tableau 25) (Owens, 1981). La nature

Figure 109 **Pointe Pachena, partie ouest du détroit Juan de Fuca** (décembre 1976) (noter la large plateforme rocheuse littorale et les falaises basses)

généralement érosive des rivages est contrôlée par l'hydrodynamisme élevé à cet endroit, ce qui pour a pour effet d'amener la plupart des sédiments fins vers le large; les plages sont généralement constituées de faibles épaisseurs de sédiments qui sont situés près des embouchures des principaux cours d'eau et qui reculent, dans les régions basses, vers les terres (Harper, 1981). Des taux d'érosion des plages de 0,5 m/a ont été rapportés (Holden, 1980). On note aussi un cycle saisonnier, selon lequel les plages reculent à la fin de l'automne et engraissent durant le reste de l'année; il ne s'agit pas d'un véritable cycle été/hiver, puisque le principal processus de modification des plages est lié à l'activité des ondes de tempête (Harper, 1980a). Dans ce milieu, le soulèvement tectonique est en cours et entraîne l'émersion des terres et l'abandon de nombreuses falaises côtières. Les seules irrégularités importantes qui marquent la côte du détroit sont :

1. le port de Sooke, qui est séparé du détroit par une flèche littorale recourbée;

2. l'indentation de type fjord à Port Renfrew, résultant de l'érosion différentielle le long d'une importante faille structurale;

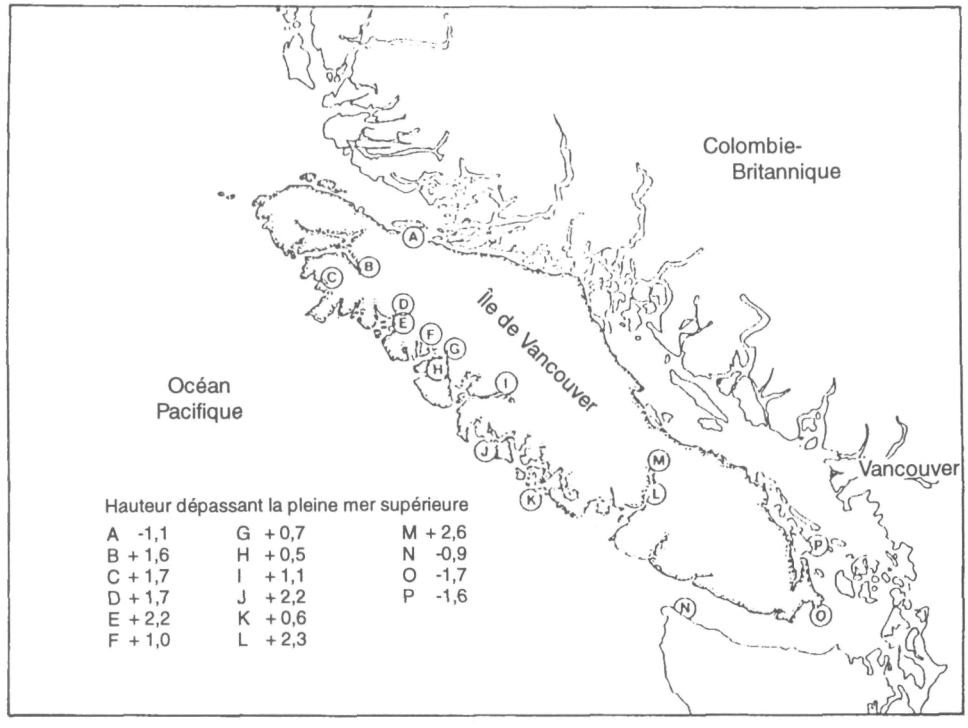
3. un petit passage reliant les lacs Nitinat au détroit lui-même.

4.3.5 Les côtes exposées

Les côtes exposées des îles de la Reine-Charlotte et de l'île de Vancouver sont des milieux à hydrodynamisme fort élevé, exposées à la pleine force des vagues engendrées dans le Pacifique Nord. Cette côte rocheuse résistante est orientée selon une direction structurale régionale nord-ouest-sud-est, la côte ouest de l'île Moresby, rectiligne, correspondant à une ligne de faille (Sutherland-Brown, 1968). Au nord, la plateforme continentale est absente, ou extrêmement étroite, près de l'île Moresby, mais elle s'élargit pour atteindre 100 km au sud près de l'île de Vancouver où les chaînes de montagnes culminent à 1 200 m. Les montagnes volcaniques ou de lave résistante sont directement sur la côte; ces montagnes atteignent 1 000 m à moins de 10 km du littoral, sauf dans la partie centrale de l'ouest de l'île de Vancouver, où une étroite plaine côtière atteint 20 km de largeur par endroits. Les glaciers recouvrant l'île ont surcreusé les fjords à parois abruptes et donnent à cette côte un aspect accidenté très pittoresque. L'ennoyage du vaste système de fjords par la mer après le recul de la glace a produit un littoral complexe de bras et d'îles.

Les côtes sont très fortement battues toute l'année, avec des maximums en automne et en hiver, où les vagues atteignent 3 m de hauteur (figure 94). Les marées sont de type mixte semi-diurne et leur amplitude est d'environ 3 m. Les ondes de tempête, liées aux tsunamis, sont canalisées par les longs bras (p. ex., le bras Alberni) et des relèvements du niveau des eaux supérieurs à 2,0 m ont été enregistrés à une distance de plusieurs milles à l'intérieur de ces bras (Murty, 1983; Thomson, 1981) (figure 110).

La morphologie côtière de ce littoral accidenté, exposé aux vagues, est variée par endroits, mais globalement très homogène. Ainsi, ce milieu est dominé par la présence de nombreux fjords (figure 111) et d'îles, même si le rebord extérieur est caractérisé par des rivages rocheux bas. Les falaises sont rares, à l'exception de celles qui bordent l'ouest de l'île Moresby, où elles s'élèvent verticalement à 150 m. La côte ouest des îles de la Reine-Charlotte est généralement beaucoup plus accore que celle de l'île de Vancouver. Les sédiments sont rares, même si sur la partie ouest de l'île de Vancouver quelques plages isolées, mais très étendues



Du 27 au 29 mars 1964 : hauteur en mètres des crêtes de vagues maximales dépassant le niveau de la pleine mer supérieure (les valeurs négatives sont inférieures au niveau de la pleine mer supérieure); B - Port Alice, E - bras Amai; J - Anse Hot Springs; M - Port Alberni, O - Victoria

Figure 110 **Endroits du sud-ouest de la Colombie-Britannique où l'on a signalé une forte activité de tsunamis** (d'après Thomson, 1981)

Figure 111 **Côte élevée à fjords, sud-ouest de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique** (le relief atteint à peu près 1 500 m de hauteur) (vue vers la mer) (décembre 1976)

(atteignant 10 km de longueur) se sont formées sur la côte exposée près de dépôts de sédiments glaciaires meubles. À la plage de Long Beach, dans les baies Wickaninnish et Florencia, une vaste plage sablonneuse et plane (figure 112) est bordée d'une ligne de grumes à la laisse de pleine mer, de dunes (plus de 5 m de hauteur) colonisées par la végétation et de falaises. Cette plage présente un cycle été/hiver marqué, l'érosion se produisant entre décembre et mars et la récupération, ou engraissement, entre juin et octobre (Harper, 1980a). Les variations saisonnières de l'élévation de la plage sont supérieures à 0,5 m et peuvent dépasser 1,5 m. Les escarpements marins abandonnés sont fréquents, côté terre de ces plages.

Des affleurements rocheux de roche en place sédimentaire ont été transformés en plateformes rocheuses d'abrasion dans des endroits isolés de l'ouest de l'île de Vancouver et de l'ouest des îles de la Reine-Charlotte. Cette côte est avant tout caractérisée par un littoral rocheux et exposé aux vagues, mais la présence d'un système complexe d'îles et de bras explique la présence de nombreuses sections à hydrodynamisme faible, abritées des fortes vagues du Pacifique (p. ex., baie Grice, baie Barkley) (figure 113).

4.3.6 Détroit de la Reine-Charlotte - détroit d'Hécate

La dépression d'Hécate est le prolongement de la direction structurale régionale qui comprend la dépression de Georgia. Cette dépression orientée nord-ouest-sud-est est bornée par la chaîne Côtière, sur le continent, qui culmine à 2 800 m et par les îles de la Reine-Charlotte qui atteignent des altitudes de 1 200 m. La bordure extérieure des montagnes insulaires est brisée, au sud des îles de la Reine-Charlotte, par le détroit de la Reine-Charlotte. Les montagnes du continent sont des roches ignées résistantes dont le point culminant, à 1 000 m, est à moins de 50 km de la côte. Ces montagnes ont été profondément découpées par les glaciers qui ont surcreusé d'anciennes vallées fluviales, lesquelles forment aujourd'hui un dédale de fjords. Les laves et basaltes résistants des îles de la Reine-Charlotte ont de même été érodés par les glaciers, d'où la formation d'une côte montagneuse complexe de fjords et d'îles.

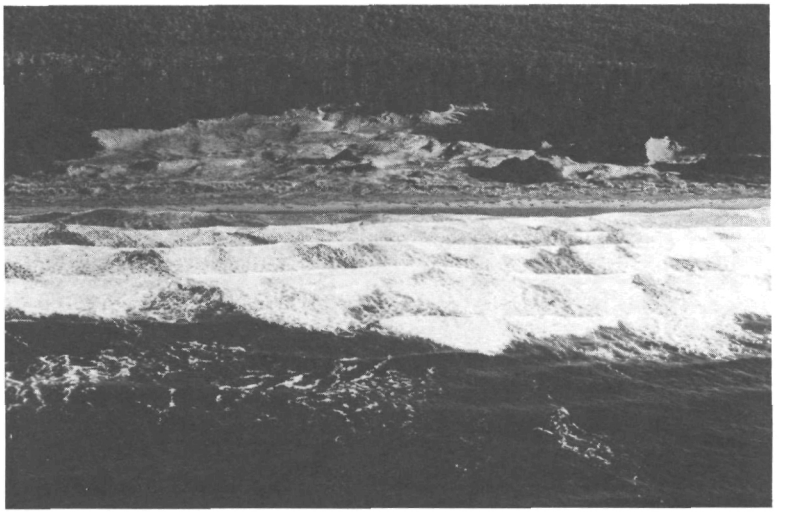


Figure 112 **Section de la plage de Long Beach dans le parc national Pacific Rim, ouest de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique** (décembre 1976) (cette large plage de sable s'adosse à cet endroit à un petit champ de dunes)

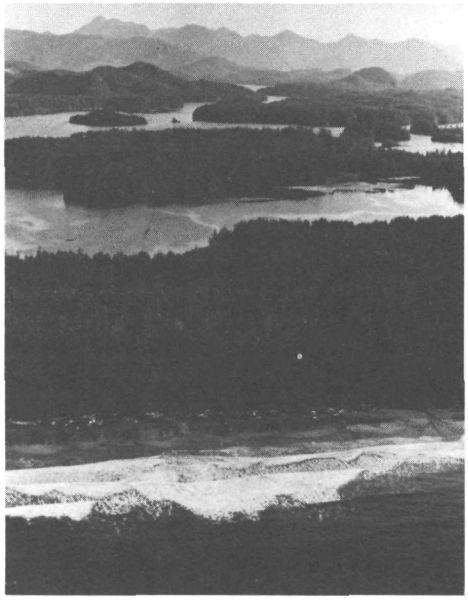


Figure 113 **Vue à l'intérieur des terres près de Tofino, ouest de l'île de Vancouver, Colombie-Britannique** (une plage de sable sur la côte exposée cède la place à un milieu abrité d'îles et de chenaux)

De nombreuses sections de ce milieu, notamment la côte bordant directement la dépression d'Hécate, sont caractérisées par un relief bas et plat qui s'élève rapidement côté terre pour donner des montagnes et des fjords.

L'hydrodynamisme diminue tant vers le nord, à mesure que la côte devient plus abritée de la houle du Pacifique, que vers le continent, où les passages et chenaux sont protégés par des îles. Le marnage moyen augmente de 3,4 m à Bella Bella à 4,9 m à Prince Rupert et à 5,0 m à Queen Charlotte City. Dans les chenaux resserrés, les courants atteignent fréquemment 2,5 m/s. De la glace se forme occasionnellement sur les rivières ou dans les bras où l'eau douce de la surface gèle; la glace ne joue cependant pas un rôle important dans les processus littoraux.

Sur les îles exposées proches du continent, par exemple l'île Banks, les littoraux occidentaux sont rocheux et de basse altitude. Ce trait de côte exposé cède la place, dans toutes les zones, à un système complexe de chenaux étroits à parois abruptes, peu exposés aux vagues. Les falaises d'abrasion sont rares et les falaises verticales des fjords résultent de l'action glaciaire plutôt que d'une érosion marine. Les littoraux sont abrupts, les zones intertidales étant généralement rocheuses et étroites et présentant peu d'accumulation de matériaux de plage; les petits deltas et les battures sont toutefois courants à la tête des fjords (p. ex., Kitimat). La largeur des fjords du continent varie de 1 à 5 km et leur profondeur de pénétration peut dépasser 100 km (Clague et Bornhold, 1980) (figure 114). Les plages, généralement composées de matériaux de la taille des galets et des cailloux, sont plus fréquentes sur les côtes des îles de la Reine-Charlotte, où les dépôts de matériaux glaciaires peuvent être remaniés.

Les petits deltas sont fréquents à la tête des fjords et sont généralement caractérisés par des battures intertidales de sable et de vase, adossées à des marais. Les deltas sont dominés par des processus fluviaux plutôt que marins. Le delta de la rivière Skeena est un grand delta en progression présentant de vastes wadden et des dunes migrantes (Environnement Canada, 1975b; Luternauer, 1976).

La zone côtière des détroits d'Hécate et de la Reine-Charlotte est caractérisée par deux milieux principaux : le littoral bas, rocheux, moyennement battu par les vagues qui borde le détroit d'Hécate ainsi que le détroit de la Reine-Charlotte et les chenaux et fjords intérieurs, à parois abruptes, peu battus par les vagues.

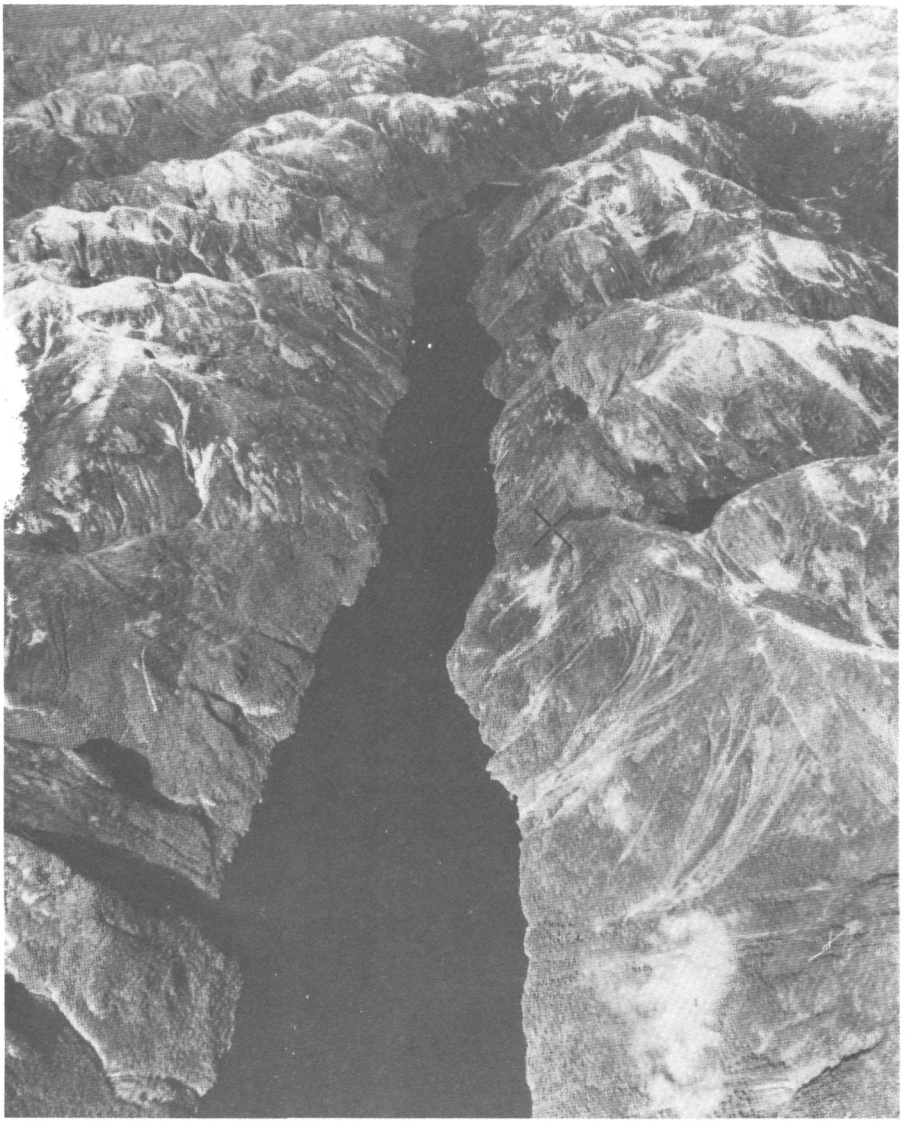


Figure 114 **Bras Cascade, près d'Ocean Falls, Colombie-Britannique** [fjord long (25 km), rectiligne et escarpé qui entaille le chaînon Kitimat] (tiré de Holland, 1976)

4.3.7 Est de l'île Graham

Ces basses-terres planes, la plaine Argonaut, se composent de sédiments glaciaires, de sable et de gravier déposés sur des plaines d'épandage fluvioglaciaires au pied du chaînon des îles de la Reine-Charlotte (Sutherland-Brown, 1968). Les hauteurs sont inférieures à 200 m; une grande partie de la plaine est constituée de muskegs et le littoral est une plage continue de sable et de gravier de 120 km de longueur où affleurent quelques rochers. L'unité est bornée au nord-est par le bras Masset et au sud par la détroit Virago.

La côte nord subit l'influence des houles du Pacifique qui traversent l'entrée Dixon et la côte orientale est battue par les vagues engendrées localement le long de l'axe du détroit d'Hécate. Le marnage moyen varie de 5 m à Queen Charlotte City à 2,7 m à Masset, sur la côte de l'entrée Dixon.

Le littoral de la plaine Argonaut est constitué de deux segments très distincts : 1) la rive orientée vers l'est, entre la pointe Rose Spit au nord et Queen Charlotte City au sud et 2) la rive faisant face au nord entre cette même pointe et le bras Masset. La côte orientale est soumise dans l'ensemble à des processus d'érosion, avec de grandes falaises marines taillées dans les sédiments pléistocènes meubles. La hauteur des falaises peut atteindre 60 m. Plus au nord, de petites falaises ont été façonnées dans d'anciennes dunes de sable côtières et des flèches littorales recourbées. L'érosion de cette côte a produit une large plateforme littorale peu profonde (Harper, 1980b). La section la plus au nord du littoral orienté vers l'est, adjacente à la flèche Rose Spit, progresse; elle est précédée d'un ou deux cordons littoraux. La zone intertidale est étroite (en général <50 m), sauf là où les cordons littoraux sont rattachés obliquement aux plages. Sur la haute-plage, un vaste système de dunes paraboliques ou de reconstitution a été créé, le relief vertical dépassant 10 m.

Au contraire, la côte nord qui borde la baie McIntyre progresse rapidement (0,3 à 0,4 m/a) et possède une large zone intertidale (généralement >200 m); les cordons littoraux sont absents. Ces plages connaissent un cycle été/hiver d'érosion et d'engraissement, les variations saisonnières de niveau étant supérieures à 0,5 m et pouvant atteindre parfois 1,0 m (Harper, 1980a). Les dunes sont essentiellement de type bordier et, à cause de la progradation, ont produit une vaste plaine de levées de plage. On note, derrière cette plaine, un escarpement marin abandonné bien défini. Il semble que les matériaux formant les dunes et les plages proviennent de sources marines (Harper, 1980b).

La baie Virago et le bras Masset constituent les seules irrégularités majeures du littoral sur la rive nord. Dans la baie Virago, des slikkes, larges de 6 km par endroits, sont exposées à marée basse et sont bordées de très vastes marais. Le fond du bras Masset présente une côte à fjords et, bien qu'il subisse l'influence de la marée, il s'apparente plus à une petite mer intérieure, puisqu'il est relié à l'océan par un long chenal étroit (30 km). Les vitesses de la marée dans ce chenal peuvent dépasser 3 m/s.

4.4 Milieux côtiers de l'Arctique canadien

Cette vaste région est bordée par l'océan Arctique et par l'Atlantique Nord-Ouest (baie de Baffin et détroit de Davis) et englobe les côtes de la baie d'Hudson, une large mer intérieure. On y a dénombré douze milieux côtiers (figure 115, tableau 27). La dominante de cette région est sans contredit le rôle de la glace qui modifie les processus littoraux durant au moins six mois chaque année.

Depuis 1977, une série d'études cartographiques et de projets de reconnaissance aérienne du littoral ont permis de couvrir de nombreuses portions de la côte qui n'avaient jamais été étudiées (Forbes *et al.*, 1986; Martini *et al.*, 1980; McLaren, 1982; McLaren *et al.*, 1981; Owens, 1979c; Owens *et al.*, 1981; Semples, 1982; Taylor, 1980b; Taylor et Forbes, 1987; Taylor et Frobel, 1984, 1985a, 1986; Woodward-Clyde Consultants, 1980a,b,c, 1981d, 1982b). Nombre de ces travaux de reconnaissance ont fait appel à l'enregistrement vidéo aérien à basse altitude pour relever les caractéristiques du littoral (p. ex., Woodward-Clyde Consultants, 1980b,c, 1982c; McCann *et al.*, 1981; Taylor et Frobel, 1984, 1986; Forbes et Frobel, 1986). Malgré ces levés, qui couvrent souvent de très vastes superficies, plusieurs zones demeurent inexplorées ou non étudiées, comme les régions du

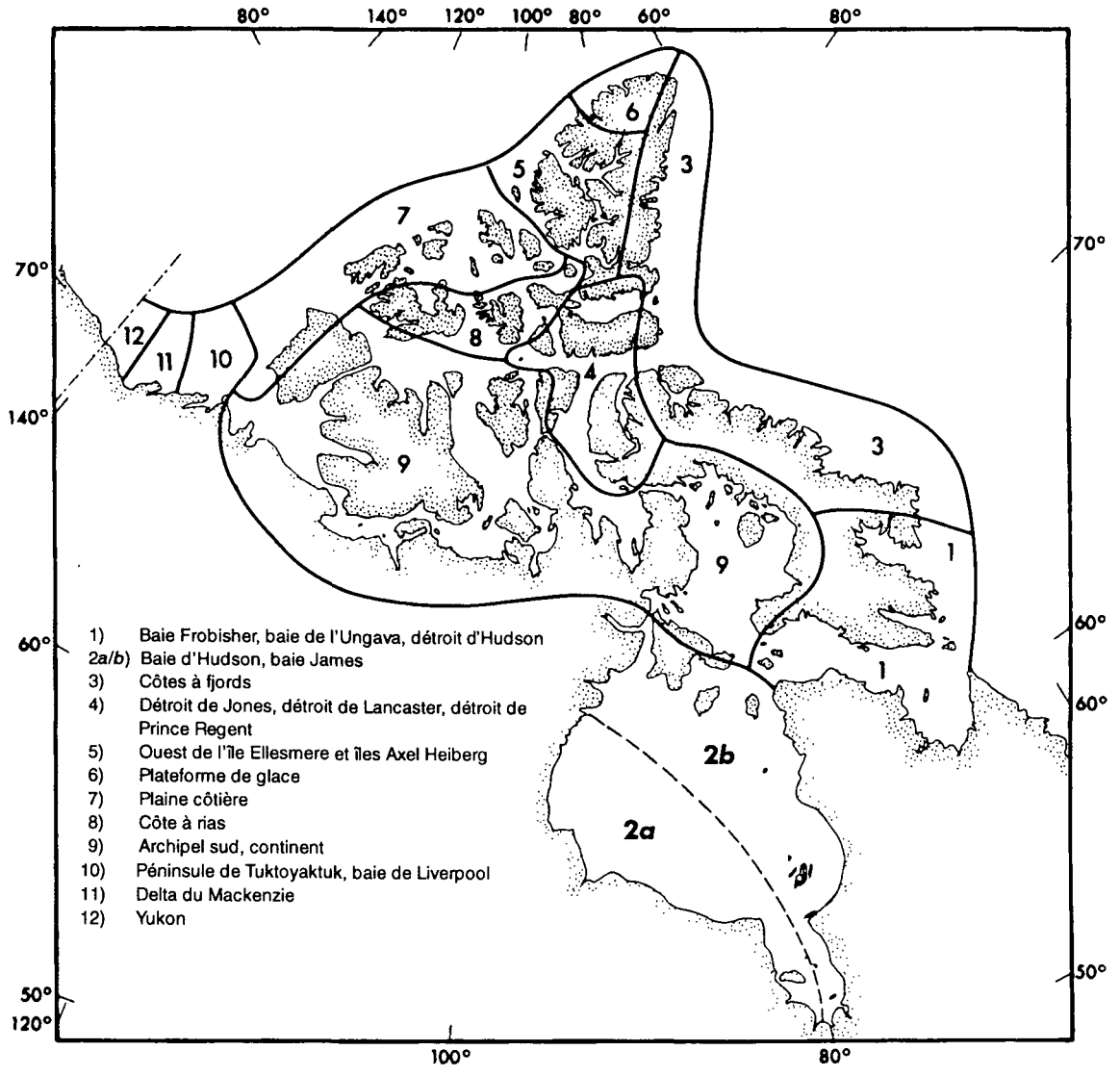


Figure 115 Milieux côtiers de l'Arctique (*cf.* tableau 27)

golfe Coronation, du golfe de la Reine-Maud et du golfe de Boothia. Ces études ne constituent qu'une étape de l'amélioration générale des connaissances de cette région et de nombreux autres projets ont été réalisés dans le domaine des sciences physiques et biologiques (p. ex., Dome Petroleum *et al.*, 1982; Maxwell, 1981).

4.4.1 Aperçu de l'Arctique canadien

Le milieu côtier de l'Arctique canadien comprend près des trois quarts (70,9 %) du littoral océanique du Canada (tableau 21). Partout dans ce milieu, la glace joue un rôle important dans la modification des processus littoraux et de la morphologie des côtes. Même si 35,9 % des côtes se trouvent au sud du cercle polaire arctique (66 ° 33′ N.), ces littoraux sont touchés par la glace plus de six mois par année. Les caractéristiques des côtes varient beaucoup et vont de l'imposant delta du Mackenzie aux côtes à fjords abrupts de la baie de Baffin. Les côtes de cette région sont toutefois caractérisées par un hydrodynamisme faible, de sorte que la

Tableau 27 Caractéristiques des milieux côtiers de l'Arctique

		Zone côtière				
	Caractéristiques géologiques	Haute-plage	Plage	Fetch et exposition aux vagues	Marnage moyen	Disponibilité des sédiments
1. Détroit d'Hudson - sud-est de l'île de Baffin	Roches résistantes du Bouclier canadien.	Hautes-terres, falaises de 50 à 500 m (maximum 1 000 m dans l'est); fjords dans toutes les régions de hautes-terres; sud de l'Ungava, basses-terres.	Plages de galets et de cailloux adossées à des plages soulevées dans les zones basses; larges battures de vase ou de sable dans la baie d'Ungava; deltas de têtes de fjords, présence fréquente de blocs dans la zone intertidale.	Régions occidentales exposées aux tempêtes en mer du Labrador; ailleurs, abrité. Saison libre de glace de 3 à 4 mois.	3 à 8 m (maximum 15 m, marée de vives-eaux dans la baie d'Ungava).	Rares, abondants par endroits aux têtes de fjords.
2. Baie d'Hudson	*a.* Roches sédimentaires tendres et non plissées. *b.* Surtout roches résistantes du Bouclier.	*a.* Côte rocheuse très basse (<20 m), souvent marécages ou muskegs et plages soulevées. *b.* Côtes montagneuses ou hautes-terres, hauteur de falaise maximale : 500 m dans le golfe Richmond.	*a.* Plages absentes ou étroites, constituées de galets et de cailloux; larges battures intertidales et hauts-fonds couverts de vase ou de sable dans les régions du sud. *b.* Étroites plages de galets et de cailloux à la base des falaises.	Mer intérieure abritée. Saison libre de glace de 2 à 4 mois.	0,3 à 4 m.	Rares.
3. Côtes à fjords	Bouclier canadien et roches sédimentaires plissées moins résistantes dans le nord d'Ellesmere (chaîne Inuitienne).	Côte montagneuse, relief atteignant 2 000 m (falaises atteignant 1 000 m); très disséquée par les fjords, de nombreux glaciers de marée.	Plages rares sauf dans les régions basses, galets et cailloux, battures de vase et de sable aux têtes des fjords libres de glace.	Côtes abritées : fetch et hydrodynamisme diminuent en direction du nord. Saison libre de glace : 0 à 1 mois dans le nord, 1 à 3 mois dans le sud.	0,5 à 3 m.	Rares.
4. Détroit de Jones - détroit de Lancaster - détroit de Prince Regent	Roches sédimentaires non plissées, relativement non résistantes, essentiellement des calcaires.	Plateau de hautes-terres (relief de 300 à 400 m). Falaises accores et talus d'éboulis à la base; quelques fjords.	Plages étroites à la base des falaises. Plages suspendues dans les régions peu élevées.	Milieu très abrité à hydrodynamisme faible. Saison libre de glace de 1 à 3 mois.	1 à 2 m.	Abondants, mais peu de redistribution.
5. Ouest de l'île Ellesmere et îles Axel Heiberg	Roches sédimentaires plissées (chaîne Inuitienne); directions structurales N.-E.-S.O. à N.-S.	Côtes montagneuses ou hautes-terres, relief de 500 à 1 000 m; les fjords importants suivent les directions structurales.	Plages généralement étroites ou absentes. Plages soulevées dans les régions basses; deltas et battures intertidales de vase ou de sable dans les fjords.	Très abrité, action des vagues faible. Saison libre de glace de 0 à 1 mois.	<1 m.	Abondants, mais peu de redistribution.
6. Plateforme de glace	Chaîne Inuitienne.	Relief élevé, champs de glace, quelques falaises rocheuses (50 à 200 m).	La plateforme de glace empiète sur la mer adjacente; les plages sont absentes sauf à la base des falaises, généralement avec pied de glace permanent.	Action des vagues presque nulle, rarement libre de glace sauf pour d'étroits chenaux.	<1 m.	Rares, le littoral est essentiellement en glace.

Tableau 27 Caractéristiques de milieux cotiers de l'Arctique (suite)

	Caractéristiques géologiques	Zone côtière		Fetch et exposition aux vagues	Marnage moyen	Disponibilité des sédiments
		Haute-plage	Plage			
7. Plaine côtière	Roches sédimentaires non plissées, non résistantes ou sable et graviers meubles.	Le relief diminue d'est en ouest; surtout des côtes très basses.	Les plages sont étroites à l'exception du sud-ouest de l'île Banks; les plages sous-marines sont larges et peu profondes, souvent couvertes de vase et de blocs; nombreux deltas, cours d'eau anastomosés et plages soulevées; flèches et cordons littoraux dans le sud-ouest de l'île Banks.	Très abrité; action des vagues faible ou nulle dans le nord; sud-ouest de l'île Banks libre de glace de 0 à 1 mois (fetch maximal : 100 km).	<1 m.	Abondants, mais faible redistribution, sauf dans le sud-ouest de l'île Banks.
8. Côte à rias	Roches sédimentaires plissées (chaîne Inuitienne); directions structurales approximatives ouest-est.	Relief généralement bas; peu de falaises sauf dans le sud-ouest de l'île Melville; baies et promontoires en alternance.	Plages, deltas, cours d'eau anastomosés et plages soulevées dans les basses-terres; sable ou cailloux et galets avec vase dans les zones abritées.	Très abrité, action des vagues faible; saison libre de glace de 0 à 2 mois.	1 à 2 m.	Abondants mais relativement peu de redistribution.
9. Sud de l'archipel-continent	Roches résistantes du Bouclier avec roches sédimentaires moins résistantes (surtout calcaires) dans les îles; région de dépôts glaciaires.	Région de basses-terres, relief <500 m; falaises de 5 à 20 m; hautes falaises rares.	Plages de cailloux et de galets, plages sous-marines peu profondes, slikkes dans les secteurs abrités et dans le sud-est du bassin Foxe.	Très abrité, action des vagues très faible à de nombreux endroits. Saison libre de glace de 0 à 2 mois.	<1 m, sauf dans le sud-est du bassin Foxe (5 m).	Généralement abondants.
10. Péninsule de Tuktoyaktuk-baie Liverpool	Sédiments meubles (sable et gravier).	Relief peu élevé, littoraux irréguliers, nombreux lacs sur la haute-plage; quelques basses falaises (<10 m), de nombreuses lagunes et dunes; recul rapide de la côte.	Flèches et cordons littoraux peu élevés constitués de sable ou de sable et de cailloux.	Très abrité, surtout la baie Liverpool. Saison libre de glace de 1 à 4 mois.	<1 m, ondes de tempête atteignant 3 m.	Abondants.
11. Delta du fleuve Mackenzie	Sédiments deltaïques meubles.	Relief bas, marais; levées de plage atteignant 3 m; relief plus élevé dans les portions orientales et quelques falaises peu élevées.	Plages étroites de sable/silt sur marge extérieure du delta.	Milieu deltaïque. Saison libre de glace de 1 à 4 mois.	<1 m, ondes de tempête atteignant 3 m.	Abondants.
12. Côte du Yukon	Sédiments meubles.	Falaises basses de roches non résistantes, généralement <20 m (maximum 50 m); recul rapide des côtes.	Cordons littoraux, flèches et deltas peu élevés.	Milieu très abrité. Saison libre de glace de 1 à 4 mois.	<1 m, ondes de tempête atteignant 3 m.	Abondants.

glace de mer et de rivage détermine la durée d'exposition aux processus littoraux.

Vents. Dans toutes les régions, les vents dominants sont d'ouest ou du nord-ouest, sauf dans certaines sections de l'ouest (côte de la mer de Beaufort) où un plus faible nombre de dépressions entraîne des fréquences à peu près égales de vents du sud-est et du nord-ouest (SHC, 1970). En hiver, la masse d'air continentale polaire, un système de haute pression, est centrée sur le bassin Mackenzie et elle se combine à un système de basse pression centré sur les régions du détroit de Davis-baie de Baffin pour produire des vents en provenance du secteur nord pour la majeure partie de cette région (Maxwell, 1981). À mesure que ce système de haute pression se déplace vers le nord et l'est en été, des perturbations cycloniques traversent la baie d'Hudson en direction de la région du détroit de Davis. Dans l'Arctique oriental, en été, les vents sont du sud-ouest à cause de l'influence d'un large système de basse pression centré sur l'Islande et le sud du Groenland.

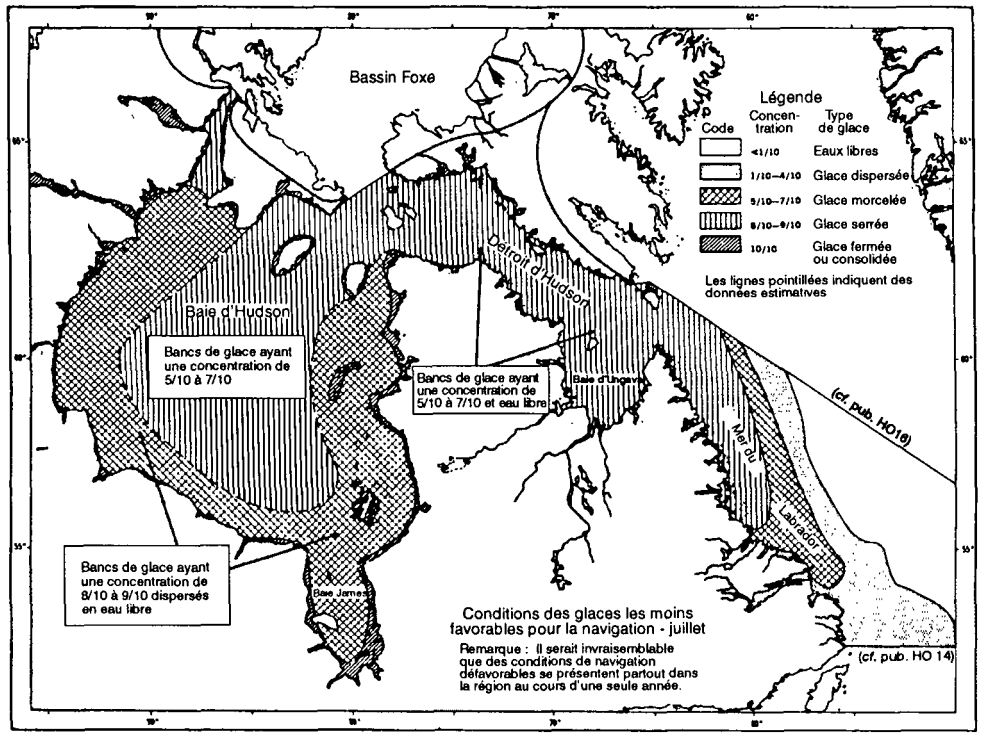
Les vents de surface sont plus variables en été, à cause de la fréquence supérieure des dépressions; les vitesses moyennes des vents présentent cependant peu de différences entre les deux saisons. Comparées à des latitudes plus méridionales, la vitesse des vents est inférieure à cause des gradients de pression relativement faibles associés à la masse d'air continentale polaire.

En été, de forts vents (>50 km/h) ne soufflent en moyenne qu'un ou deux jours par mois (SHC, 1970). Dans les régions élevées, la topographie peut modifier de façon considérable la configuration normale des vents et produire des vents locaux forts.

Vagues. Les caractéristiques de la génération des vagues sont essentiellement liées aux petites longueurs de course du vent et à la présence de glace de mer. Les vagues mesurent généralement moins de 1 m de hauteur et ont de courtes périodes (2 à 4 s). Sauf pour la baie d'Hudson et la baie de Baffin, les fetches mesurent généralement moins de 300 km. Dans ces deux régions, l'énergie des vagues est à son maximum à cause de la taille des plans d'eau et du fait que dans ces régions les périodes d'eau libre sont les plus longues. Dans la baie d'Hudson, les hauteurs de vagues dépassent 4 m de 1 à 2 % du temps en été (juillet à septembre) et les vagues demeurent inférieures à 2 m environ 80 à 90 % de la saison des eaux libres (US Naval Oceanographic Office, 1965). Dans ce milieu, les processus littoraux liés aux vagues s'exercent uniquement si la mer est libre de glace, si la direction du vent coïncide avec la course en eaux libres suffisamment longtemps pour engendrer des vagues et si l'estran et la plage sont libres de glace.

Glace. La distribution de la glace en juillet et en décembre (*cf.* figure 116) représente respectivement les pires conditions estivales et les conditions moyennes hivernales pour le sud-est de l'Arctique. Dans l'Extrême-Arctique, c'est entre le 1er et le 15 septembre que l'étendue d'eau libre est maximale. La figure 117 présente la distribution prévue de la glace durant cette période dans des conditions de glace estivale abondante et peu abondante. En hiver, la banquise consolidée couvre pratiquement toutes les eaux de l'archipel; en effet, la couverture varie entre 6/8 et 8/8 sur le détroit de Lancaster, la baie de Baffin, le bassin Foxe, le détroit d'Hudson et la baie d'Hudson. À mesure que la glace se déplace dans les chenaux vers l'est et le sud à la fin du printemps, le déglacement progresse lentement dans l'archipel. La longueur de la saison libre de glace est

a



b

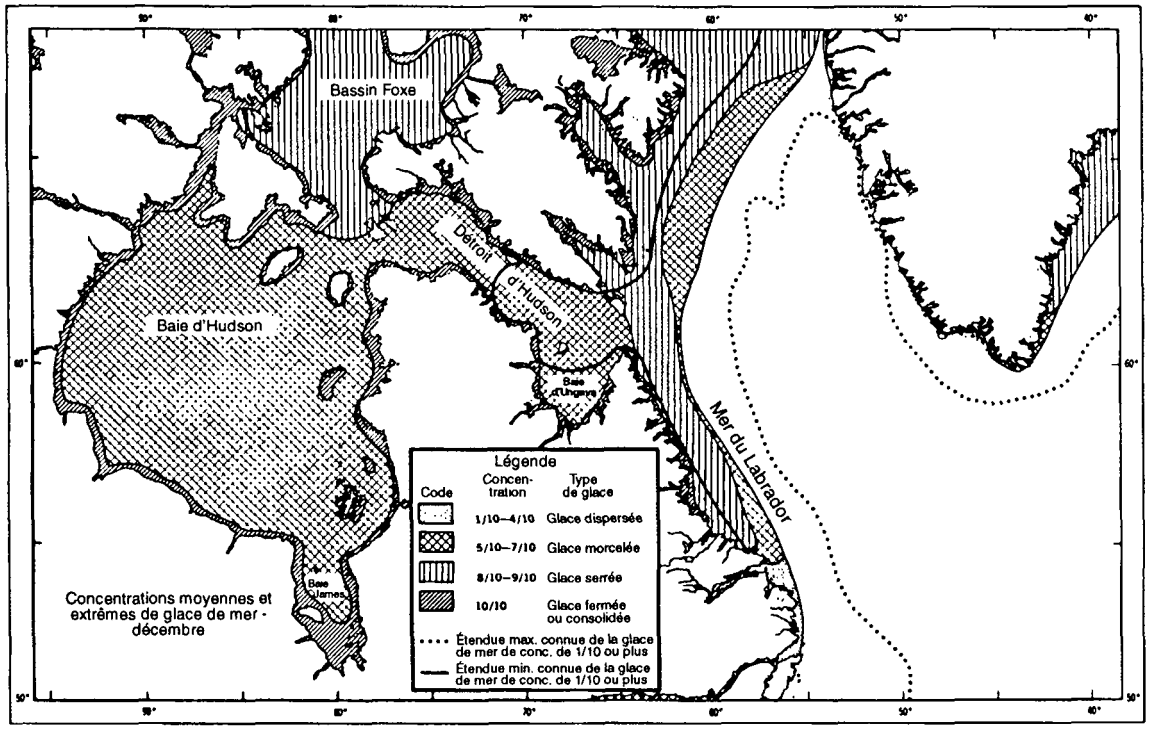


Figure 116 **Distribution de la glace dans les eaux du sud-est de l'Arctique et de la mer du Labrador,** *a*) abondante en juillet et *b*) moyenne en décembre (tiré de l'US Oceanographic Office, 1965)

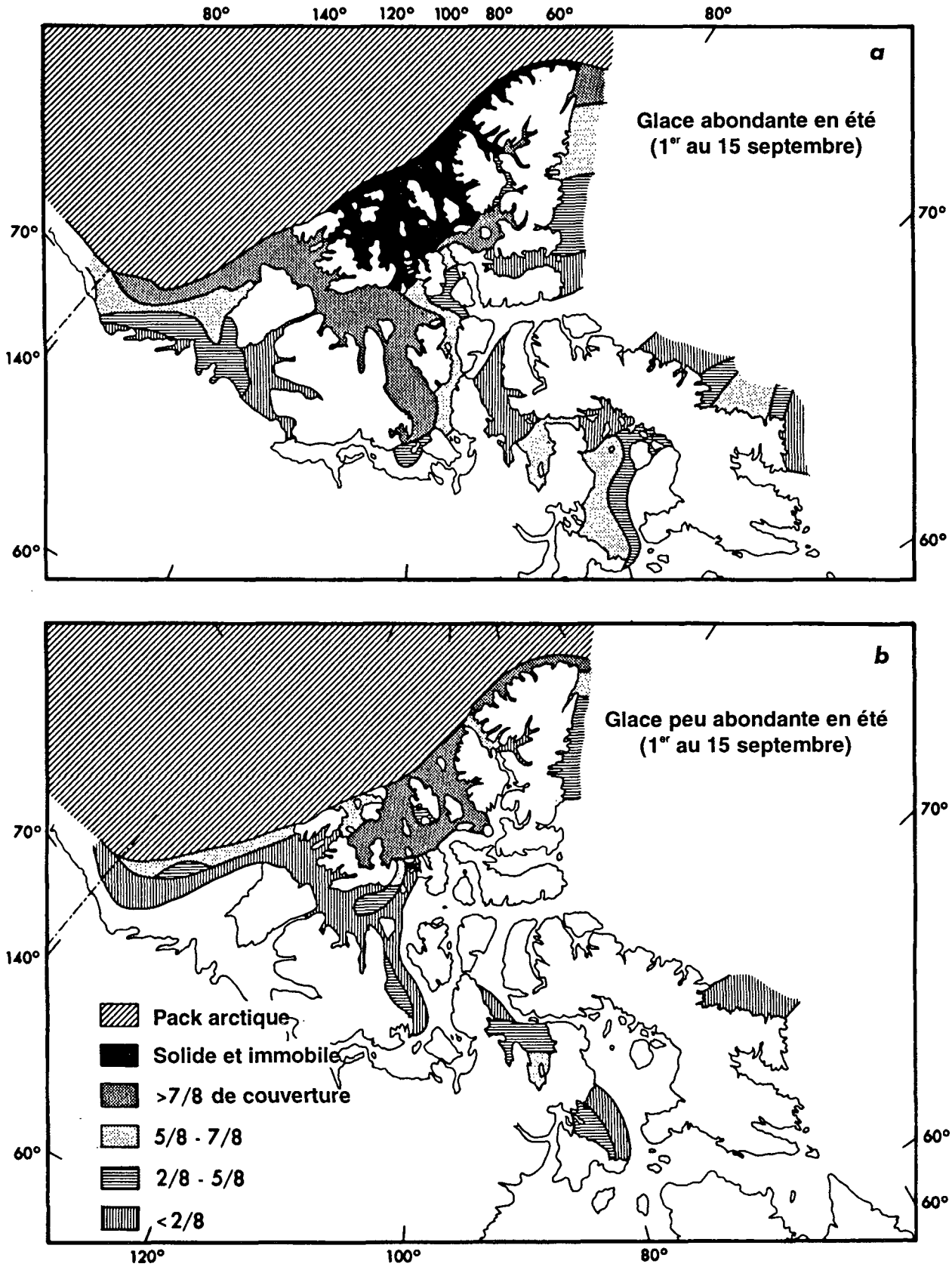


Figure 117 **Distribution de la glace sur les eaux de l'Extrême-Arctique en été,** *a*) condition de glace abondante et *b*) condition de glace peu abondante (d'après SHC, 1970)

minimale dans les sections les plus nord-ouest de l'archipel; dans ces secteurs, il arrive qu'il n'y ait pas de saison d'eau libre certaines années (figure 117). Dans la région nord-ouest, d'importants chenaux côtiers peuvent se former et la zone du rivage peut être influencée par une faible action des eaux marines. Un pied de glace se forme sur la rive avant l'englacement et persiste après le morcellement de la glace de mer, de telle sorte que la période durant laquelle le littoral est libre de glace est plus courte que la période d'eau libre.

Marées. L'amplitude des marées est élevée dans les régions sud-est, le marnage de vives-eaux maximal dépassant 10,0 m (tableau 28). L'amplitude diminue vers le nord et l'ouest, où elle est inférieure à 0,5 m sur les côtes de l'océan Arctique.

Géologie. Ce milieu peut être divisé en quatre unités géologiques. Le **Bouclier canadien (précambrien)** comprend la majeure partie de la côte du continent et, dans l'est, s'étend vers le nord jusqu'à l'île de Baffin, l'est de l'île Devon et le sud-est de l'île d'Ellesmere (figure 118). Le Bouclier a la forme d'un bassin dont le centre est occupé par la baie d'Hudson et dont la bordure orientale correspond aux montagnes de l'est de l'île de Baffin, de l'île Devon et de l'île d'Ellesmere. Dans le nord-ouest, l'océan Arctique est bordé d'une basse **plaine côtière arctique** de roches sédimentaires non déformées. Dans le nord, la **chaîne Inuitienne** se compose de roches sédimentaires plissées qui traversent du nord au sud l'île d'Ellesmere, puis d'est en ouest le nord-est de l'île Devon, l'île Bathurst et l'île Melville. La dernière unité consiste en bassins sédimentaires qui se sont formés sur d'anciennes roches résistantes de la **plateforme du Bouclier canadien**. Ces roches sédimentaires dont la résistance varie beaucoup constituent des hautes-terres, des plateaux et des basses-terres.

Sauf pour les sections de l'ouest et du nord-ouest, la région a été recouverte de glaciers et d'un vaste inlandsis au Pléistocène. Une grande partie de l'Arctique subit à l'heure actuelle une émersion, ou un abaissement du niveau relatif des mers, par suite de l'enfoncement de la croûte terrestre sous le poids de l'inlandsis. À cause de ce soulèvement continu, de nombreuses régions sont caractérisées par des formes littorales surélevées, notamment des plages soulevées. Dans les régions montagneuses ou les hautes-terres, des vallées abruptes érodées par la glace ont été envahies par la mer pour produire des côtes à fjords. À mesure que la glace a reculé sur les basses-terres, au sud des îles de la Reine-Élisabeth, de vastes secteurs ont été recouverts d'épais dépôts de sédiments glaciaires non consolidés.

Géomorphologie côtière. Les littoraux de l'Arctique canadien sont essentiellement rocheux. On observe une grande région d'accumulation (deltaïque) à l'embouchure du Mackenzie sur la côte de la mer de Beaufort. Ailleurs, l'accumulation de sédiments dans la zone littorale est liée soit à la météorisation de la roche en place locale, soit à la présence de petits deltas fluviaux qui déversent des matériaux directement sur le littoral. On retrouve des slikkes dans la partie est du bassin Foxe, dans le sud-est de l'île de Baffin, dans la baie d'Ungava et sur la côte sud-ouest de la baie d'Hudson. Les processus littoraux et la formation de plages sont grandement limités par le très faible hydrodynamisme lié à la très courte saison d'eau libre.

L'érosion des montagnes résistantes du Bouclier canadien a produit un littoral de fjords dans l'Arctique oriental autour du

Tableau 28 Marnages : sud-est de l'île de Baffin et détroit d'Hudson (tiré de SHC, 1988)

Détroit d'Hudson	Marnages	
	Moyen (m)	Maximal (m)
Rive sud		
Baie d'Ungava - bassin Leaf	9,3	14,8
Baie Diana	6,4	10,2
Sugluk	3,4	5,6
Rive nord		
Havre Lake	7,7	12,7
Baie Frobisher		
Frobisher	7,3	11,6
Détroit de Cumberland		
Île Imigen	4,9	7,0

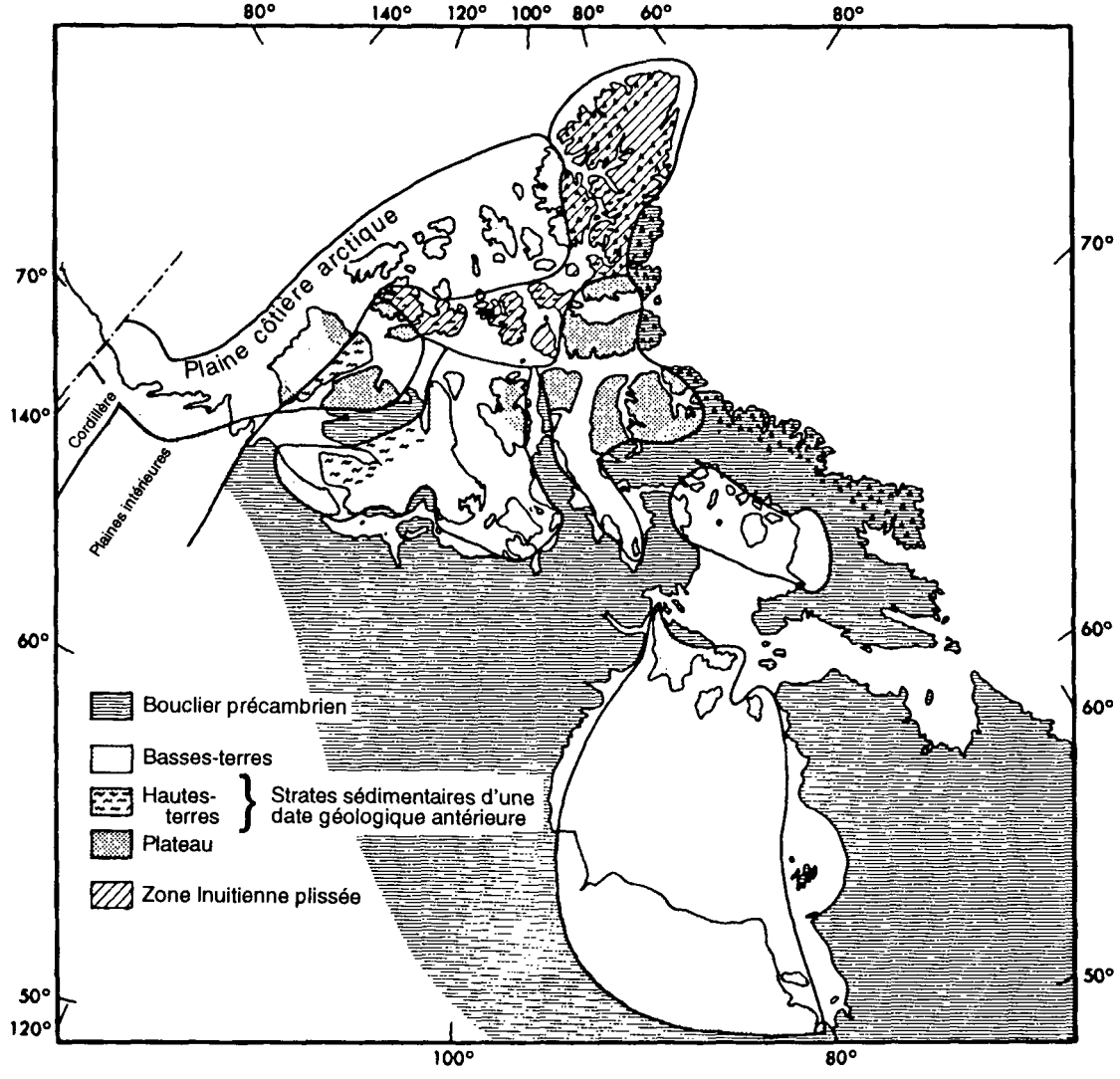


Figure 118 Carte géologique généralisée de l'Arctique canadien (d'après SHC, 1970)

détroit de Davis, de la baie de Baffin et du bassin Kane. Ailleurs, la côte du Bouclier forme un littoral bas et résistant. Bien que les bassins sédimentaires se composent de roches moins résistantes, les faibles taux d'érosion de la côte, liés à un hydrodynamisme faible, ont entraîné relativement peu de modifications du littoral. Par endroits, les accumulations de sédiments ont façonné des plages, des flèches et des deltas, mais, sauf pour la plaine côtière, les côtes présentent généralement des falaises élevées ou basses. Là où la haute-plage est basse, d'étroites plages de galets et de cailloux se sont formées. La région arctique a été recouverte d'un épais inlandsis au Pléistocène et, sous le poids de cette glace, les terres se sont enfoncées. Depuis la fonte du glacier, les terres se sont soulevées et, dans la plupart des régions, continuent encore de se soulever, de telle sorte qu'on enregistre un abaissement relatif du niveau de la mer, malgré la tendance mondiale générale inverse. Dans les sections de basses-terres, cela a donné naissance à une série de plages soulevées ou échouées qui se trouvent à plusieurs centaines de mètres au-dessus du niveau actuel de la mer.

Ce milieu est soumis aux mêmes processus que ceux des latitudes moins élevées; toutefois, la glace joue ici un rôle important en atténuant l'intensité de ces processus. Les littoraux sont essentiellement des falaises rocheuses peu battues par les vagues.

4.4.2 Détroit d'Hudson et sud-est de l'île de Baffin

Les côtes de ce milieu sont essentiellement des hautes-terres à grand marnage. Ici, la bordure est du Bouclier canadien forme un relief élevé résistant découpé par le détroit d'Hudson. Dans le sud-est de l'île de Baffin, les directions structurales sont nord-ouest-sud-est et sont parallèles aux importants fjords et baies que sont les baies Frobisher et Cumberland. Sur la rive sud du détroit d'Hudson, la baie d'Ungava est une vaste indentation formée d'une partie basse du Bouclier recouverte d'un manteau relativement épais de sédiments glaciaires. Ailleurs, les dépôts de surface sont clairsemés et minces.

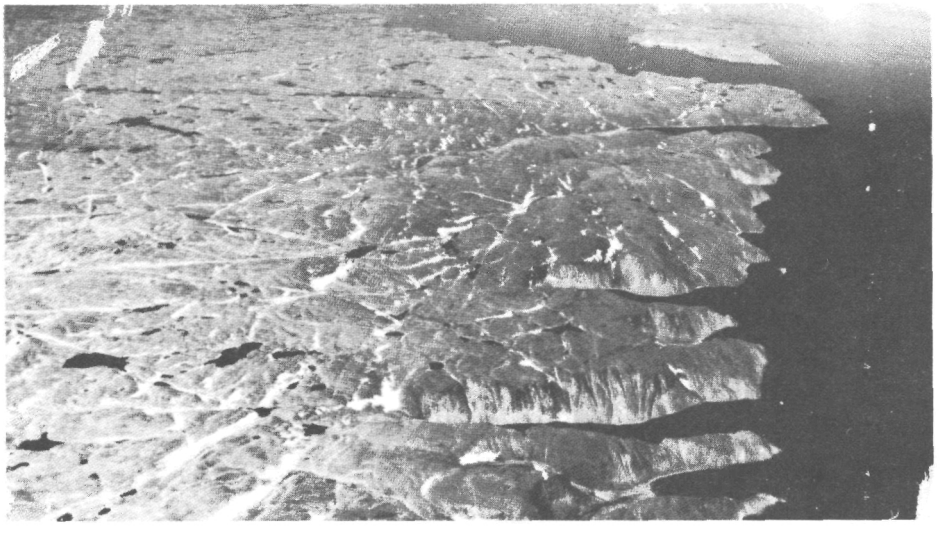
La forte amplitude des marées semi-diurnes ou semi-diurnes mixtes constitue la principale caractéristique de ce milieu (tableau 28). Le long de la rive sud du détroit, le marnage moyen dépasse 3,4 m (5,6 m pour le marnage de vives-eaux); dans la baie d'Ungava il dépasse 6,6 m (10,2 m de marnage de vives-eaux). Sur la rive nord, les amplitudes sont supérieures à 4,1 m (11,6 m de marnage de vives-eaux à Iqaluit) et supérieures à 5,0 m sur la côte exposée du détroit de Davis et de la mer du Labrador. Fait intéressant : il arrive souvent que le marnage de vives-eaux soit le double du marnage de mortes-eaux (tableau 28 : Frobisher). Les courants de marées supérieurs à 2,6 m/s sont fréquents; ils atteignent 6 m/s dans certains chenaux, tels que le passage Smokey de la baie d'Ungava (SHC, 1974b). Les vents dominants sont du nord-ouest, et en été, on note des vents plus variables et généralement de vitesse inférieure à cause des gradients de pression plus faibles. Les coups de vent (vents >50 km/h) se produisent le plus souvent en automne et en hiver, sur une moyenne de 5 jours par mois en août à un maximum de 10 jours en novembre et décembre (SHC, 1974b). La période des tempêtes coïncide avec la saison des eaux libres, les côtes exposées étant alors fortement battues par les vagues. L'hydrodynamisme est à son maximum sur la côte sud-est exposée de l'île de Baffin, mais une large part de cette unité correspond plutôt à un milieu à mode calme, à cause de la très grande irrégularité de cette côte.

Le morcellement de la glace de mer débute en juin et, à la fin de juillet, on signale de la glace seulement dans la baie d'Ungava, la baie Frobisher et la baie Cumberland. Si la glace a été particulièrement abondante, il se peut que les détroits ne soient pas libres de glace avant août (figure 116*a*). L'englacement commence à la fin d'octobre et, sur la plupart des côtes, la plupart des régions côtières sont couvertes de glace ferme dans une proportion de 10/10 dès la fin de novembre (figure 116*b*). La saison d'eaux libres à Frobisher dure généralement environ 90 jours.

La géomorphologie côtière de ce milieu offre un contraste entre les falaises accores et les larges vasières intertidales. Le rivage oriental de la baie d'Ungava est une basse-terre rocheuse comportant quelques fjords et falaises. Au sud, le relief, bas, comporte une avant-plage très peu profonde et de larges slikkes exposées à marée basse.

La côte ouest est basse et rocheuse et marquée de larges baies et de bras ainsi que de slikkes parsemées de blocs [p. ex., bassin Leaf (Lauriol et Gray, 1980)]. Le reste de la rive sud du détroit d'Hudson se compose surtout de falaises dont les hauteurs atteignent 600 m à certains endroits (figure 119). Cette côte relativement linéaire est brisée par des sections rocheuses basses, de petits deltas et des fjords à parois abruptes.

La rive nord du détroit d'Hudson est une côte rocheuse élevée parsemée de nombreuses îles, baies et fjords. Le sud-est de l'île de Baffin est essentiellement une côte à fjords comportant des falaises abruptes; les côtes exposées au large y sont fortement battues par les vagues. Les baies Frobisher et Cumberland, séparées par la péninsule Hall qui s'élève à 1 160 m, sont de larges indentations affouillées par les glaciers et dont les côtes sont entaillées de fjords et de baies secondaires. Dans cette



Le relief côtier est de 300 à 500 m, cette section du détroit est entaillée par de nombreux fjords accores.

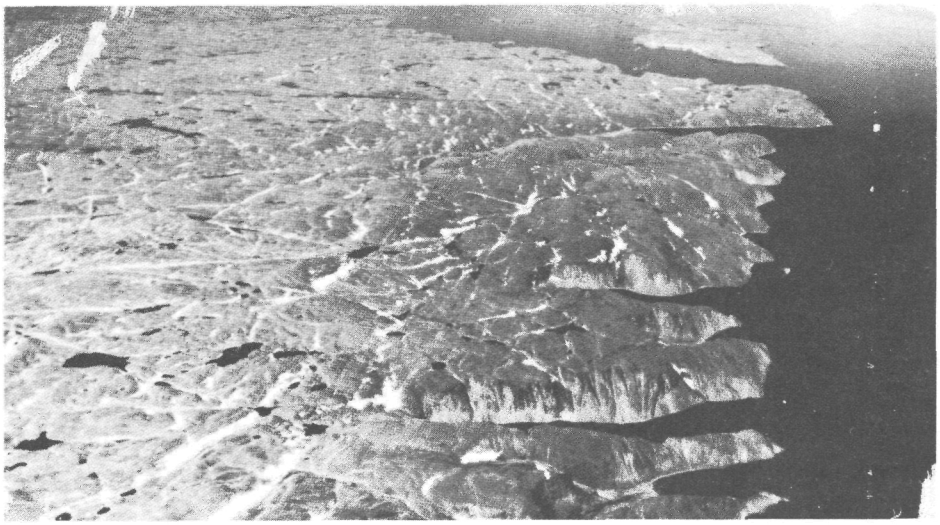
Figure 119 **Côte sud du détroit d'Hudson, vue vers le cap Wolstenholme** (photo prise à la fin de juillet) (tiré de Dunbar et Greenaway, 1956)

Le morcellement de la glace de mer débute en juin et, à la fin de juillet, on signale de la glace seulement dans la baie d'Ungava, la baie Frobisher et la baie Cumberland. Si la glace a été particulièrement abondante, il se peut que les détroits ne soient pas libres de glace avant août (figure 116*a*). L'englacement commence à la fin d'octobre et, sur la plupart des côtes, la plupart des régions côtières sont couvertes de glace ferme dans une proportion de 10/10 dès la fin de novembre (figure 116*b*). La saison d'eaux libres à Frobisher dure généralement environ 90 jours.

La géomorphologie côtière de ce milieu offre un contraste entre les falaises accores et les larges vasières intertidales. Le rivage oriental de la baie d'Ungava est une basse-terre rocheuse comportant quelques fjords et falaises. Au sud, le relief, bas, comporte une avant-plage très peu profonde et de larges slikkes exposées à marée basse.

La côte ouest est basse et rocheuse et marquée de larges baies et de bras ainsi que de slikkes parsemées de blocs [p. ex., bassin Leaf (Lauriol et Gray, 1980)]. Le reste de la rive sud du détroit d'Hudson se compose surtout de falaises dont les hauteurs atteignent 600 m à certains endroits (figure 119). Cette côte relativement linéaire est brisée par des sections rocheuses basses, de petits deltas et des fjords à parois abruptes.

La rive nord du détroit d'Hudson est une côte rocheuse élevée parsemée de nombreuses îles, baies et fjords. Le sud-est de l'île de Baffin est essentiellement une côte à fjords comportant des falaises abruptes; les côtes exposées au large y sont fortement battues par les vagues. Les baies Frobisher et Cumberland, séparées par la péninsule Hall qui s'élève à 1 160 m, sont de larges indentations affouillées par les glaciers et dont les côtes sont entaillées de fjords et de baies secondaires. Dans cette



Le relief côtier est de 300 à 500 m, cette section du détroit est entaillée par de nombreux fjords accores.

Figure 119 **Côte sud du détroit d'Hudson, vue vers le cap Wolstenholme** (photo prise à la fin de juillet) (tiré de Dunbar et Greenaway, 1956)

4.4.3 Baie d'Hudson - baie James

Les côtes qui bordent la grande mer intérieure qu'est la baie d'Hudson sont essentiellement basses et rocheuses. La zone côtière basse de la région de la baie James est avant tout une région de sédiments et de muskegs. La baie d'Hudson est un grand bassin en forme de fer à cheval qui occupe le centre du Bouclier canadien par suite de l'invasion marine progressant par les chenaux vers le sud. Il s'agit essentiellement d'affleurements d'anciennes roches sédimentaires et métasédimentaires résistantes, caractérisés par un relief rocheux et souvent ondulé; des roches sédimentaires plus jeunes se sont accumulées dans la partie centrale du bassin. Ces roches plus jeunes sont exposées dans la partie sud de l'île Southampton, dans l'ouest de la baie James et dans le sud-ouest de la baie d'Hudson, et forment des basses-terres moins résistantes. Le relief est généralement très bas (<60 m), mais atteint par endroits 500 m dans le nord-ouest et le nord-est.

Le marnage moyen des marées semi-diurnes varie de 0,3 m à la pointe Harrison sur la rive nord-est, à 2,1 m dans la baie James et 3,8 m à Port Nelson sur la côte sud-ouest (SHC, 1988). Dans la baie d'Hudson, les eaux circulent surtout dans le sens anti-horaire. Les vents viennent généralement du nord-nord-ouest et des dépressions traversent la région à la fin de l'automne. On peut prévoir des coups de vent (>50 km/h) sur une moyenne de six jours au mois de novembre. La hauteur des vagues est de 1,0 à 1,5 m en moyenne, l'été, et augmente généralement du sud vers le nord, avec des hauteurs maximales observées en août et septembre de 3,7 et 4,5 m dans le sud et de 5,6 et 8,0 m dans le nord (Maxwell, 1986). L'englacement du pourtour de la baie débute en octobre et, dans la baie James, en novembre (Markham, 1986). Le morcellement de la glace commence dans la baie James à la fin de mai, et dans la baie d'Hudson en juillet; la plupart des régions sont donc libres de glace au début d'août.

La côte ouest de la baie d'Hudson (figure 121) passe d'une structure rocheuse et ondulée au nord à un paysage bas et marécageux, avec une large plateforme intertidale au sud. Au nord de l'inlet Chesterfield, la côte irrégulière et indentée présente un relief dont l'altitude est généralement inférieure à 30 m. Le littoral bas se prolonge vers la mer en une large plateforme rocheuse peu profonde et bordée de nombreuses îles (Dunbar et Greenaway, 1956). Au sud du bras Chesterfield, le relief est beaucoup moins élevé et la plaine côtière en pente douce, souvent marécageuse, cède la place à des wadden dont la largeur peut atteindre 9 km (Shilts et Boydell, 1974). Ces larges wadden sont découverts à marée basse et plaqués par endroits de vase ou de sable et de blocs.

Au sud de Churchill, la côte basse demeure marécageuse, mais les larges wadden ont une couverture sédimentaire éparse. Une étroite plage de galets et de cailloux dans le haut de la zone intertidale ne s'étend qu'à 1 m au-dessus de la laisse normale de pleine mer (Beals, 1968). En été, la profondeur maximale de dégel des sédiments de la plage est d'environ 90 cm (Shilts et Boydell, 1974). Dans certaines régions, la plateforme littorale atteint 30 km de largeur.

Sur le flanc ouest de la baie James, la côte relativement linéaire se compose de bas muskegs sur la haute-plage et de larges battures couvertes d'un placage de sable ou de vase. De nombreuses sections de ces basses-terres ont des milieux estuariens, soit de larges marais salés et saumâtres pouvant s'étendre vers l'intérieur sur plus de 1 km (Martini *et al.*, 1980).

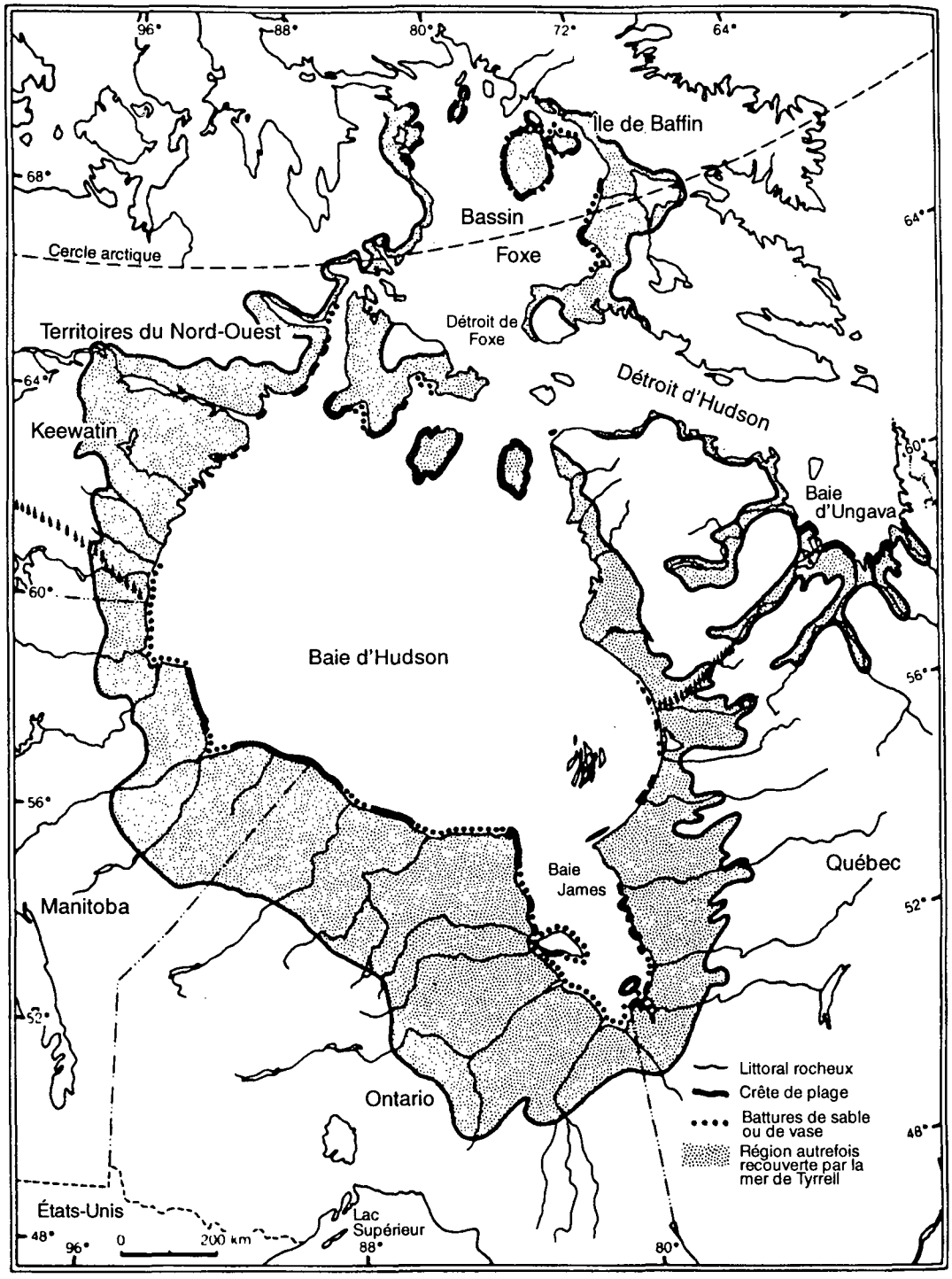


Figure 121 **Caractéristiques du littoral de la région de la baie d'Hudson, de la baie James, du bassin Foxe et de la baie d'Ungava** (tiré de Martini, 1986)

La rive est de la baie James a un relief très bas (<20 m), caractérisé par la présence de drumlins et une côte extrêmement complexe et irrégulière parsemée de nombreuses îles, d'îlots rocheux et de hauts-fonds. De larges battures de sable et de vase, jonchées de blocs et adossées à des marécages et des muskegs, sont alimentées par les sédiments fluviaux de plus de cinquante cours d'eau qui se déversent dans la baie; des deltas se sont formés à l'embouchure de certains d'entre eux (p. ex., le delta de la rivière La Grande). On trouve des plages discontinues de sable, de graviers et de galets dans la partie supérieure du rivage et les sédiments de la taille des cailloux et des blocs sont fréquents près des drumlins en érosion, surtout dans les secteurs nord (Dionne, 1980b). Les niveaux d'hydrodynamisme sur le rivage sont réduits parce que les pentes des avant-plages sont très faibles; en effet, l'isobathe de 20 m se trouve parfois à 15 km du littoral (Dionne, 1980b). De la glace est soudée à la côte durant trois à quatre mois chaque année et les processus glaciels s'exercent donc entre 6 et 8 mois par année (Dionne, 1980a).

Par suite du recul de l'inlandsis, la mer postglaciaire (la mer de Tyrrell, figure 121) a envahi la région de la baie d'Hudson. Avec l'affaissement de la croûte sous le poids de l'inlandsis et le relèvement subséquent, certaines parties de l'est de la baie d'Hudson, dans le lac Guillaume-Delisle, se trouvent aujourd'hui à 315 m au-dessus du niveau actuel des mers (Bird, 1967). Ce soulèvement se poursuit aujourd'hui et on observe une baisse relative du niveau de la mer qui atteint 0,7 à 1,0 m/siècle dans la région du cap Henrietta Marie (Martini, 1986). Dans les régions basses du sud de la baie d'Hudson et de la baie James, cette baisse relative du niveau de la mer a un effet marqué sur la modification du littoral. Aux endroits où les pentes sont de 0,5 m/km, jusqu'à 1 à 2 km de terre émergent chaque siècle (Martini, 1986). On a enregistré une avancée des marais de l'ordre de 300 m en 15 et 21 ans respectivement dans le sud de la baie d'Hudson et dans la baie Rupert de l'est de la baie James (Martini, 1982; D'Anglejan, 1980).

Au nord de la baie James, la côte forme un grand arc. Le littoral est parsemé d'une série d'îles parallèles constituées d'affleurements de roches sédimentaires et volcaniques résistantes qui s'enfoncent sous les eaux en direction de l'ouest. Les affleurements rocheux et les sédiments grossiers, surtout les blocs, sont fréquents dans toute cette région (Guimont et Laverdière, 1980). Dans les secteurs nord de cette section arquée, le relief passe de 60 à 500 m au maximum dans le lac Guillaume-Delisle, section de côte rocheuse aux falaises abruptes. Les îles au large des côtes, y compris les îles Belcher, sont essentiellement basses et rocheuses et présentent des rivages en dentelle liés à la forme arquée des affleurements résistants. Au nord de cette section, la côte devient plus irrégulière avec des falaises atteignant 300 m à la pointe d'Ivugivik.

La rive sud de l'île Southampton est basse (<150 m) et comporte une plage sous-marine peu profonde ponctuée de nombreux récifs. Les wadden rocheux, dont la largeur atteint 6 km, cèdent la place, dans les baies, à des dépôts vaseux intertidaux, là où la haute-plage est couverte de marais (Dunbar et Greenaway, 1956).

Les côtes hudsoniennes sont essentiellement basses et rocheuses et précédées de larges plateformes peu profondes. Les battures intertidales sont recouvertes de sable ou de vase dans le sud, mais sont rocheuses ailleurs ou jonchées de blocs. De larges

sections de cette côte n'ont pas encore été explorées, parce que l'accès par la mer y est difficile.

4.4.4 Côte à fjords

Du centre de l'île de Baffin au coin nord-est de l'île d'Ellesmere s'étend une côte à fjords composée, dans la plupart des sections, d'une côte montagneuse marquée de fjords à parois escarpées. À de nombreux endroits, des glaciers descendent jusque dans la mer et constituent une source d'icebergs qui sont transportés vers le sud par les courants côtiers. Sauf pour la moitié nord de l'île d'Ellesmere, la région correspond à la bordure orientale du Bouclier canadien, constitué de roches résistantes. La partie nord de l'île d'Ellesmere fait partie du système de la chaîne Inuitienne qui traverse cette région du sud-ouest au nord-est. Le relief, élevé près de la zone côtière, atteint 2 133 m sur l'île de Baffin, 1 828 m sur l'île Bylot, 1 886 m sur l'est de l'île Devon et 2 133 m sur l'île d'Ellesmere.

Sur l'île de Baffin, l'amplitude moyenne des marées semi-diurnes et semi-diurnes mixtes varie de 1,9 m (2,8 m pour les marées de vives-eaux) au Cap Dyer sur la côte est à 0,9 m (1,4 m pour les marées de vives-eaux) sur la côte nord-est. On enregistre dans le sud-est de l'île d'Ellesmere un marnage élevé (2,9 m de moyenne, 4,8 m pour les vives-eaux) qui diminue en direction du nord, soit 0,6 et 1,0 m à l'extrémité nord-est de l'île (SHC, 1988). Les courants côtiers du sud du détroit Smith circulent du nord vers le sud, parallèlement à la côte et à des vitesses de 0,3 m/s dans le détroit et 0,05 à 0,2 m/s au large de l'île de Baffin (SHC, 1970). Les vents dominants sont du secteur ouest le long de ce milieu, mais il existe un effet local de canalisation considérable dans les hauts fjords à parois élevées et escarpées. La côte est de l'île de Baffin est exposée à un fetch de 500 km, mais l'hydrodynamisme diminue rapidement dans la moitié nord de cette unité, la côte devenant plus abritée et la saison d'eau libre plus courte. Certaines portions du centre nord de la baie de Baffin demeurent libres de glace toute l'année, alors que la glace ne disparaît pas des côtes de l'est de l'île Devon et du nord-est de l'île de Baffin avant le milieu ou la fin du mois de juillet. L'englacement commence à la fin de septembre ou en octobre, de telle sorte que cette région du nord de l'île de Baffin et de l'est de l'île Devon n'est libre de glace que 2 à 3 mois par année. Les portions nord de la baie de Baffin et du bassin Kane peuvent demeurer entièrement englacées certaines années et le bras Makinson n'est ouvert qu'environ 30 jours par année (Taylor, 1973). À Alert, sur l'extrémité nord de l'île d'Ellesmere, la côte est généralement à l'eau libre pendant seulement 10 à 15 jours par année.

Dans tout ce milieu, la côte est dominée par un relief élevé, de longs fjords étroits et des glaciers qui descendent jusqu'à la plaine côtière ou jusqu'à la mer (figure 122). De nombreuses sections de cette côte sont constituées de falaises dont la hauteur atteint 1 000 m, mais dont la base est souvent enfouie sous un talus d'éboulis puisque l'action des vagues est incapable de transporter ces matériaux (figure 123). Il en résulte la présence de plages sur environ 75 % du littoral (Semples, 1982). Les fjords ont généralement des parois abruptes avec à leur tête un delta à battures intertidales (figure 124) (Syvitski, 1986) ou, au nord du 72e parallèle, des glaciers de marée (Semples, 1982). Les deltas à la tête des fjords sont souvent associés à des «sandurs» (plaines de sable) de sédiments sableux ou graveleux (Syvitski, 1986). Sur les côtes exposées où le relief est mineur, les plateformes de blocs et les plages de cailloux et de galets sont fréquentes. Plusieurs promontoires sableux se sont développés là où existe une source de matériaux à grain fin

Figure 122 **Relief élevé, côte rocheuse, sud de l'île Bylot** (août 1979)

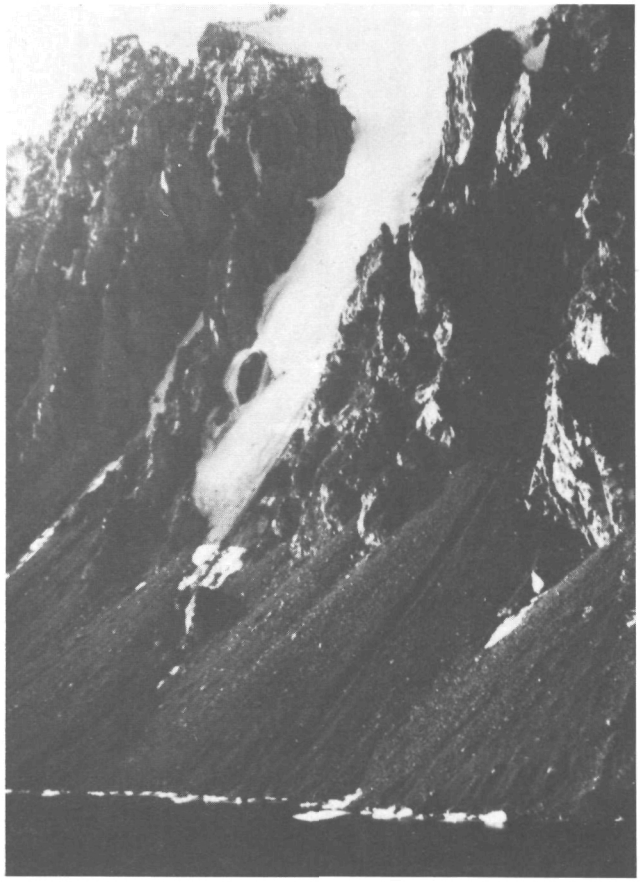


Figure 123 **Falaises élevées à glacier suspendu et talus d'éboulis coalescents recouvrant les sections inférieures, sud de l'île Bylot** (août 1979)

Figure 124 **Delta à la tête d'un petit fjord tributaire, près du bras Milne, rive sud du détroit d'Éclipse** (août 1979)

et là où l'action des vagues est suffisante pour remanier et redistribuer les sédiments. Dans ces milieux, le vent peut aussi constituer un agent majeur de transport des sédiments. Dans le centre-est de l'île de Baffin, la région de la baie Home est une basse plaine côtière qui interrompt cette côte par ailleurs escarpée (figure 125). Cette baie est relativement peu profonde et est parsemée de bon nombre d'îles rocheuses et de récifs. D'après Semples (1982), la distribution des sédiments de plage y est la suivante : blocs, 34,5 %; gravier, 28,2 % et sable, 10,3 %.

L'importance des tempêtes dans le transport des sédiments et la modification des plages a été reconnue, mais rarement étudiée. Une tempête qui a sévi au large de l'île Bylot en août 1979, au cours de laquelle les vents ont atteint 50 km/h et produit des brisants de 4 m de hauteur, ne se produirait qu'une fois par année ou tous les deux ans (Taylor, 1981). Les effets des vagues sur la plage durant cette tempête ont été considérablement réduits par la présence de glace de mer, qui a atténué les vagues arrivantes (*cf.* figure 14), et la présence de la glace sur le rivage qui a absorbé l'énergie des vagues déferlantes.

La côte est de l'île Devon est un littoral élevé à fjords présentant de nombreux glaciers qui vêlent dans la baie de Baffin. Dans la section entre la baie Brae et la pointe Rapier, Taylor et Frobel (1984) estiment à 30 % la portion de la côte qui se compose de glaciers de marée qui descendent les vallées et dont certains ont des fronts qui dépassent 50 m de hauteur. Entre les glaciers de vallées, la côte est caractérisée par des falaises élevées (300 à 500 m) à talus d'éboulis. La côte sud-est présente un relief plus faible de bas fronts glaciaires (figure 126). L'île Coburg dans l'est du détroit de Jones présente, presque partout, des falaises verticales de roches ou de glace.

La côte est de l'île d'Ellesmere comporte de nombreux glaciers de marée et toute la côte

Figure 125 Large plaine littorale, au nord de Clyde, est de l'île de Baffin (août 1979)

est constituée soit de falaises élevées soit de glaciers en vêlage. Le relief à l'intérieur des terres atteint 2 000 m. Dans la région du passage Kennedy et du détroit de Robeson, la côte est beaucoup plus linéaire et les fjords suivent la direction sud-ouest-nord-est de la structure de la chaîne Inuitienne, notamment, la baie Lady Franklin. Ailleurs, la côte de l'île d'Ellesmere est profondément échancrée par des fjords. De nombreuses falaises ont à leur pied un talus d'éboulis, et dans les secteurs plus au nord (au nord du 80e parallèle), existe souvent un pied de glace permanent qui s'étend de 4 à 10 m au-dessus du niveau de l'eau. Dans la partie en amont des fjords, certaines régions basses comportent des dépôts de plage et des petits deltas à battures intertidales sont fréquents là où les têtes de fjords sont libres de glace (Taylor, 1973; Krawetz et McCann, 1986).

4.4.5 Détroit de Jones - détroit de Lancaster - détroit de Prince Regent

Cette région de l'archipel du centre-est (figure 115) a des côtes linéaires et élevées, interrompues par quelques fjords. Il s'agit d'une région de roches sédimentaires (figure 118) qui sont, dans la plupart des endroits, des calcaires relativement peu résistants, en couches horizontales. Il s'agit d'un ancien plateau dont les reliefs sont de l'ordre de 300 à 400 m (Bird, 1967). Les profonds bassins qui séparent les îles ont été élargis sous l'effet de l'érosion des glaciers occupant les vallées de rivières fluviales préexistantes (Craig et Fyles, 1960). Les chenaux sont donc relativement linéaires et escarpés et ressemblent à de très grands fjords submergés. La région a été largement érodée par les inlandsis et présente très peu de dépôts glaciaires non consolidés.

Figure 126 Front glaciaire peu élevé, sud-est de l'île Devon (septembre 1980)

Le marnage moyen varie de 1,3 à 2,2 m, le marnage de vives-eaux variant entre 2,1 et 4,0 m. Les valeurs maximales s'observent dans le détroit de Jones (SHC, 1988). Des données sur les vents enregistrées à Resolute indiquent que les vents dominants sont du nord-ouest. D'après Collin (1962), les données sur les vents enregistrées à Resolute pourraient ne pas représenter les conditions régionales à cause d'effets topographiques. Ce milieu est peu exposé aux vagues et les conditions d'énergie élevée ne se produisent que rarement lorsque de forts vents du large coïncident avec l'eau libre (McCann et Taylor, 1975; Taylor, 1975; Taylor et McCann, 1976). Au cours de cinq années consécutives, de 1972 à 1976, les études réalisées dans le nord de l'île Somerset ont montré que pendant une seule des saisons d'eau libre les vagues étaient-elles suffisamment puissantes pour modifier les plages, lorsque toutes les conditions favorables étaient réunies, soit des vents puissants, l'eau libre et un long fetch (Taylor, 1980b).

La glace commence à se morceler dans les secteurs est à la fin de juin pour être transportée vers l'est et le sud, mais le détroit de Barrow, le détroit de Wellington et l'ouest du détroit de Jones ne sont généralement pas libres de glace avant la mi-août. L'englacement commence en septembre et est généralement complet à la mi-octobre, de telle sorte que la saison libre de glace ne dure qu'un à deux mois. Dans le détroit de Jones, la banquise côtière persiste tout l'été certaines années. La fonte tardive du pied de glace après le déglacement et sa formation avant l'engel réduisent la longueur de la saison d'eau libre dans toutes les régions (Owens et McCann, 1970; Taylor et McCann, 1976). Taylor (1973) signale que la côte du nord de l'île Somerset connaît en moyenne 58 jours sans gel, mais qu'à Resolute, la moyenne n'est que de 44. Dans la baie Radstock du sud-ouest de l'île Devon, le pied de glace est demeuré sur la plage durant tout l'été de 1972 (*cf.* figure 15*b*) (McCann et Taylor, 1975). Les processus glaciels sont importants sur le littoral et les crêtes de poussée, qui

s'étendent parfois sur 200 m à l'intérieur des côtes, ainsi que des crêtes de poussée échouées atteignant 30 m de hauteur sont relativement fréquentes (figure 12) (Owens et McCann, 1970; Taylor, 1978b).

Les côtes de ce milieu sont généralement linéaires et hautes et présentent essentiellement des falaises (figures 127 et 128). Les falaises abruptes, qui atteignent des hauteurs de 600 m au maximum, sont généralement protégées à la base par un cône d'éboulis (figure 129). Les plages de galets et de cailloux de ce genre de côte sont habituellement étroites. Les côtes linéaires sont interrompues par des fjords, notamment dans le sud de l'île d'Ellesmere et le nord-est et le sud de l'île Devon. Les basses-terres, par exemple la région du Cap Storm du sud de l'île d'Ellesmere (Blake, 1975), de la baie Radstock du sud-ouest de l'île Devon et du nord de l'île Somerset (Taylor, 1974), présentent de basses plages, des deltas, des flèches et des îles barrières adossées à des séries de plages soulevées (figures 130 et 131). Les fjords ont généralement de petits deltas de fond de baie et des wadden dans les cas où les glaciers ne descendent pas jusqu'à l'eau. Même si la roche en place est assez peu résistante, les taux d'érosion et de transport des sédiments littoraux sont très faibles à cause de l'incapacité des vagues à redistribuer les sédiments durant les très courtes périodes d'eau libre. L'érosion des falaises est liée essentiellement à la gélivation sur les fronts de falaises et les gros éboulements rocheux sont fréquemment transportés par la glace durant la débâcle, plutôt que par les vagues (figure 132). Les dépôts de plage sont généralement minces, une couche de matériaux grossiers (gravier) (figure 133) reposant sur la roche en place d'origine, de telle sorte que la forme et l'orientation d'une large part de cette côte sont déterminées par la roche en place (Taylor, 1978a). L'orientation de la côte peut avoir un effet local important sur les processus littoraux. À titre d'exemple, dans le nord de l'île Somerset, le rivage face à l'ouest est plus soumis à l'action glacielle, les floes se déplaçant d'ouest en est dans le détroit de Lancaster, tandis que le rivage orienté vers l'est, exposé à un plus grand fetch, est plus dynamique et subit un remaniement plus marqué à cause de l'importance plus grande de l'action des vagues et de la plus grande disponibilité de sédiments (figure 134) (Taylor, 1980b). La profondeur annuelle moyenne de dégel dans cette région n'est que de 50 cm pour le gravier et de 80 cm pour les plages de sable, même si l'épaisseur maximale de la couche active en août peut être de l'ordre de 100 cm pour le gravier et 160 cm pour les plages de sable (Taylor, 1980a).

4.4.6 Partie ouest de l'île d'Ellesmere et île Axel Heiberg

Par rapport aux côtes de la baie de Baffin et du détroit de Davis (division 4.4.4), cette côte à fjords présente un relief moins élevé, des roches moins résistantes et un hydrodynamisme beaucoup plus faible. Cette région fait partie de la chaîne Inuitienne, un système de roches sédimentaires plissées orientées nord-est-sud-ouest dans l'île d'Ellesmere et à peu près nord-sud dans l'île Axel Heiberg (figure 118). Le relief culmine à 2 000 m à l'intérieur des terres, mais est généralement inférieur à 500 m près des côtes.

Les marnages moyens et de vives-eaux sont partout inférieurs respectivement à 0,2 m et 0,5 m (SHC, 1988). En été, les vents dominants sont du nord-ouest et entraînent la banquise morcelée dans les chenaux vers l'eau plus libre au sud et à l'est. Durant les années où la glace est abondante, les côtes de cette région peuvent demeurer emprisonnées dans la glace, même dans les régions les plus au sud adjacentes à la

Figure 127 **Côte est du détroit de Prince Regent, péninsule Brodeur** (fin juillet, 1967) (le littoral se compose de falaises à larges pentes d'éboulis et de plages soulevées dans les régions plus basses)

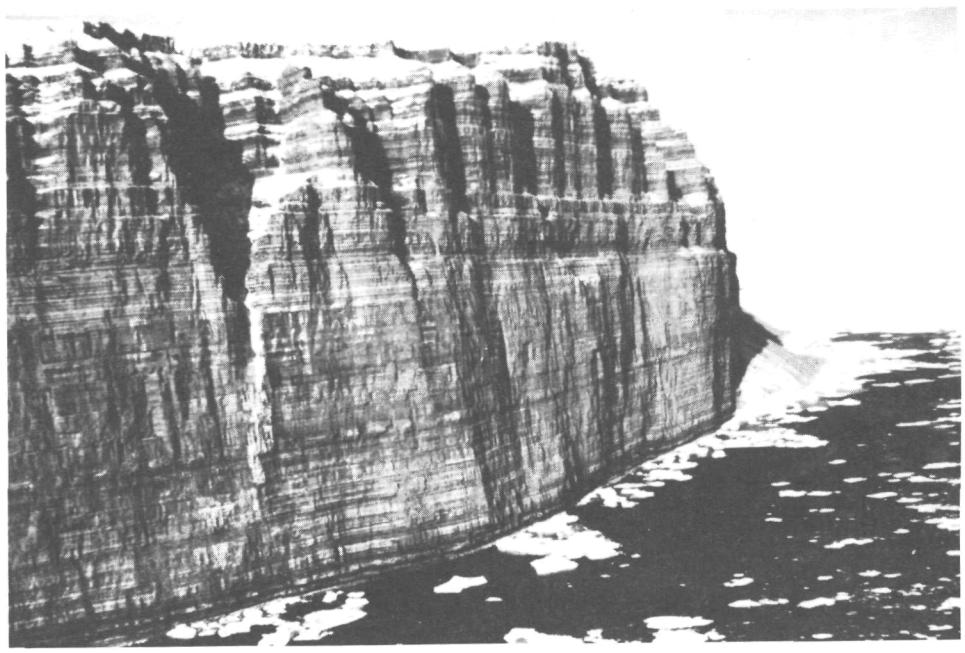


Figure 128 **Falaises quasi verticales** (300 m), **côte nord, île Prince Leopold** (septembre 1980)

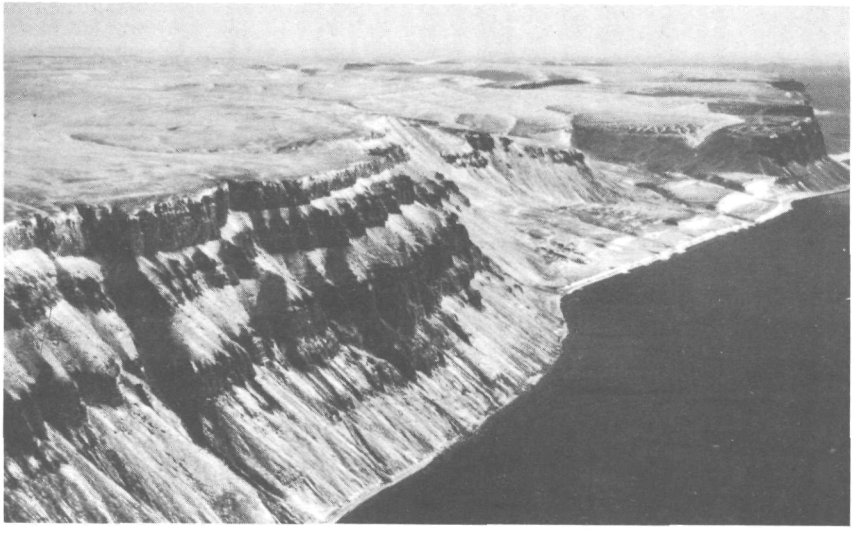
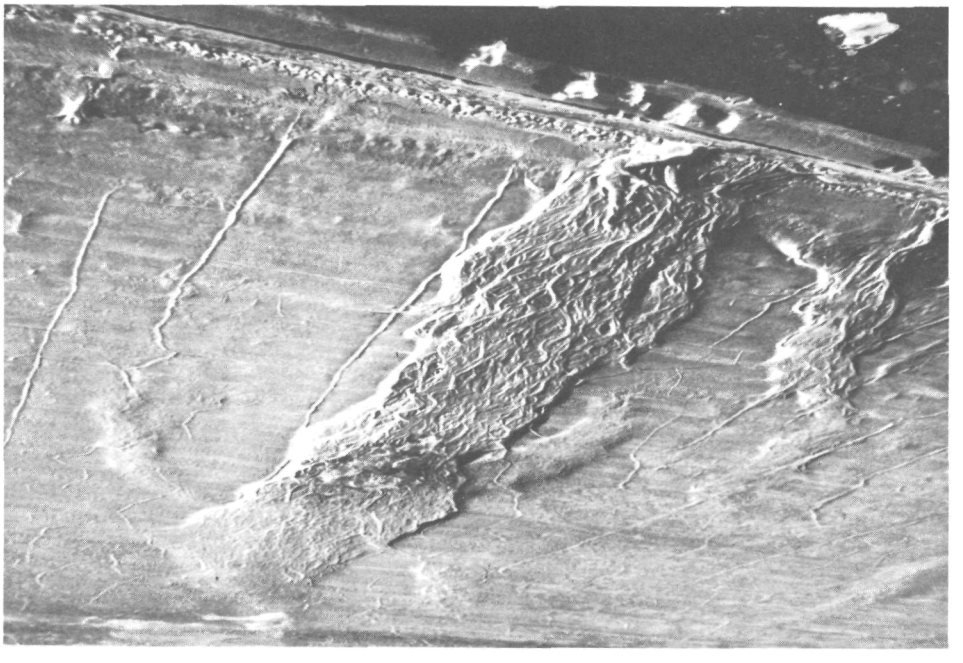


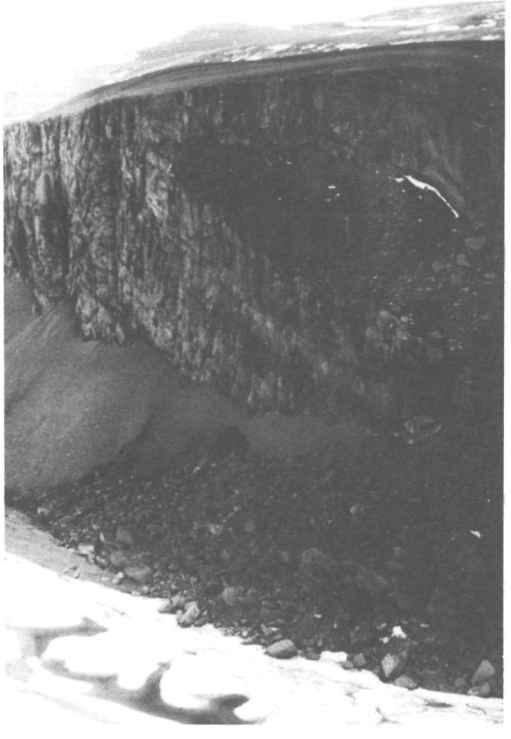
Figure 129 **Falaises et cônes d'éboulis, cap Hurd, sud de l'île Devon** (septembre 1980)



Floes échoués, poussée glaciaire sur la plage, ruisseaux anastomosés, gélivures et hautes-plages peu basses avec plages soulevées

Figure 130 **Plaine côtière, est du cap Admiral M'Clintock, nord-est de l'île Somerset** (septembre 1980)

Figure 131 **Delta arqué anastomosé et plages de front de delta formées par l'action des vagues, nord-ouest de l'île Somerset, ouest du cap Anne** (septembre 1980)

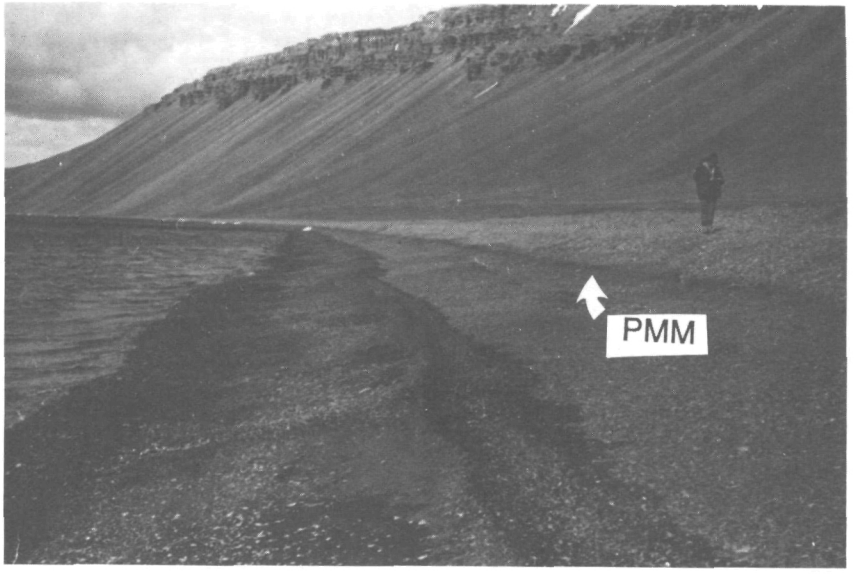


Au cours des mois d'hiver précédents, des pierres provenant de la face de la falaise (environ 200 m de hauteur) se sont déposées sur la plage et sur la glace riveraine. La pierre sur la glace sera transportée lors du morcellement de la glace. Notez qu'à l'est (gauche), la partie inférieure de la falaise est recouverte par une accumulation plus ancienne.

Figure 132 **Côte nord, île Griffith, détroit de Barrow** (juillet 1968)

baie Norwegian (figure 117). Lorsque le climat est moins rigoureux, les régions du sud peuvent être libres de glace à la mi-août et le demeurer jusqu'au début de septembre. Dans les secteurs nord, la mer est très rarement libre de glace et, s'il arrive que la glace se morcèle, la couverture de glace a une concentration rarement inférieure à 5/8. Entre 1946 et 1950, dans le détroit de Sverdrup, la glace n'a pas bougé durant ces cinq étés consécutifs (SHC, 1970). Étant donné la courte durée ou l'inexistence de la saison libre de glace et la présence de banquise côtière sur les plages, les secteurs nord de ce milieu correspondent aux faibles valeurs du spectre de l'hydrodynamisme. Dans les régions moins abritées, les vagues peuvent avoir un effet dans la zone littorale pendant 40 jours au maximum les années où la glace est moins épaisse.

Les côtes de ce milieu comportent des plaines littorales basses ou des falaises abruptes et des fjords. Les fjords sont particulièrement bien développés dans l'île d'Ellesmere et dans l'ouest et le sud-est de l'île Axel Heiberg. L'orientation des fjords est en grande partie contrôlée par la



Les marées semi-diurnes sont inégales et la flèche indique le niveau de pleine mer moyen, la ligne du milieu représente la limite du dernier jet de rive de la pleine mer.

Figure 133 **Plage de sable et de galets à marée basse, cap Ricketts, sud-ouest de l'île Devon** (août 1968)

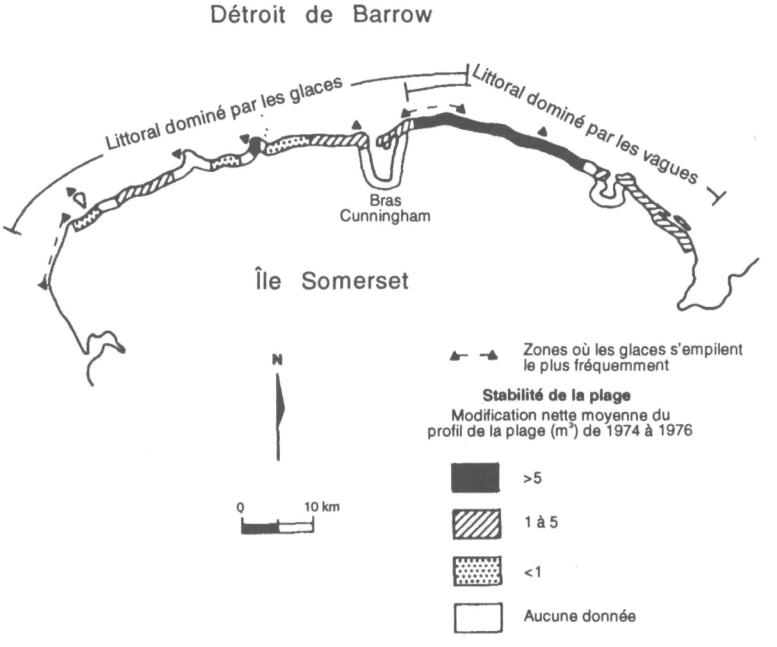


Figure 134 **Stabilité des plages et processus littoraux, nord de l'île Somerset** (tiré de Taylor, 1980b)

structure, cela est particulièrement apparent dans le sud-est de l'île Axel Heiberg. Vu la nature moins résistante de la roche en place, le relief y est plus bas et les fjords ont tendance à être plus longs que ceux des côtes du Bouclier (Taylor, 1973). Les parois des vallées du fjord Otto dans le nord-ouest de l'île d'Ellesmere s'élèvent à 900 m au-dessus du niveau de l'eau (Thorsteinsson, 1974), mais les élévations sont en général très inférieures. Les sections de falaises sont peu fréquentes et, à de nombreux endroits, forment un contraste avec les régions basses adjacentes, par exemple, la falaise Svartevaeg de 300 m de haut dans la partie nord de l'île Axel Heiberg. La côte est de cette île est généralement basse et comporte peu de fjords; il s'agit d'une section de plaines littorales basses à deltas, plages de galets et de cailloux et slikkes. Les côtes sud et ouest présentent toutefois des fjords et des falaises, dans un paysage de terres plus hautes (Dunbar et Greenaway, 1956).

4.4.7 Plateforme de glace de l'océan Arctique

Ce milieu côtier, assez peu étendu est unique aux régions polaires. À l'heure actuelle, il existe quatre plateformes de glace qui atteignent de 40 à 50 m d'épaisseur et présentent une surface ondulée caractéristique de crêtes parallèles et de creux (Jeffries, 1987). Le système de plateformes est soudé au rivage dans les fjords et baies abrités et il est presque continu sur la côte. La glace est recouverte de débris glaciaires à de nombreux endroits. Les plateformes actuelles sont un relief résiduel de la plateforme de glace Ellesmere plus étendue, qui a vêlé périodiquement depuis la fin du dix-neuvième siècle (Jeffries, 1987). En 1961, environ 600 km^2 ou 50 % de la plateforme de glace Ward Hunt se sont détachés (Hattersley-Smith, 1963). De tels événements ont été attribués à une coïncidence de phénomènes sismiques et tidaux (Jeffries, 1986). Dans ce milieu, la hauteur des marées est inférieure à 0,5 m et les processus littoraux normaux sont presque inexistants à cause de la présence quasi permanente de la banquise polaire sur la côte (figure 117). Les plateformes peuvent se développer et vêler et les fronts seraient instables tant à court terme qu'à long terme (Jeffries, 1986). Les îles de glace qui se détachent de ces plateformes peuvent avoir une taille variant de 70 à 140 km^2.

4.4.8 Plaine côtière de l'océan Arctique

Il s'agit d'une plaine basse (relief généralement inférieur à 150 m) dont l'avant-plage est peu profonde. Vers l'est, le relief s'accroît pour culminer à 300 m à certains endroits. Sur le plan géologique, il s'agit d'une région de roches sédimentaires non résistantes et de dépôts de sable et de gravier meubles (figure 118).

Les marées y sont inférieures à 1,0 m et les côtes du nord de l'île Banks ont une couverture de glace semi-permanente. Les années de faible accumulation de glace, il n'y a généralement pas de zone d'eau libre clairement définie et dans les chenaux et détroits, la couverture de glace a une concentration rarement inférieure à 5/8 (figure 117). Les côtes de l'ouest de l'île Banks se libèrent de glace durant les périodes de vents du sud-est en été et la banquise polaire peut s'éloigner parfois jusqu'à 80 km de la côte à mesure que la glace morcelée est transportée vers le sud-ouest. La saison d'eau libre, le cas échéant, se situe généralement en août ou en septembre (figure 117). Ailleurs, la côte demeure emprisonnée sous les glaces, la plupart des années, et les processus littoraux sont donc réduits au minimum. Les milieux côtiers dominés par la présence de glace comportent les côtes des îles Amund Ringnes, Ellef Ringnes, King Christian, Lougheed, Mackenzie King,

Borden, Polynia et de certaines sections du nord des îles Prince Patrick, Melville et Cameron (figure 135) (Taylor et McCann, 1983).

Les îles Ellef Ringnes et Amund Ringnes ont des côtes basses dominées par les processus fluviaux et présentent des lobes deltaïques qui s'étirent parfois jusqu'à 2 km vers la mer. Le nord de l'île Ellef Ringnes est très bas et comprend, dans la région du cap Isachsen, des slikkes et des terres humides étendues. Les îles Ellef Ringnes et King Christian comportent de vastes battures, slikkes et deltas dans le sud (figure 136) et les profondeurs de l'avant-plage varient considérablement, mais restent généralement faibles près des battures de sable et de vase; tandis que les eaux sont parfois profondes au pied de certains caps, notamment le cap Abernathy (Taylor, 1980c).

L'île Lougheed présente une côte de battures de sable et de vase et quelques deltas anastomosés; de nombreux secteurs sont dominés par des processus terrestres plutôt que marins, ce qui est caractéristique d'une grande partie de la côte de toute la région du bassin Sverdrup (figure 137) (Taylor et Forbes, 1987). Les crêtes de poussée échouées pouvant atteindre 20 m de hauteur sont fréquentes sur une large portion de la

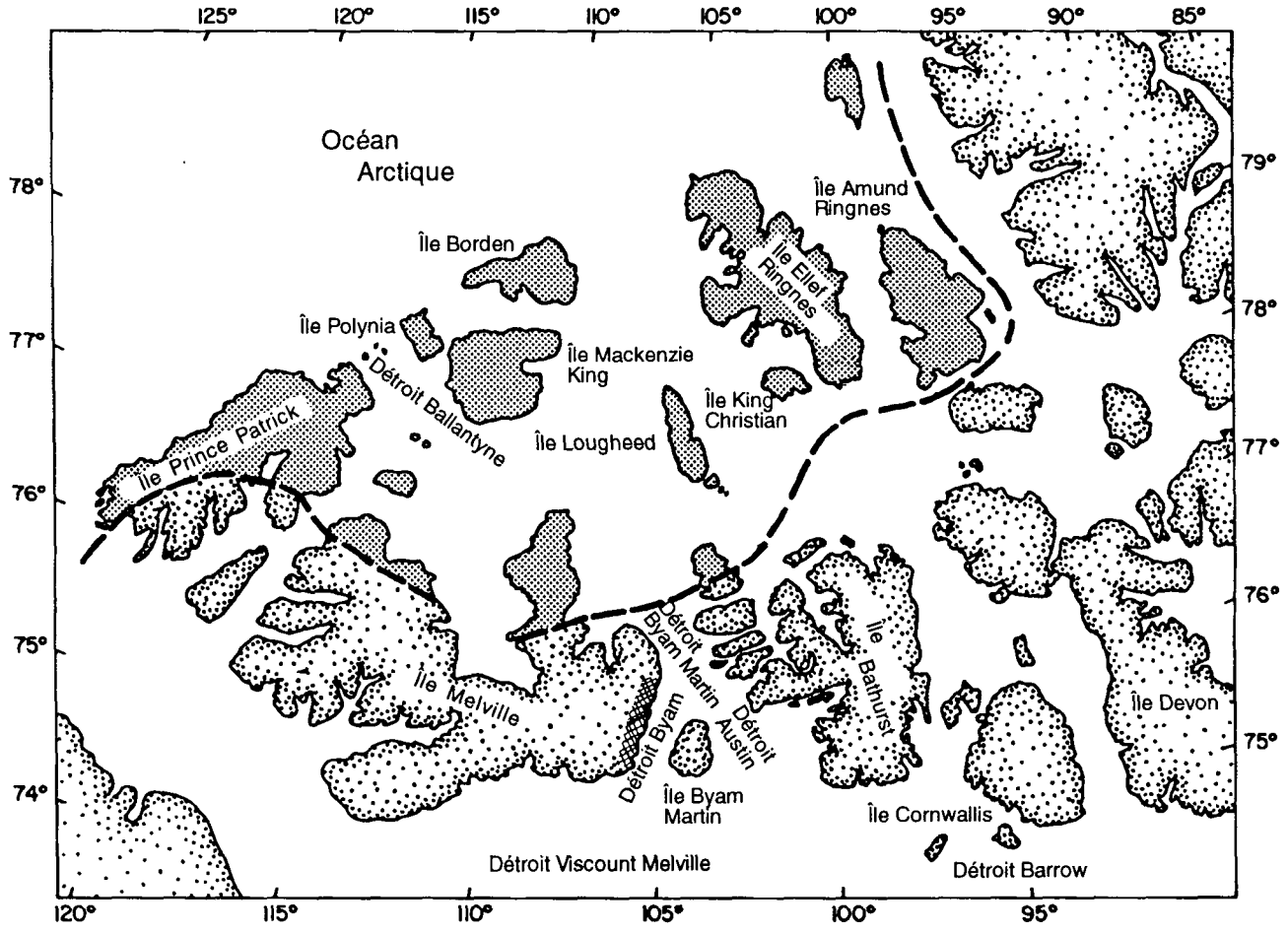


Figure 135 **Région de milieux côtiers dominés par la glace dans les îles du nord-ouest de l'Arctique** (zone ombragée) **et dans l'est de l'île Melville** (zone hachurée) (tiré de Taylor et McCann, 1983)

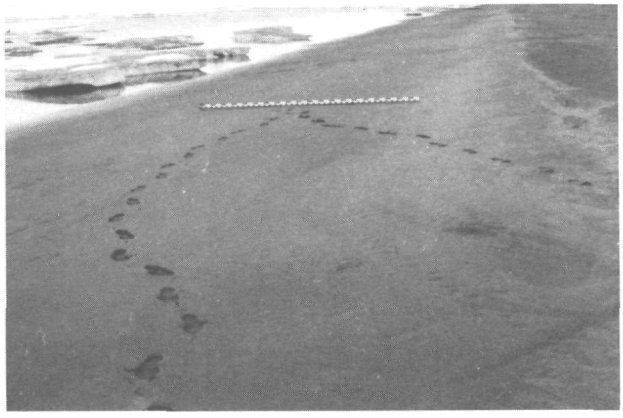


Figure 136 **Large plage sablonneuse, détroit Danish, sud-ouest de l'île Ellef Ringnes** (l'échelle limnimétrique mesure 1,8 m de longueur) (tiré de Taylor, 1980c)

côte et peuvent persister plusieurs années; dans les sections moins élevées, il arrive que les glaces s'empilent sur plus de 100 m vers les terres (Woodward-Clyde Consultants, 1980a). La position des crêtes de poussée est généralement liée à la bathymétrie de l'avant-plage. Les poussées de gel sont aussi un processus dominant sur les côtes nord et ouest des îles King Christian (figure 138) et Cameron (figure 139). Les îles Borden, Mackenzie King et Brock sont très basses dans leur portion occidentale; on y observe de larges hauts-fonds et slikkes, mais le relief s'accroît légèrement vers l'est. L'île Prince Patrick, présente un tracé semblable, avec des collines et des baies sur la côte est et des hauts-fonds parsemés de nombreuses îles sur la côte de l'océan Arctique.

La côte occidentale de l'île Banks présente des deltas et des terres humides (figure 140) ainsi que de nombreux cordons littoraux entourant des lagunes (Dunbar et Greenaway, 1956). Dans cette section de la côte, où il y a de l'eau libre la plupart des années, les sédiments ont été remaniés par les processus littoraux et des plages continues se sont formées (figures 141 et 142) (Stevens, 1976), notamment, celle du cap Kellet dans le coin sud-ouest de l'île Banks. Ailleurs dans ce milieu, les processus fluviaux ont tendance à dominer à cause de l'absence d'hydrodynamisme et de l'incapacité qu'ont les vagues à redistribuer les sédiments de la zone littorale.

Le milieu de la plaine côtière consiste essentiellement en basses plaines, deltas, cours d'eaux anastomosés et slikkes, des cordons littoraux s'étant formés dans les sections sud-ouest plus ouvertes. Il y a aussi des falaises (figure 143) qui fournissent une source locale de sédiments pour la formation de plages. L'action glacielle est importante dans la redistribution des sédiments. Des floes échoués peuvent former des crêtes de gravier sur les hauts-fonds, ou des crêtes de poussée glacielle atteignant 10 m de hauteur dans la zone du rivage, ou encore peuvent chevaucher une plage dans les régions basses

Figure 137 **Morphologie irrégulière d'une côte à modelé glaciaire, sud de l'île Lougheed** (juillet 1986) (la personne est encerclée, la flèche indique l'échelle limnimétrique de 1 m) (tiré de Taylor et Forbes, 1987)

et s'avancer parfois sur 1 km à l'intérieur des terres (Taylor, 1973, 1980c).

4.4.9 Îles du centre de l'Arctique (ou côtes à rias)

Ce milieu correspond à la portion sud-ouest de la chaîne Inutienne, plissée (figure 118). Contrairement aux sections les plus nordiques de cette région géologique, le relief y est faible (<700 m) et les roches sédimentaires assez peu résistantes ont été érodées pour produire une côte très irrégulière et échancrée sur de nombreuses sections de l'ouest des îles Bathurst et Melville. Cette érosion des affleurements résistants et non résistants par les processus fluvioglaciaires le long des axes de plissement généralement est-ouest, confère à ce milieu une topographie caractéristique de crêtes et de vallées, qu'on appelle souvent une côte à rias (figure 144).

La marnage varie de 1 à 2 m et les sections sud-est sont exposées aux vagues durant un à deux mois la plupart des années. D'après Taylor (1973), la baie Hooker, dans le sud-ouest de l'île Bathurst, est libre de glace en moyenne 25 jours par année, avec un intervalle compris entre 14 et 46 jours. Dans les sections plus au nord, la saison d'eau libre est beaucoup plus courte puisque la glace ne disparaît pas si rapidement dans ces zones plus abritées (figure 117). Dans les sections plus au sud, après le morcellement de la glace, les vents du nord-nord-ouest poussent la banquise vers le détroit de Lancaster.

Les principales caractéristiques de ces côtes sont liées à la présence d'affleurements de roches résistantes qui forment des péninsules et des îles au large et à celle de roches moins résistantes qui ont été érodées pour former de larges baies (figure 144). Ce système alterné de crêtes et de vallées, semblable au tracé d'une côte à rias, est orienté essentiellement est-ouest, parallèlement aux axes de plissement de la chaîne Inuitienne. Dans les sections où les plis sont moins prononcés, le trait de côte est plus régulier (Taylor, 1973); la côte est de l'île Bathurst suit une importante ligne de faille (Bird, 1967). Comme il s'agit essentiellement d'un

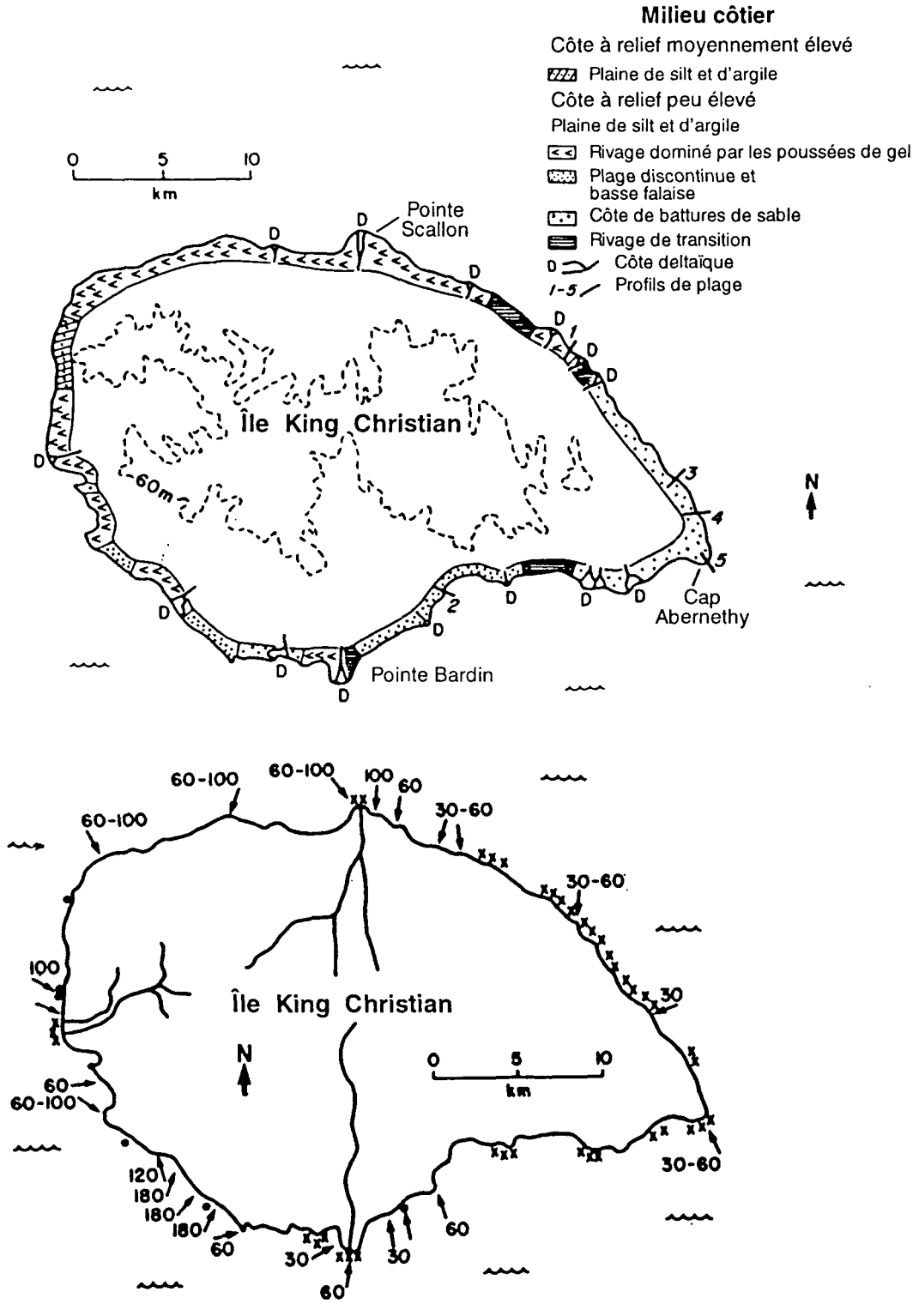


Figure 138 **Milieux côtiers de l'île King Christian et effet des processus glaciels sur les plages** (tiré de Taylor, 1980c)

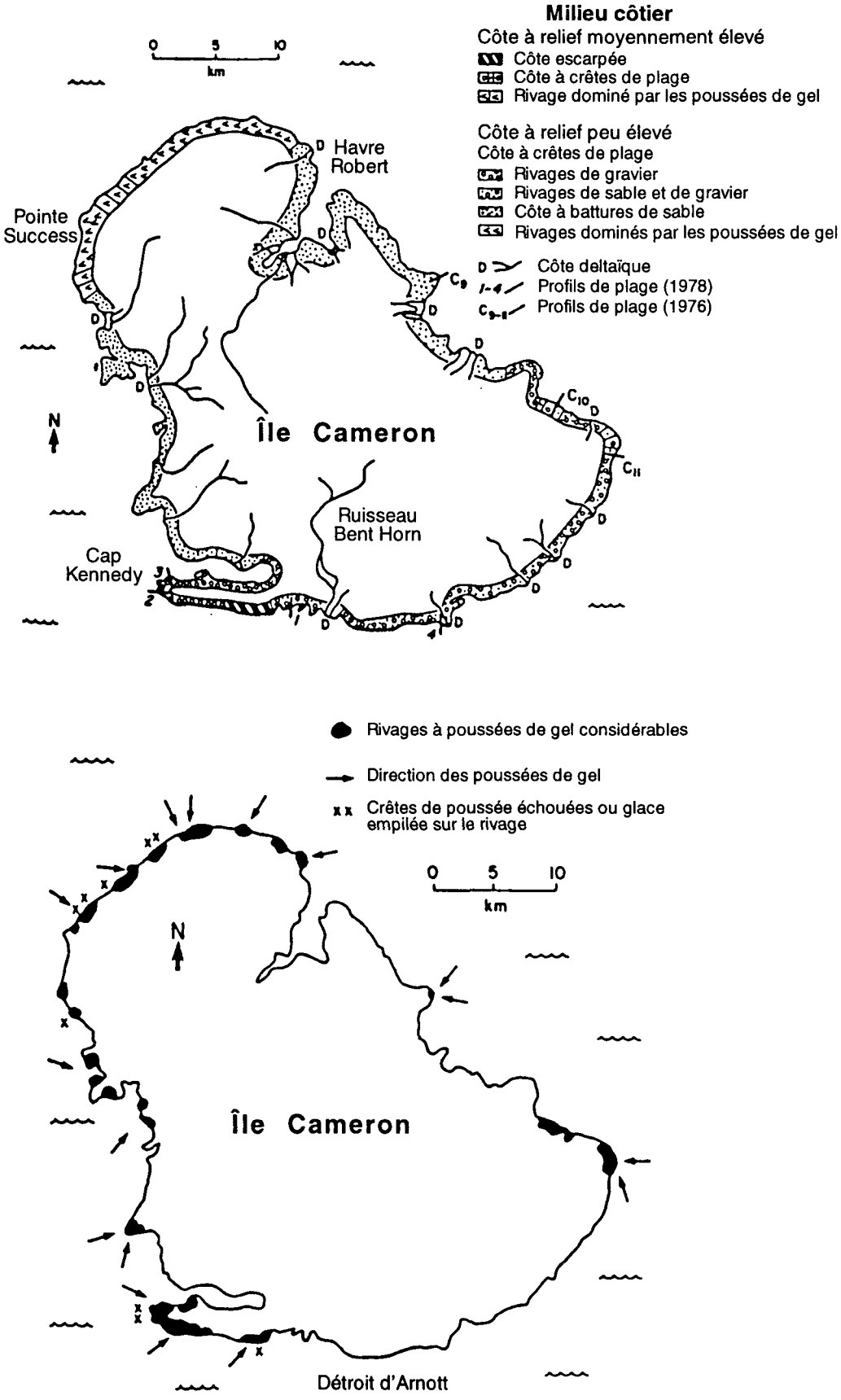
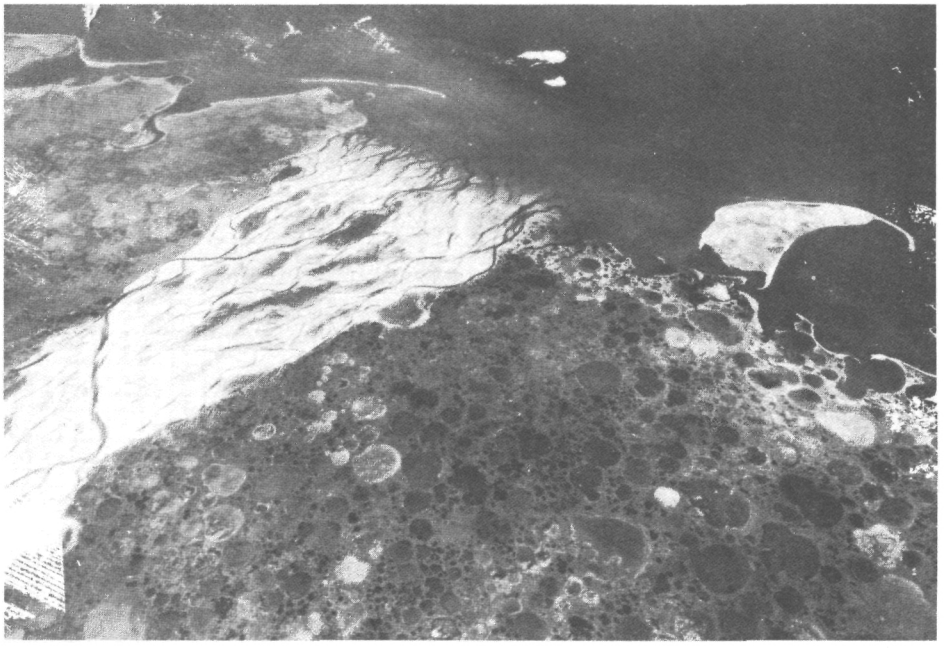


Figure 139 **Milieux côtiers de l'île Cameron et effet des processus glaciels sur les plages** (tiré de Taylor, 1980c)



Notez les nombreux lacs sur la haute-plage et les chenaux fluviaux anastomosés qui n'ont pas été modifiés par l'action des vagues sur le littoral. On remarque par ailleurs un certain remaniement des sédiments littoraux en raison de la présence de barrières et de flèches sur l'avant-plage.

Figure 140 **Côte du sud-ouest de l'île Banks à l'embouchure de la rivière Big** (en août) (tiré de Dunbar et Greenaway, 1956)

Figure 141 **Cordon littoral, lagune et promontoire au nord de la pointe Haswell, sud-ouest de l'île Banks** (septembre 1981)

Figure 142 **Flèche littorale recourbée** (vue vers l'est) **près de Sachs Harbour, sud de l'île Banks** (septembre 1981)

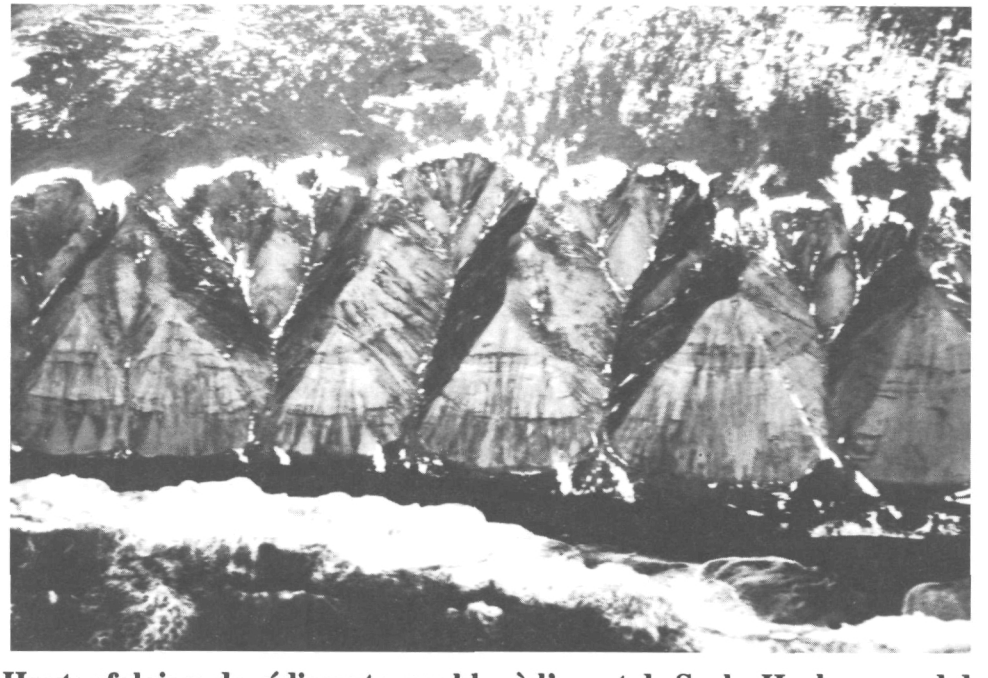


Figure 143 **Hautes falaises de sédiments meubles à l'ouest de Sachs Harbour, sud de l'île Banks** (septembre 1981)

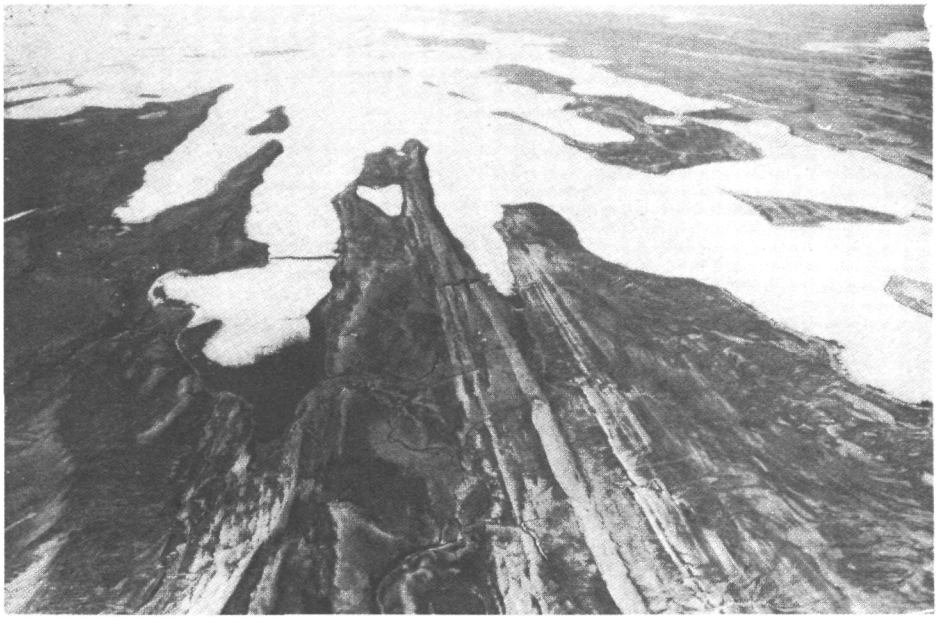


Figure 144 **Bras Bracebridge sur la côte ouest de l'île Bathurst** (début d'août - côte à rias typique) (tiré de Dunbar et Greenaway, 1956)

milieu de basses-terres, il y a peu de falaises, sauf dans le sud-ouest de l'île Melville, où des falaises abruptes atteignent 300 m de hauteur, et dans le nord-ouest de l'île Devon, où la côte ressemble à celle de la région du détroit de Lancaster (division 4.4.5). Ailleurs, la côte à rias, échancrée, présente de nombreux deltas ou plages de sable ou de sable et de galets, avec des plages soulevées sur la haute-plage et des hauts-fonds à l'avant-plage. D'après McLaren (1982) et Taylor (1978a), la côte est de l'île Melville est essentiellement constituée de deltas, de plages de sable et de slikkes (figure 145).

4.4.10 Partie sud de l'archipel - continent

Même si ce milieu présente une topographie variée, le relief est généralement faible (<500 m) et les couvertures de sable et de gravier meubles résultant du retrait de l'inlandsis sont fréquentes. La côte du continent correspond essentiellement à la marge du Bouclier canadien, sauf pour la région située à l'ouest du golfe Coronation. Les roches cristallines résistantes du Bouclier font saillie dans la partie sud de l'archipel à trois endroits : le centre-ouest de l'île Victoria, la péninsule de Boothia et la péninsule Melville (figure 118). Un autre affleurement sur la péninsule Foxe et sur certaines portions du nord de l'île Southampton sépare le bassin Foxe de la baie d'Hudson. Les autres sections comportent des roches moins résistantes, essentiellement des calcaires, qui ont été déposées dans des dépressions structurales sur l'ancienne surface du Bouclier. Le relief est généralement inférieur à 500 m, mais, par endroits, il est constitué de hautes-terres, avec des affleurements en saillie du Bouclier.

La géomorphologie côtière de cette région a été peu étudiée. Bien que de vastes levés côtiers de reconnaissance aient été effectués dans le passage du Nord-Ouest (notamment

Figure 145 **Côte basse à plages soulevées et large zone intertidale** [la couverture de neige comportant des réseaux de rigoles est située au-dessus de la pleine mer moyenne (PMM)] **près de la pointe Ross, sud-est de l'île Melville** (septembre 1980)

les régions des détroits de Prince of Wales, de Viscount Melville et de Barrow) (Woodward-Clyde Consultants, 1980c) et dans le golfe Amundsen (Woodward-Clyde Consultants, 1982b), la distribution des types de littoraux notés et décrits en détail lors de ces levés n'a pas été cartographiée. Une description des caractéristiques côtières et des cartes de la distribution générale des types de littoraux (échelle : 1/1 000 000), préparées avant l'étude de reconnaissance du golfe Amundsen, sont présentées dans Woodward-Clyde Consultants (1981d).

La configuration du littoral du golfe Amundsen et du sud du détroit de Prince of Wales procède en grande partie du réseau hydrographique prépléistocène, surcreusé par les glaciers durant la dernière période glaciaire. C'est un milieu de hautes-terres, de plateaux et de basses-terres ondulants, ne comportant que quelques sections disséquées. Par exemple, dans les régions de l'inlet Bathurst et du golfe Coronation, des roches plissées ont été érodées le long des directions structurales nord-sud et est-ouest, pour donner respectivement une série de bras, de péninsules et d'îles. Toute la région présente une couverture quasi continue, souvent épaisse, de sédiments meubles, déposés principalement par les inlandsis en recul ou correspondant à un ancien dépôt marin et côtier, aujourd'hui situé au-dessus de la limite des processus côtiers à cause du relèvement isostatique résultant du recul des glaciers pléistocènes.

Les marées sont inférieures à 1 m dans toutes les zones, sauf dans le bassin Foxe où le marnage moyen passe de 5 m dans le sud-est à moins de 0,6 m à Hall Beach au nord-est. Les courants sont généralement faibles partout, sauf dans les détroits de Fury et d'Hecla où les courants ouest-est peuvent atteindre 1 m/s. La côte est très abritée des vagues et la saison libre

de glace dure tout au plus deux mois. Le morcellement des glaces débute à la fin de juillet ou en août et la plupart des régions sont libres de glace en août, l'englacement débutant en octobre. Les conditions locales varient considérablement en fonction de la direction des vents. La glace peut rester emprisonnée le long des côtes dans de grandes baies ou de grands bras, par exemple, la baie Committee, et ne sera dispersée que lors d'une période de vents de terre, de telle sorte que certaines régions peuvent rester emprisonnées par les glaces certaines années (figure 117). Les poussées glacielles sont très fréquentes dans les détroits de M'Clure ainsi que de Viscount Melville et, à de nombreux endroits, la zone littorale est caractérisée par la présence d'un grand nombre de crêtes de poussée glacielle soudées qui forment un terrain de creux et de bosses (Woodward-Clyde Consultants, 1981d) (figures 11 et 151).

Une grande partie de la côte de cette région présente un tracé essentiellement influencé par les caractéristiques et la forme des affleurements de la roche en place. Dans les basses-terres, la zone littorale est surtout constituée de plages de sable ou de gravier adossées à des séries de plages soulevées; dans les régions de hautes-terres, il s'agit plutôt de roches ou de falaises raccordées à des plages basses parsemées de sable, de galets et de cailloux ou de blocs où affleure la roche en place. Les côtes du détroit de Prince of Wales, par exemple, composées de plages continues de sable ou de sable et de gravier, interrompues seulement par de petits deltas, sont relativement uniformes (Woodward-Clyde Consultants, 1981d). On note de hautes falaises dans certaines parties du sud de l'île Banks (650 m au cap Nelson; figure 146), dans le nord de l'île Banks (figure 147), dans le sud-ouest de l'île Victoria (figure 148), dans le golfe Coronation, dans le bras Bathurst, dans certaines portions du nord de l'île Victoria ainsi que dans le sud-est et l'ouest de la péninsule de Boothia et sur les côtes nord et est de l'île Prince of Wales. Le pied de ces falaises, généralement précédées d'une étroite plage de sédiments grossiers (p. ex., figure 147), est souvent enfoui sous des cônes d'éboulis. Les collines Smoking Hills (figure 149), qui résultent du brûlage des dépôts de charbon exposés sur la paroi de la falaise constituent une caractéristique inhabituelle du sud-ouest du golfe Amundsen. La côte ouest de la péninsule de Boothia comporte quelques fjords. Ces côtes à hautes falaises ne caractérisent toutefois que moins de 10 % du littoral de cette région. Les côtes basses présentent fréquemment une avant-plage très peu profonde, parsemée de récifs et d'îles (figure 150), notamment dans le golfe Reine-Maud. Dans le sud-est du bassin Foxe, la grande plaine de Koukdjuak comprend de larges slikkes jonchées de blocs dans une région où le marnage est de l'ordre de 5 m. On note dans cette vaste région plusieurs milieux de plages très contrastés dont le modelé résulte essentiellement de l'action de la glace (figure 151), des vagues (figure 152), du vent (figure 153) et des cours d'eau (figure 154). Les types de côtes vont des milieux littoraux élevés à falaises (figure 155) aux reliefs bas adossés à des séries de plages soulevées (figure 156) et à des basses-terres humides inondées ou à de la toundra (figure 157).

4.4.11 Péninsule de Tuktoyaktuk - baie Liverpool

Cette section de la plaine côtière de l'océan Arctique (figures 115 et 118) fait partie d'un ancien système deltaïque et constitue aujourd'hui une région fortement marquée par le recul du littoral. Les sédiments superficiels meubles forment un relief très bas et les hautes-plages sont ponctuées de nombreux lacs peu profonds.

Figure 146 **Côte élevée à falaises près du cap Nelson, sud-est de l'île Banks** (septembre 1980)

Figure 147 **Côte élevée à falaises et cônes d'éboulis** (la rivière encaissée a un delta lobé anastomosé), **cap Vesey Hamilton, nord-est de l'île Banks** (septembre 1981)

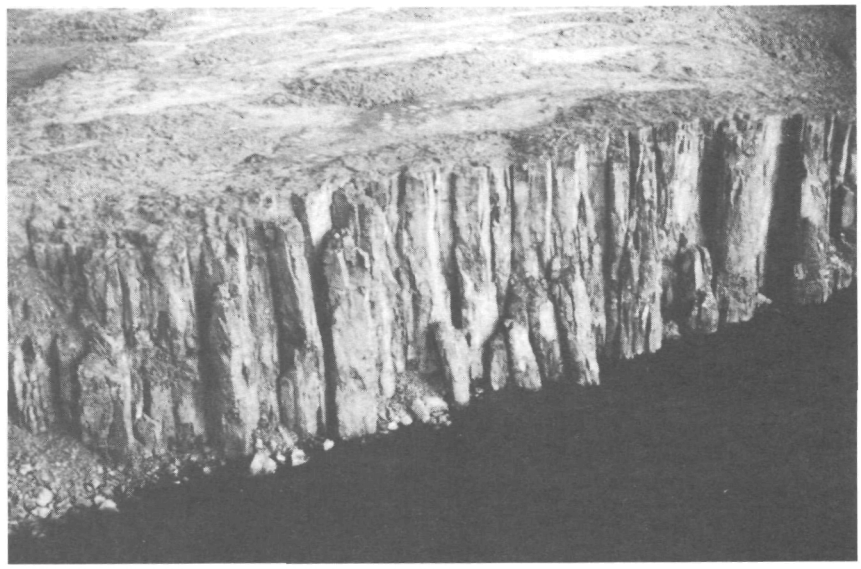


Figure 148 **Falaises verticales, îles Albert, détroit Prince Albert, sud-ouest de l'île Victoria** (septembre 1981)

Figure 149 **Brûlage de dépôts de charbon dans les collines Smoking Hills, est de la baie Franklin, sud du golfe Amundsen** (septembre 1981)

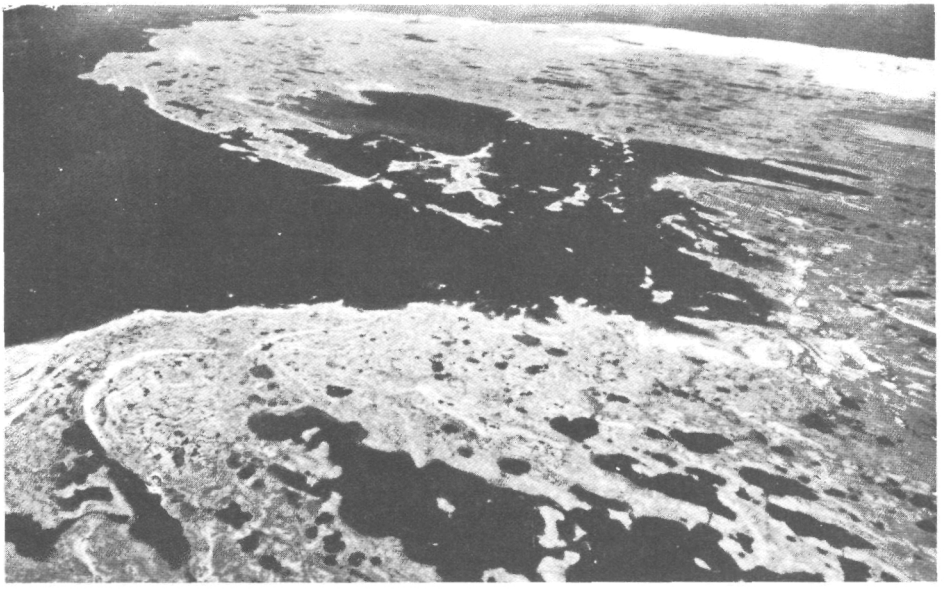


Figure 150 **Baie Shepherd, sud-est du golfe Reine-Maud** (début d'août - trait de côte complexe, irrégulier, où l'hydrodynamisme est très faible) (Dunbar et Greenaway, 1956)

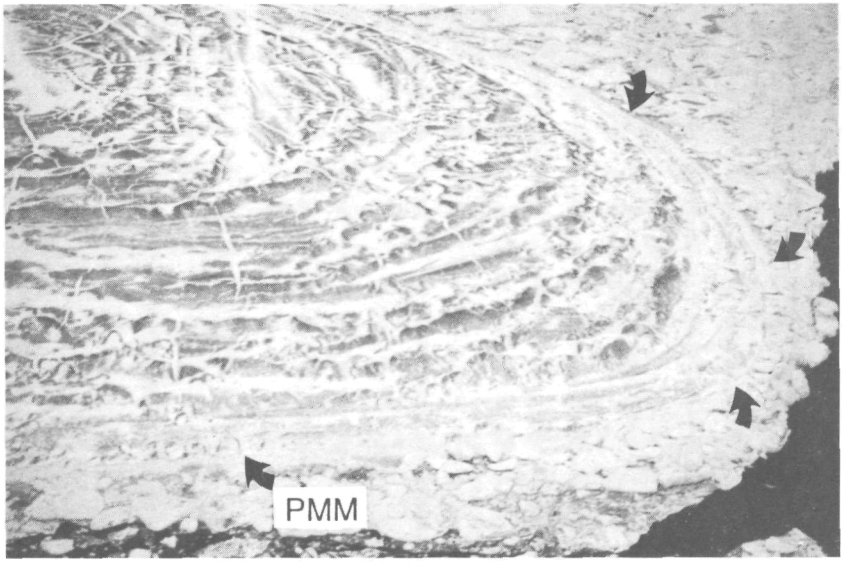


Figure 151 **Cicatrices de poussée glacielle sur les plages soulevées et sur la plage vive à l'ouest du cap Hardy, au nord de l'île Prince of Wales** (septembre 1980) (la présence de neige sur le rivage et l'avant-plage rend la délimitation de la zone intertidale difficile; la flèche indique le niveau de la PMM)

Figure 152 **Vagues moutonnantes sur un large cordon littoral, au nord du cap Caldwell, rive ouest du détroit de Prince of Wales** (septembre 1980)

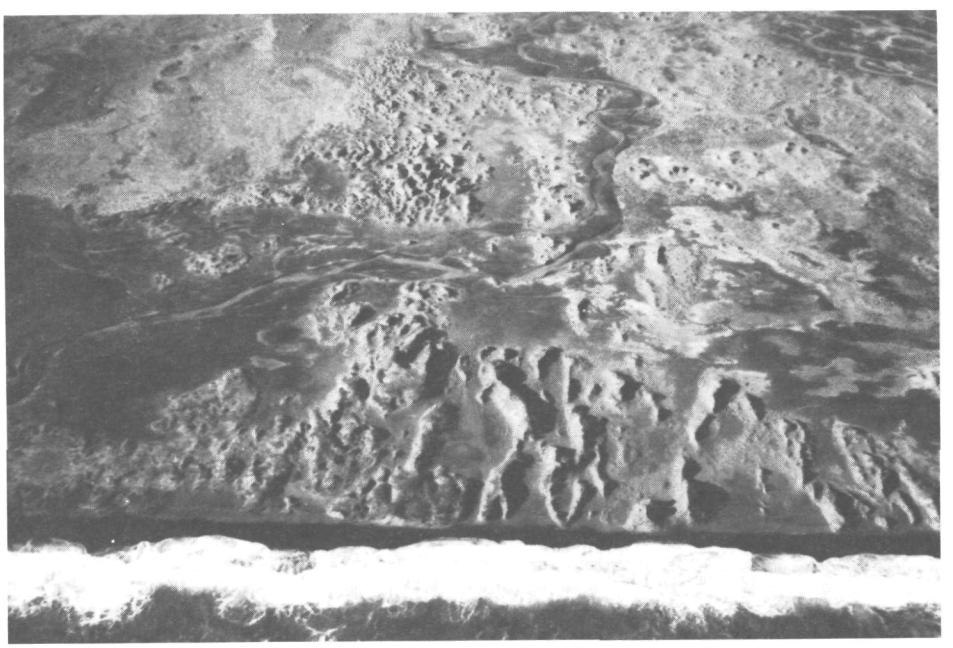


Figure 153 **Formations dunaires, sud-est de l'île Banks, ouest de la baie de Salis** (septembre 1980)

Figure 154 **Delta de la rivière Horton, est de la baie Franklin, sud du golfe Amundsen** (septembre 1980)

Figure 155 **Côte élevée au sud de la pointe Treadwell, sud-est de l'île Banks** (septembre 1980)

Figure 156 **Plage soulevée sur une côte basse, pointe Lady Franklin, golfe Coronation** (septembre 1981)

Figure 157 **Basse côte inondée, rivière Brock, sud-est de la baie Darnley, sud du golfe Amundsen** (septembre 1981)

La péninsule de Tuktoyaktuk consiste essentiellement en sables du Pléistocène recouverts de dépôts épars d'épaisseur variable de tills et de sédiments d'épandage fluvioglaciaire du Wisconsin (Rampton, sous presse). L'élévation postglaciaire relative du niveau de la mer a entraîné l'inondation de la région basse occupée aujourd'hui par la baie Liverpool et les lacs Eskimo.

Dans ce milieu, les marées sont inférieures à 1 m, quoique le niveau de l'eau dépasse parfois la laisse de haute mer normale de plus de 2 m sous l'effet d'ondes de tempête. Le milieu est abrité des vagues et les fetches d'eau libre varient de moins de 50 km à plus de 200 km, selon l'emplacement du pack polaire (figure 117). Les côtes de l'intérieur de la baie Liverpool constituent un milieu à mode extrêmement calme. La côte exposée est généralement libre de glace de juillet à la fin de septembre mais, les années où la glace est très abondante, elle peut n'être ouverte qu'en septembre.

Les littoraux exposés de la péninsule de Tuktoyaktuk présentent une structure complexe, comportant beaucoup de baies peu profondes et résultant de l'érosion de lacs de toundra basse (figure 158) (Woodward-Clyde Consultants, 1981d). Dans certaines régions, ces lacs troués sont entourés de flèches et de cordons littoraux sableux, qui sont généralement bas et fréquemment inondés durant les tempêtes. De basses falaises meubles (maximum 10 m de hauteur) composent près de la moitié de toute la côte (tableau 29); elles subissent un recul rapide malgré la courte saison d'eau libre l'été. Les taux de recul sont très variables; la moyenne est de 1 m/a dans l'ensemble (Harper *et al.*, 1985b), mais le recul peut atteindre 8 m/a dans certaines sections où la teneur en glace de sol est extrêmement élevée (Mackay, 1986). Près de la pointe Flagpole à Tuktoyaktuk, dont le recul moyen est de 3,8 m/a, on a signalé une érosion atteignant 14,6 m après une violente tempête en septembre 1970 (Rampton et Bouchard, 1975). À l'ouest de Tuktoyaktuk, les plages se composent de matériaux de la taille du sable et de galets. À l'est, ces plages sont essentiellement sablonneuses et adossées à des dépôts dunaires (Lewis et Forbes, 1974). Sur cette côte, le transport des sédiments s'effectue en général du sud-ouest vers le nord-est (figure 159), mais par endroits, il suit une direction ouest et sud-ouest. Dans la portion nord de la péninsule dont le littoral est extrêmement complexe, l'apport en sédiments littoraux est moindre et il y a moins de cordons qui se sont développés en travers des lacs troués, malgré le transport général de sédiments vers le nord-est. Cette section présente des slikkes exposées à marée basse et la plage sous-marine demeure quasiment émergée jusqu'à 15 km de la côte. Les slikkes sont fréquentes dans les baies ou les milieux de lagunes abritées (figure 160) et des accumulations importantes de grumes et de débris s'observent fréquemment dans les secteurs abrités à la laisse de pleine mer ou à la limite intérieure des ondes de tempête et du jet de rive (figure 161) (Woodward-Clyde Consultants, 1981d).

Les côtes de la baie Liverpool, situées dans un milieu plus abrité, sont essentiellement des falaises peu élevées (tableau 29), de 5 à 20 m de hauteur, précédées par d'étroites plages (figure 162), et présentant, pour le rivage oriental, des deltas, des estuaires et des baies (Logan *et al.*, 1975). Les falaises ont souvent une teneur élevée en glace sur les côtes sud et nord-ouest, mais faible du côté nord de la baie (Harper *et al.*, 1985b). Les plages sont relativement fréquentes à cause de l'apport abondant de matériaux de la taille du sable issu de l'érosion des falaises, malgré les taux relativement faibles de recul (1,0 m/a) (Woodward-Clyde

Figure 158 **Relief peu élevé et haute-plage à lacs de toundra, Whitefish Summit** (août 1980)

Tableau 29 **Types de littoraux de la mer de Beaufort** (adapté de Harper *et al.*, 1985b)

	Baie Liverpool	Pén. de Tuk. nord	Delta du Mackenzie	Côte du Yukon
Falaises à faible teneur en glace (%)	27	15	15	23
Falaises à haute teneur en glace (%)	45	<1	9	28
Falaises basses de toundra (%)	2	40	8	6
Toundra inondée (%)	4	16	6	3
Flèches littorales, îles (%)	18	28	13	29
Chenaux de terres humides complexes (%)	4	0	49	10
Longueur totale (km)	565	490	723	299
Pourcentage de la côte présentant des wadden peu élevés et de nombreuses barres	43	55	10	2
Taux moyen d'érosion (m/a)	1,0	0,8	2,5	0,6
Taux maximal d'érosion (m/a)	7,2	6,1	28,6	5,3

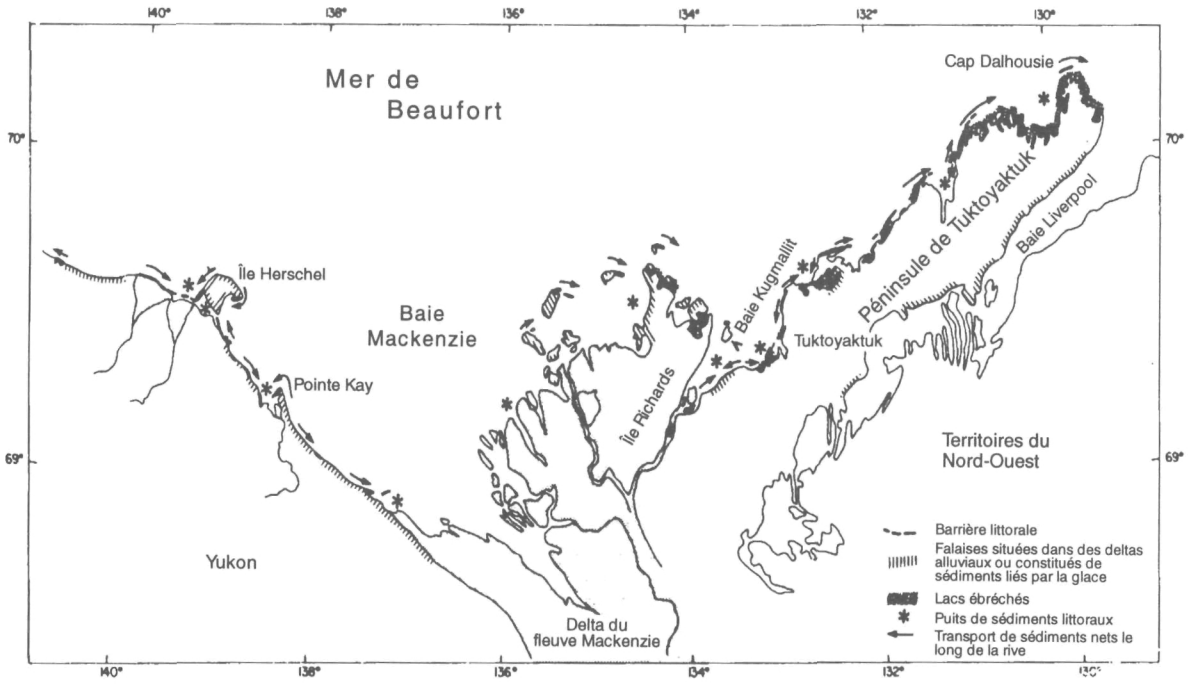


Figure 159 **Formes côtières et directions du transport des sédiments, sud de la mer de Beaufort** (tiré de Forbes et Frobel, 1985)

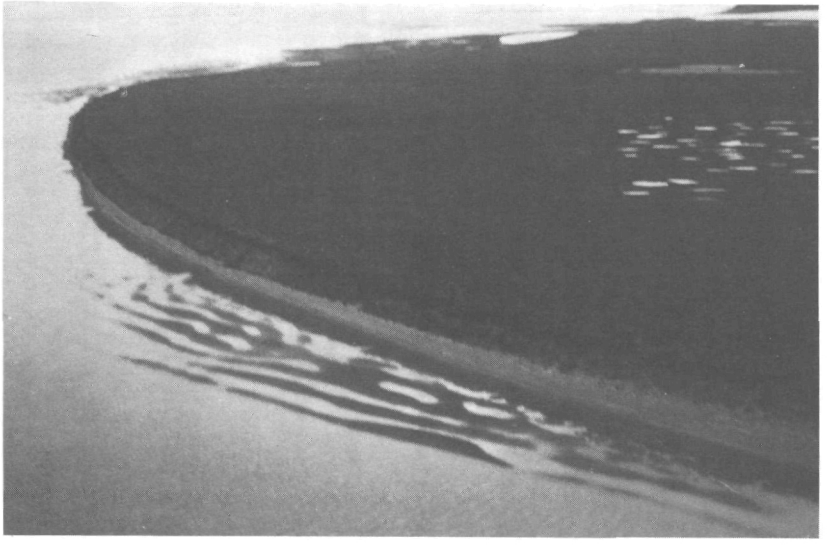


Figure 160 **Cordons littoraux de vase et de silt, rive sud de la baie Kittigazuit** (août 1980)

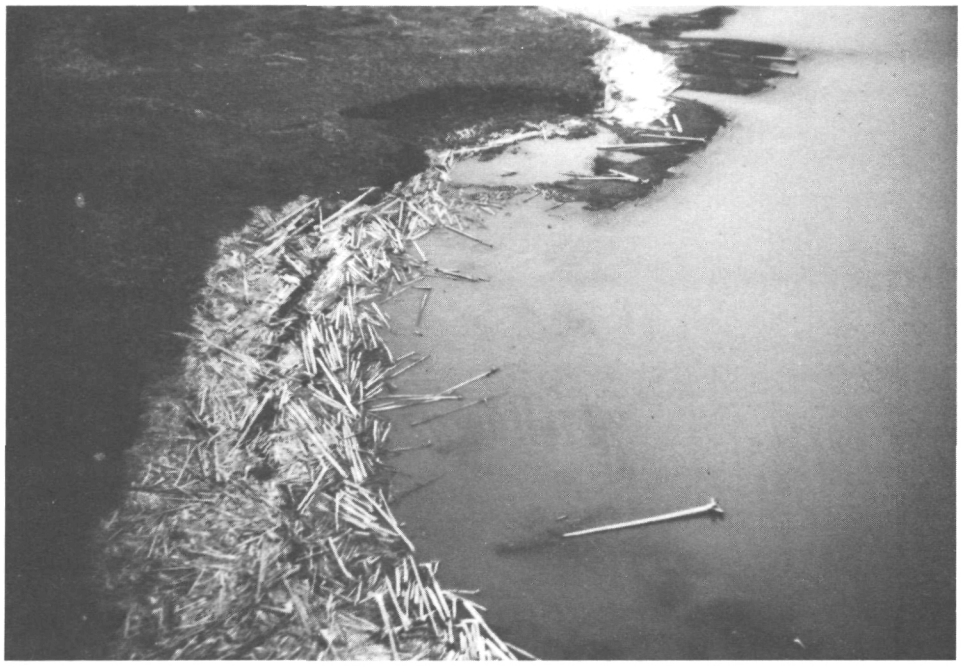


Figure 161 **Grumes échouées dans une baie abritée près de Tuktoyaktuk** (septembre 1979)

Figure 162 **Falaises sableuses peu élevées, rive nord de la baie Liverpool** (septembre 1981)

Consultants, 1981d). Dans le sud-ouest de la baie Liverpool, les lacs Eskimo constituent un milieu saumâtre à côte très complexe, où l'hydrodynamisme est faible et le relief de la haute-plage plus élevé. Les ondes de tempête peuvent atteindre 3 m dans le fond de la baie Liverpool. Dans le nord-est de la baie Liverpool, la côte se caractérise par des falaises de toundra à teneur en glace élevée et par les milieux estuariens-deltaïques de la rivière Anderson, de la rivière Mason et de la paléorivière Horton.

4.4.12 Delta du Mackenzie

Le Mackenzie est le deuxième réseau hydrographique d'Amérique du Nord et son delta est le plus gros du Canada avec une superficie d'environ 13 000 km^2 (figure 163) (Mackay, 1963). Avant de se jeter dans la mer de Beaufort, le fleuve se divise en plus de cinquante chenaux qui sont tous, à l'exception d'un seul (qui se déverse dans la baie Kugmallit, à l'est de l'île Richards) situés sur les marges ouest du delta entre la baie Shallow et l'île Richards. La période de ruissellement maximal coïncide avec le début de l'été, mais le fleuve coule toute l'année. Le niveau des eaux est extrêmement faible dans toutes les régions côtières du delta moderne et les principaux chenaux ont des levées naturelles qui atteignent par endroits 3 m. Même si les marées sont inférieures à 0,5 m sur la côte, le niveau de l'eau peut augmenter de 3 m sous l'effet d'ondes de tempête combinées au jet de rive auquel cas les vastes marais du delta inférieur sont recouverts par la mer. Il arrive que 50 % du delta inférieur soit inondé au moment du débit maximal du commencement de l'été (Mackay, 1963).

Le delta est caractérisé par un véritable labyrinthe de chenaux, d'îles et de lacs ainsi que de très vastes terres humides et battures

Figure 163 **Les chenaux occidentaux de l'embouchure du delta du Mackenzie** (à la mi-août) (tiré de Dunbar et Greenaway, 1956)

intertidales (Woodward-Clyde Consultants, 1981d; Hill *et al.*, 1986). Par suite des processus normaux d'érosion et d'accumulation fluviales, les chenaux changent fréquemment de parcours. Les levées des marges des chenaux dépassent rarement 3 m de hauteur et protègent en partie les sections plus basses des inondations. La région orientale du delta, plus ancienne, comprend l'île Richards; c'est une région de relief généralement faible mais, au large, les îles Garry et Hooper atteignent des altitudes de 40 m (figure 164) (Logan *et al.*, 1975). Sur les côtes exposées de cette section, il y a des falaises de sédiments meubles en recul et des plages sablonneuses précédées par de larges wadden; dans les régions abritées, on trouve souvent de vastes slikkes (dépassant 1 km de largeur) et une plage sous-marine peu profonde. La marge côtière du delta actif est en cours d'érosion à l'heure actuelle (Lewis, 1978); les vitesses d'érosion sont très élevées, de 6,1 m/a en moyenne; on enregistre des reculs atteignant 29 m/a par endroits (Harper *et al.*, 1985b).

4.4.13 Côte du Yukon

Ce milieu côtier est une région basse de sédiments meubles. Le relief y est généralement inférieur à 50 m et les falaises côtières, caractéristiques de cette région, reculent rapidement. Les marées sont inférieures à 1 m, mais on a signalé des ondes de tempête atteignant 3 m (Forbes, 1975). La côte est libre de glace durant 1 à 3 mois chaque année, selon notamment la direction du vent en juillet, août et septembre. La banquise polaire dérive rarement à plus de 200 km du littoral (figure 117), de telle sorte que les longueurs de course du vent sont limitées. L'englacement est généralement complet au début d'octobre.

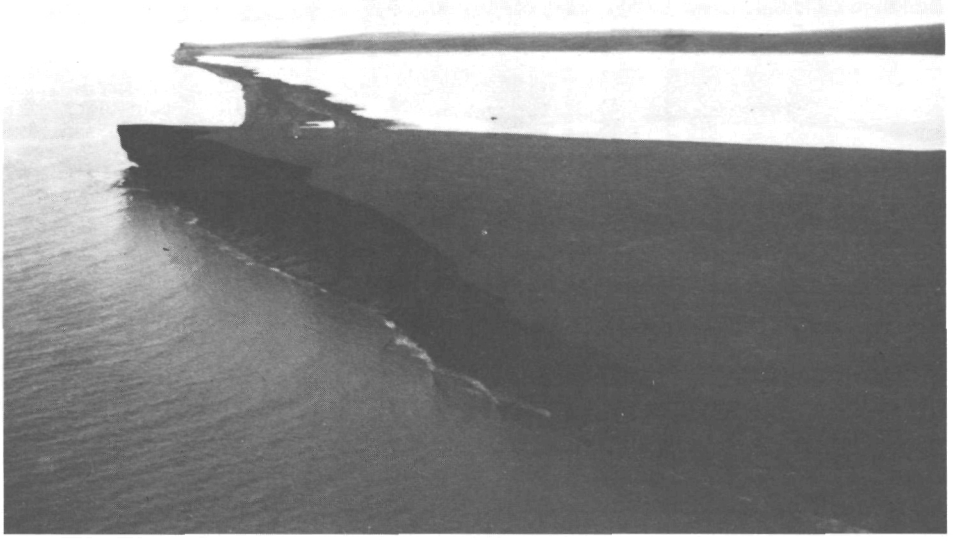


Figure 164 **Falaise élevée à haute teneur en glace et soumise à un recul rapide, nord de l'île Pelley** (septembre 1979)

Le littoral est surtout constitué de basses falaises à haute teneur en glace, aujourd'hui en recul (tableau 29), mais des deltas relativement importants se sont formés aux embouchures des rivières Malcolm, Firth, Babbage et Blow (figure 165), où des cours d'eau anastomosés déversent leur charge de sédiments durant la courte période estivale de débit fluviatile élevé. L'érosion des falaises et l'apport fluviatile fournissent de grandes quantités de sédiments à granulométrie fine aux zones côtières (Hill *et al.*, 1986) et le transport littoral de ces sédiments a donné naissance à de larges flèches littorales, la flèche Nunaluk, la flèche Avadlek (sur le sud-ouest de l'île Herschel), la pointe Kay et la pointe Shingle (figure 159) (MacDonald et Lewis, 1973; Short, 1979a; Hill *et al.*, 1986). À la pointe King, la croissance de la flèche littorale a fermé la baie entre 1954 et 1970. La direction dominante du transport de sédiments s'effectue vers le sud-est, mais des inversions locales se produisent près de la frontière avec les États-Unis et à la pointe Kay (MacDonald et Lewis, 1973). La croissance des flèches littorales est étroitement associée au transport de sédiments durant des périodes d'ondes de tempête (figure 166) (Lewis et Forbes, 1974). Les cordons littoraux sont généralement bas, leur crête dépassant rarement 2 m au-dessus de la laisse de pleine mer et le front de dégel atteint au maximum 1 m environ (MacDonald et Lewis, 1973). Une caractéristique très fréquente des régions basses, telles les lagunes ou les estuaires, est la présence de volumes considérables de débris de grumes (Woodward-Clyde Consultants, 1981d). En outre, la présence de laisses de débris ou de grumes, côté terre du littoral normal, constitue des indicateurs précieux de l'effet des ondes de tempête et des limites de l'action des vagues sur les sections basses de cette côte. On observe à l'occasion de telles

Figure 165 **Vaste réseau hydrographique anastomosé, baie Phillips, côte du Yukon** (août 1980)

Figure 166 Système de flèches littorales édifiées par un courant de dérive littorale intermittent, à l'ouest de la pointe Kay (août 1980)

laisses sur le sommet des basses falaises (<5,0 m), notamment entre la pointe Demarcation et l'île Herschel (Woodward-Clyde Consultants, 1981d). De même, du gravier a été déposé au sommet des falaises peu élevées situées à l'ouest de la rivière Malcolm (figure 167) (MacDonald et Lewis, 1973; Forbes et Frobel, 1986).

Sur l'île Herschel, et à l'ouest de celle-ci, la hauteur des falaises varie de 5 à 50 m (figure 168) et les vitesses de recul atteignent 2,5 m/a. Certaines falaises sont précédées de plages de 10 à 20 m de largeur à leur base. Au sud-est de l'île Herschel, les hauteurs de falaises varient généralement de 5 à 20 m, mais augmentent dans certaines régions à 100 m. Dans cette section, les taux de recul varient de 1,5 à 5 m/a (MacDonald et Lewis, 1973). Malgré le faible hydrodynamisme et les courtes saisons d'eau libre, les taux d'érosion sont rapides étant donné que les affleurements côtiers de sédiments meubles sont cimentés par le pergélisol et soumis à l'érosion tant marine que terrestre. La teneur en glace est souvent élevée (jusqu'à 90 %) et l'érosion peut se produire par fonte thermique des sédiments à haute teneur en glace exposés ce qui conduit à l'affaissement de la paroi de la falaise [glissements régressifs dus au dégel (figure 67)]. Les ruptures en bloc sont courantes là où des coins de glace sont présents et où les falaises sont sapées par fonte thermique [Harper, 1978; Owens et Harper, 1983 (figure 68)].

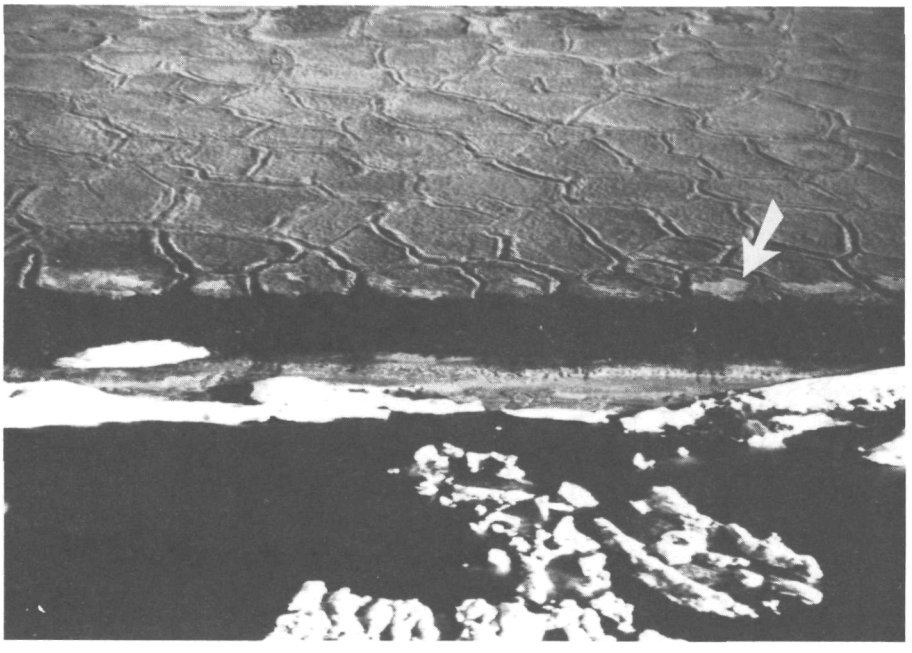


Figure 167 **Falaises à haute teneur en glace, en recul, présentant un sol structuré** (exposé sous forme de coins de glace dans la falaise)**, plaine côtière du Yukon, à l'est de la pointe Demarcation** (août 1980) (la flèche indique des dépôts de gravier projeté au sommet de la falaise)

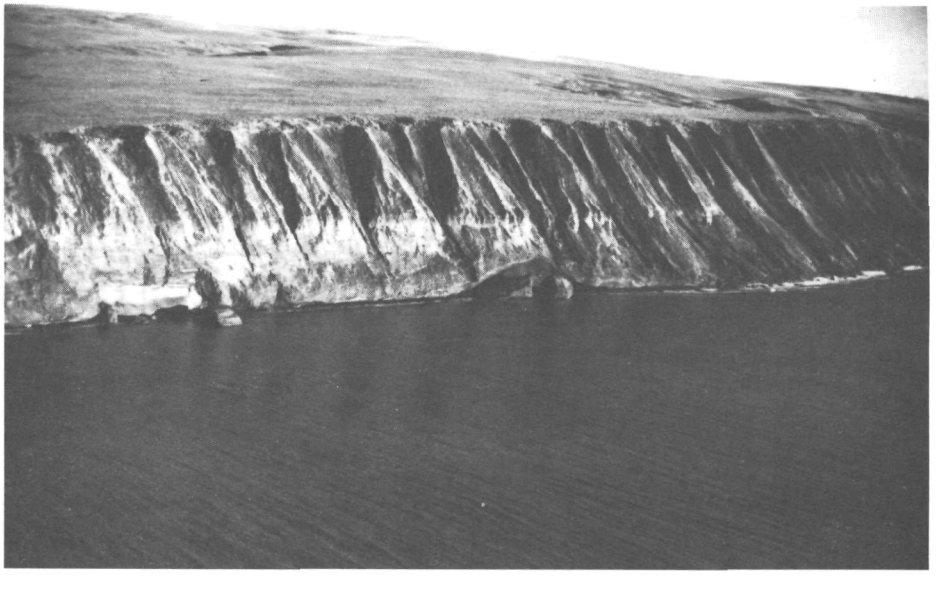


Figure 168 **Falaises de sédiments meubles, côte ouest de l'île Herschel** (août 1980)

4.5 *Milieux côtiers des provinces atlantiques*

Les côtes qui bordent l'Atlantique Nord-Ouest ont été divisées en sept milieux (figure 169, tableau 30). Les côtes extérieures exposées du Labrador, de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Écosse sont surtout rocheuses et contrastent avec les sections de littoraux d'accumulation dans les milieux plus abrités du golfe du Saint-Laurent et de la baie de Fundy. En hiver, la glace joue un rôle important de modification des processus côtiers dans tous ces milieux, sauf dans les régions les plus au sud.

Depuis 1977, on dispose d'une foule de données nouvelles sur la distribution des types de littoraux pour les côtes de Terre-Neuve et du Labrador; de même, on connaît beaucoup mieux les processus côtiers et les caractéristiques des variations du littoral pour le Nouveau-Brunswick, l'Île-du-Prince-Édouard et la Nouvelle-Écosse. Les principales sources d'informations régionales pour cette région sont les suivantes : Amos (1990); Amos et Long (1980); Boyd *et al.* (1987); Cameron *et al.* (1990); Dubois (1973, 1980); Forbes (1984); Forbes et Taylor (1987); Forbes *et al.* (1990); McLaren (1980); McCann (1979, 1985); McCann *et al.* (1977); Owens (1974, 1977b, 1979b); Owens et Bowen (1977); Owens *et al.* (1982); Owens et White (1982); Reinson (1980); Shaw et Forbes (1987, 1990a,b); Syvitski (1986); Taylor *et al.* (1985, 1990) et Woodward-Clyde Consultants (1980d, 1981a,b,e).

4.5.1 *Vue générale de la côte atlantique*

La côte atlantique du Canada est essentiellement un milieu rocheux, exposé, qui s'étend de la frontière des États-Unis jusqu'au cap Chidley dans le nord du Labrador (figure 91). Les côtes de cette unité totalisent 45 369 km (tableau 21), soit 17,9 % du trait de côte total et englobent la vaste mer bordière du golfe du Saint-Laurent (dont le littoral mesure 7 500 km) et la baie de Fundy, plus petite (1 400 km). Cette région, qui représente 18,6 % des océans du Canada, se caractérise par une large variation du marnage et de l'hydrodynamisme. Les caractéristiques communes de cette région sont les littoraux rocheux, la prédominance des vagues engendrées par les tempêtes et la rareté générale de sédiments littoraux.

Vents. Les vents dominants viennent du quadrant ouest. La bordure de la masse d'air continentale polaire traverse cette unité et les caractéristiques locales des vents sont dominées par le passage d'ouest en est de dépressions le long de ce front. Ces systèmes de basse pression sont plus fréquents et plus intenses en hiver, lorsque les gradients de pression le long du front polaire sont à leur maximum. Cette région côtière est occasionnellement touchée par des tempêtes extratropicales qui se forment dans le sud-ouest de l'Atlantique nord et virent vers le nord pour longer la côte de l'Amérique du Nord. Ces tempêtes se produisent le plus souvent entre août et octobre; entre 1871 et 1963, on a enregistré dans cette région 50 tempêtes dont seulement sept comportaient des vents de la force d'un ouragan (>120 km/h) (Cry, 1965).

Vagues. Cette côte des moyennes latitudes orientée à l'est subit l'influence de vagues qui se forment dans l'Atlantique nord-ouest. C'est un milieu d'ondes de tempête, où les périodes de vagues oscillent généralement entre 4 et 10 secondes, plutôt qu'un milieu de houles, caractéristique de la côte du Pacifique (Davies, 1972). Dans cette unité, on note une variation considérable dans les caractéristiques spatiales et temporelles de l'hydrodynamisme (figure 170). Par exemple, Neu (1971) signale qu'en pleine

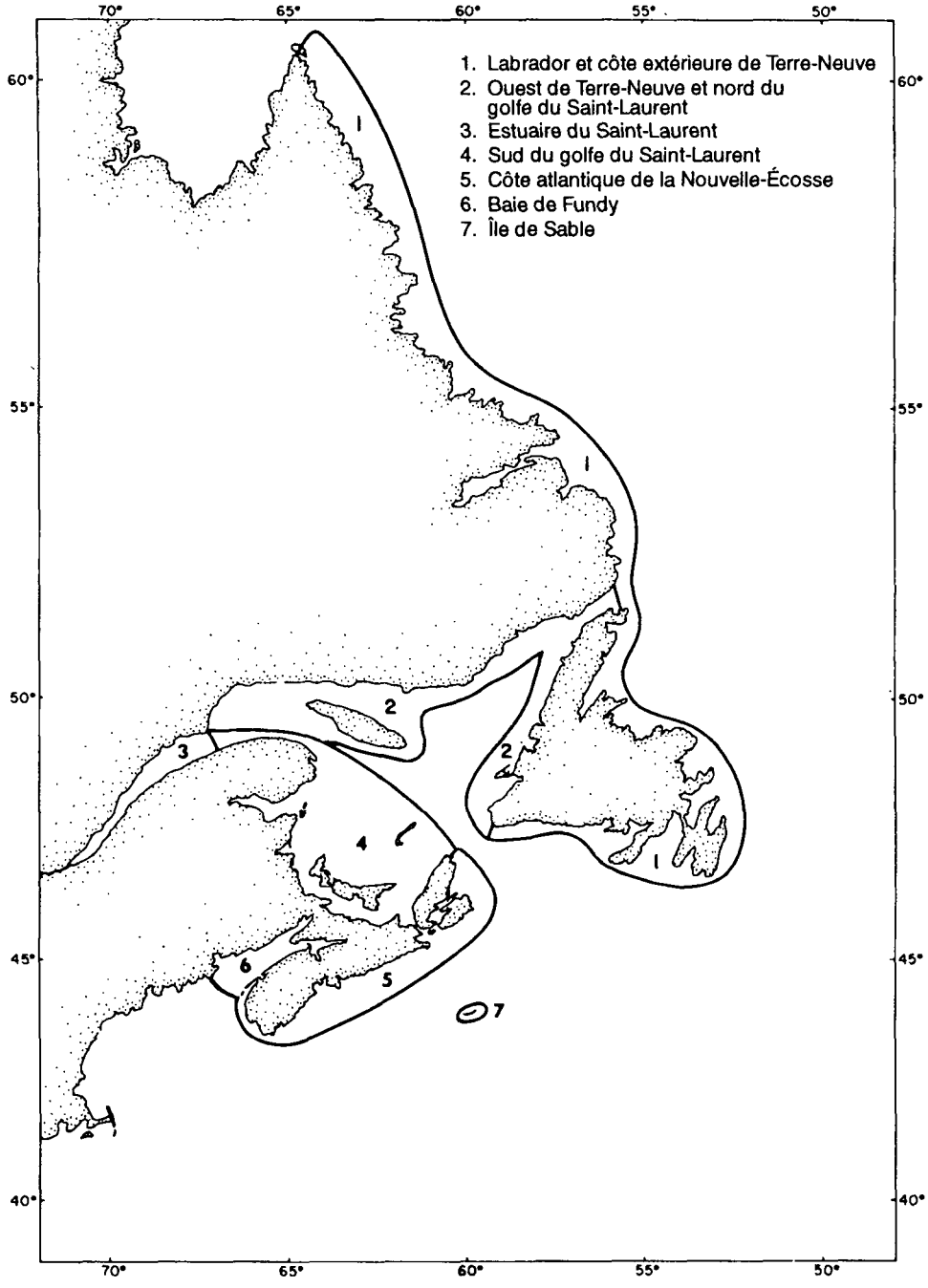


Figure 169 Milieux de la côte atlantique (*cf.* tableau 30)

Tableau 30 Caractéristiques des milieux de la côte atlantique

	Caractéristiques géologiques	Zone côtière		Fetch et exposition aux vagues	Marnage moyen (m)	Disponibilité des sédiments
		Haute-plage	Plage			
1. **Labrador et côte extérieure de Terre-Neuve**	Roches du Bouclier au Labrador; roches volcaniques et sédimentaires orientées sud-ouest-nord-est à Terre-Neuve.	Hautes-terres résistantes (200 à 1 500 m près de la côte); fjords.	Généralement absente; quelques étroites plages de galets et de cailloux dans les régions abritées.	Milieu d'ondes de tempête très exposé; baies abritées. Saison libre de glace de 6 à 10 mois.	1 à 8	Très rares.
2. **Ouest de Terre-Neuve et nord du golfe du Saint-Laurent**	Roches du Bouclier sur le continent; roches sédimentaires sur l'île d'Anticosti et le nord-ouest de Terre-Neuve.	Côte peu élevée de roches résistantes; relief généralement <200 m; fjords dans le centre-ouest de Terre-Neuve.	Généralement absente; plage de sable sur la rive nord-ouest du golfe.	Maximum 700 m, mer bordière, niveau d'énergie croissant du nord-ouest au sud-est; 4 à 5 mois de glace.	1 à 2	Très rares, sauf dans le nord-ouest.
3. **Estuaire du Saint-Laurent**	Roches métamorphiques et du Bouclier dans l'ouest; roches sédimentaires dans l'est.	Hautes-terres résistantes dans l'ouest (relief atteignant 1 000 m), basses-terres (<200 m) dans l'est.	Généralement absente, battures intertidales de sable et de vase précédant des marais dans le moyen estuaire.	Milieu estuarien abrité. L'estuaire est libre de glace de 7 à 8 mois.	3 à 5	Très rares dans l'estuaire maritime; relativement abondants dans le moyen estuaire.
4. **Sud du golfe du Saint-Laurent**	Surtout roches sédimentaires; roches métasédimentaires et ignées dans les secteurs est et ouest, recouvertes de minces dépôts de till.	Falaises non résistantes, peu élevées (3 à 10 m) et falaises atteignant 100 m dans les hautes-terres de roches résistantes.	Grande diversité, allant des îles-barrières aux barres intertidales multiples et plages étroites de sédiments de talus d'éboulis remaniés.	Généralement >300 km, mer bordière. La saison libre de glace varie de 7 à 8 mois.	1 à 2	Généralement abondants.
5. **Côte atlantique de la Nouvelle-Écosse**	Surtout affleurements métamorphiques et ignés recouverts de till ou de drumlins.	Zone littorale de roches résistantes, peu élevée ou falaises (maximum, 10 m).	Généralement absentes ou petites plages abritées; à l'occasion, plages-barrières.	Côte océanique très exposée. Glace présente seulement dans les baies abritées en hiver.	1 à 4	Rares ou très rares.
6. **Baie de Fundy**	Roches sédimentaires non résistantes ou roches ignées résistantes recouvertes de till ou de dépôts fluvioglaciaires.	Généralement, falaises rocheuses (5 à 200 m).	Galets et cailloux; larges battures de sable ou de vase dans la partie supérieure de la baie.	Généralement <50 km, abritée. La glace n'est présente que dans les secteurs abrités en hiver.	5 à 15	Abondants dans la partie supérieure de la baie; ailleurs, très rares.
7. **Île de Sable**	Sable meuble.	Dunes de sable.	Larges plages de sable.	Côte océanique, très exposée.	1	Abondants.

mer, les niveaux d'hydrodynamisme sont cinq fois plus élevés en hiver qu'en été (*cf.* figure 6). Toutefois, en hiver, les eaux au large de la Nouvelle-Écosse se trouvent dans une zone relativement abritée, parce que les vents viennent surtout du nord-ouest, de telle sorte que le niveau d'hydrodynamisme est de trois à quatre fois inférieur à celui de la houle qui frappe les Grands Bancs au large de Terre-Neuve. Les hauteurs maximales annuelles de vagues varient de 18 m sur les Grands Bancs, à 16 m au large du Labrador, à 12,5 m sur la plateforme Scotian et à 7,6 m dans le golfe du Saint-Laurent (Neu, 1972; Ploeg, 1971).

Dans les régions côtières plus abritées (le golfe du Saint-Laurent et la baie de Fundy),

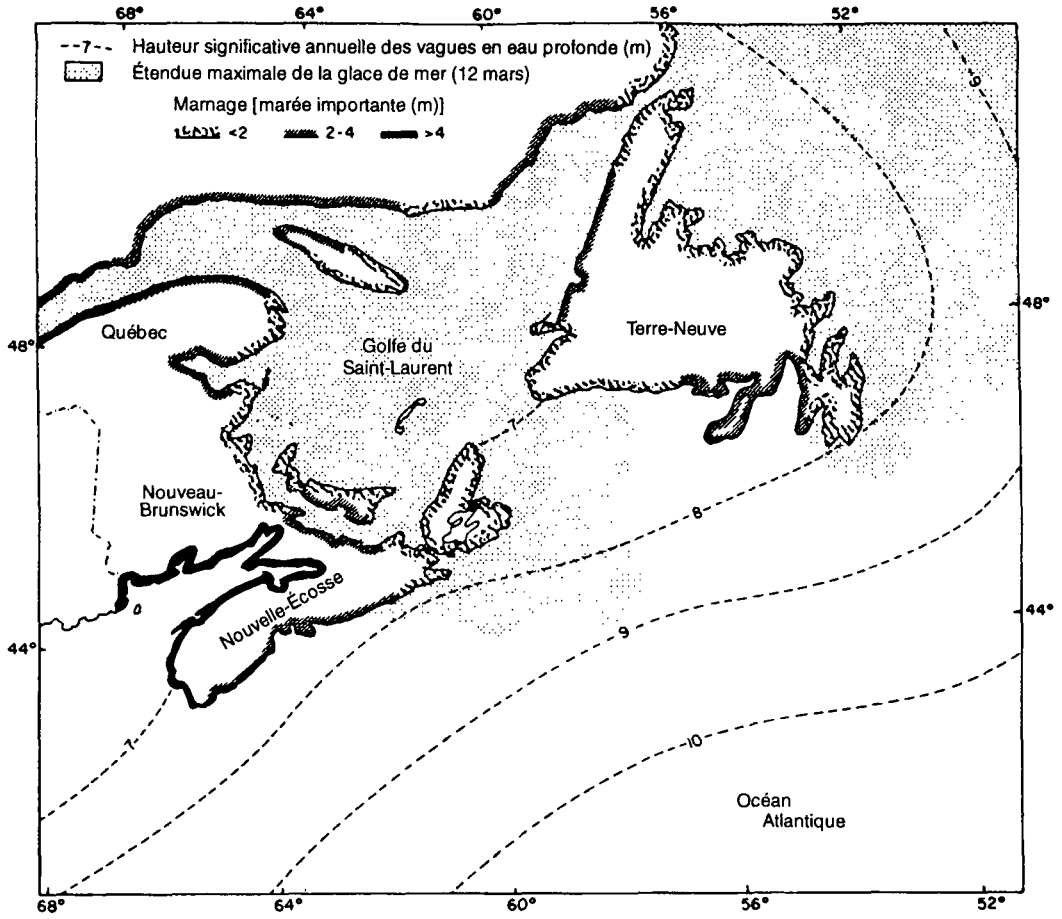


Figure 170 Caractéristiques des marées, des vagues et de la glace de mer dans l'Atlantique canadien (tiré de Forbes et Taylor, 1987)

les hauteurs significatives de vagues sont généralement inférieures à 2 m, le maximum se produisant en hiver. L'hydrodynamisme varie localement selon l'orientation du littoral et les longueurs de fetch. Dans les Îles-de-la-Madeleine, qui se trouvent dans la partie centrale du golfe du Saint-Laurent, les hauteurs d'ondes significatives sont 2,25 fois supérieures sur la côte ouest exposée en été et 2,95 fois en hiver, comparativement à la côte adjacente, orientée vers l'est, et abritée (Owens, 1977c). Par ailleurs, dans le bassin Minas de la baie de Fundy, la hauteur moyenne estivale des vagues est de 0,15 m et la moyenne hivernale, de 0,61 m, soit près de quatre fois plus (Amos et Long, 1980).

Glace. L'importance de la glace dans la zone côtière s'accroît généralement du sud au nord. Ainsi, les côtes sud-ouest de la Nouvelle-Écosse sont à peu près libres de glace, tandis que de la glace est présente sur les plages et les avant-plages jusqu'à quatre mois par année dans la baie de Fundy (Gordon et Desplanque, 1981) et le golfe du Saint-Laurent et jusqu'à sept mois dans le centre du Labrador (Allen, 1964). La présence de glace sur la mer empêche la formation de vagues et modère les vagues existantes, mais son effet principal est d'empêcher les vagues d'exercer leur action sur la zone littorale ou la côte.

Marées. Le marnage varie considérablement dans ce milieu (figure 170). Du cap Chidley dans le nord du Labrador à Battle Harbour sur la côte sud-est du Labrador, le marnage moyen

passe de 8,0 à 3,0 m (SHC, 1988). Les côtes extérieures de Terre-Neuve et de la Nouvelle-Écosse connaissent des marnages moyens de l'ordre de 1 à 2 m, tandis que dans le golfe du Saint-Laurent, le marnage est partout inférieur à 2 m. Dans l'estuaire du Saint-Laurent, l'amplitude moyenne s'accroît de 2,3 m à Sept-Îles à 4,1 m à Québec. La baie de Fundy est connue pour son marnage élevé, qui passe de 5 m à l'entrée de la baie à plus de 12 m au fond (baie Chignecto et bassin Minas). Dans tout ce milieu, les marées sont mixtes ou semi-diurnes, à l'exception d'un petit secteur du détroit de Northumberland dans le sud du golfe du Saint-Laurent, où les marées sont diurnes mixtes.

Géologie. La côte est du Labrador fait partie de la bordure de hautes-terres du Bouclier canadien. Le relief culmine à 1 500 m dans les régions du nord (les monts Torngat). Cette chaîne côtière de roches résistantes a été érodée par les glaciers du Pléistocène qui ont modelé un littoral à fjords. Les roches résistantes du Bouclier forment aussi la côte nord du golfe du Saint-Laurent, bien que dans cette région, le relief soit beaucoup moins élevé et la côte plus régulière.

Au sud du Labrador, les autres sections de cette unité correspondent au prolongement nord du système des Appalaches. Cette ancienne chaîne de roches plissées a un relief faible (généralement inférieur à 500 m avec un maximum de 800 m), est composée de roches résistantes et est caractérisée par des directions structurales sud-ouest-nord-est. Cette structure régionale est particulièrement visible dans la baie de Fundy, en Nouvelle-Écosse et à Terre-Neuve. La portion sud du golfe du Saint-Laurent correspond à un vaste bassin relativement plat, de relief inférieur à 200 m et composé de roches non résistantes sans plissement. Toute cette région a été recouverte de glaciers qui l'ont surtout érodée sans laisser beaucoup de sédiments, de telle sorte que les dépôts superficiels sont généralement épars et minces.

Géomorphologie côtière. La forme du littoral correspond en gros au contrôle structural exercé par les Appalaches au sud et la bordure de hautes-terres du Bouclier canadien au nord. Ce milieu est caractérisé par des côtes rocheuses le long desquelles s'accumulent à l'occasion des sédiments. La côte atlantique du Labrador est percée de fjords, avec de rares plages, et présente un tracé irrégulier et rocheux avec de nombreuses îles et de vastes inlets. Dans les secteurs nord, la côte est élevée et le littoral est escarpé et accidenté. La côte de Terre-Neuve, la côte atlantique de la Nouvelle-Écosse et la rive nord du golfe du Saint-Laurent sont irrégulières, basses et composées de roches résistantes qui expliquent la rareté des sédiments susceptibles d'être remaniés par les processus littoraux.

Un vaste système de cordons littoraux et d'îles-barrières s'est développé sur la côte est du Nouveau-Brunswick, la côte nord de l'Île-du-Prince-Édouard et près des Îles-de-la-Madeleine, dans le sud du golfe du Saint-Laurent (Owens, 1975). Dans ce secteur, des matériaux s'accumulent dans la zone littorale sous l'effet de l'érosion et du remaniement de grès non résistants et des dépôts glaciaires meubles, peu élevés. L'île de Sable est un ancien dépôt isolé de sédiments glaciaires remaniés, qui se trouve à environ 160 km au sud-est de la côte de la Nouvelle-Écosse, sur la marge extérieure du plateau continental. L'île, composée entièrement de sable, constitue la partie exposée d'un dépôt sédimentaire plus étendu de la bordure de la plateforme Scotian. Les seuls autres milieux de forte accumulation se trouvent dans des secteurs abrités des vagues

fortes et à marnage élevé. Il s'agit des vastes dépôts de sable et de vase des zones intertidales du bassin Minas et de la baie Cumberland, dans la baie de Fundy, et des secteurs de la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent. Ce type de littoraux totalise moins de 2 % (environ 900 km) du littoral de l'Atlantique canadien.

4.5.2 Labrador et côte extérieure de Terre-Neuve

Les roches résistantes de ces hautes-terres ayant été érodées par les glaciers, puis ennoyées, forment un littoral irrégulier et dénudé. À cet aspect accidenté s'ajoutent la présence de glace jusqu'à sept mois par année, un hydrodynamisme élevé en hiver et en automne et du brouillard en été.

Sur le plan géologique, cette région couvre deux unités distinctes. Tout d'abord, l'unité du Labrador représente la bordure orientale du Bouclier canadien, composée de roches résistantes, et culminant à 1 500 m dans les secteurs nord à une distance de 15 à 30 km de la côte, dans les monts Torngat. Cette section a été profondément affouillée par les glaciers pléistocènes pour produire une côte échancrée à fjords. Le relief diminue en direction du sud-est pour n'être plus que de 200 à 500 m près de la côte. L'érosion glaciaire des roches du Bouclier a produit de nombreuses vallées à fjords, quoique celles-ci soient moins fréquentes que dans la moitié nord du Labrador.

La deuxième unité géologique qui correspond aux côtes est et sud de Terre-Neuve est constituée d'une série de roches sédimentaires déformées et de roches volcaniques résistantes qui correspondent au prolongement nord des Appalaches et ont été plissées le long d'axes sud-ouest-nord-est (CGC, 1967). Dans cette section, l'élévation est généralement inférieure à 200 m. L'île a été recouverte d'une calotte glaciaire locale qui a élargi les vallées fluviales préglaciaires, orientées selon la structure. En raison de leur résistance, les roches du Labrador et de Terre-Neuve ont été peu érodées par les glaciers pléistocènes et les dépôts superficiels sont donc minces et très épars.

Le marnage moyen des marées semi-diurnes diminue d'un maximum de 8,0 m à Williams Harbour, dans l'extrême nord du Labrador, à 3,0 m à Battle Harbour sur la côte sud-est du Labrador (SHC, 1988). Dans les chenaux où l'écoulement est resserré, ce fort marnage produit de puissants courants de marée, qui atteindraient à certains endroits des vitesses de 3,6 m/s (SHC, 1974b,c). Près de la côte de Terre-Neuve, le marnage moyen varie de 1 à 2 m, mais on a signalé des ondes de tempête atteignant 1,3 m sur le littoral sud-est (Forbes, 1984).

Les vents dominants proviennent du quadrant ouest, avec une prédominance de vents du sud-ouest en été. Les coups de vent (>50 km/h) provenant de l'ouest-sud-ouest sont le plus fréquents entre octobre et avril, le nombre moyen de jours d'occurrence par mois atteignant un maximum de 15 en janvier et un minimum de 2 à 5 jours en juin et juillet (SHC, 1974b,c). Sur les côtes du Labrador, la topographie locale entraîne une canalisation des vents et une modification de leur direction. Les côtes extérieures exposées sont battues par des ondes de tempête et, en raison du caractère local de ce phénomène, l'hydrodynamisme est maximal en hiver (figure 171). On peut prévoir des hauteurs de vagues de plus de 3 m dans une proportion de 30 à 40 % du temps en automne et en hiver, contre 15 % au printemps et 10 % en été. Nombre de fjords et de baies de cette côte irrégulière constituent des milieux relativement abrités des vagues.

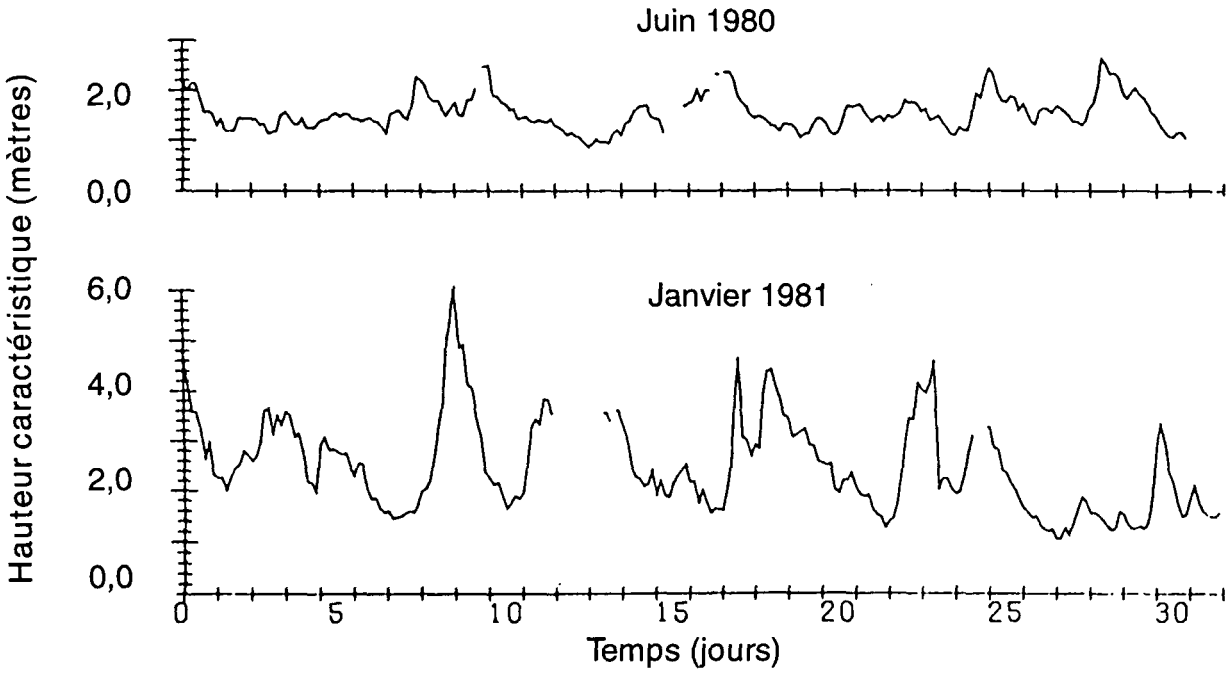


Figure 171 **Données mensuelles d'observation des hauteurs d'ondes significatives pour certains mois d'hiver et d'été, baie Logy, Terre-Neuve** (source : Service sur les données marines, Ottawa)

La glace joue un rôle déterminant dans l'atténuation des effets des vagues en hiver et au printemps. Sa formation débute dans les baies le long de la côte du Labrador au début de novembre; à la fin de décembre, les eaux côtières sont couvertes de 80 à 100 % (figure 172). Sur cette côte, la dislocation de la glace commence dans le sud en avril et progresse vers le nord; toutefois, les années de forte accumulation de glace, il est fréquent d'observer même en juillet une couverture de 50 %, et cette section ne sera alors libre de glace qu'à la fin d'août (figure 172).

Sur la côte est de Terre-Neuve, le front de glace progresse vers le sud-est en janvier et une couverture de 80 à 100 % persiste en février et mars. Cette côte est généralement libre de glace à la fin de mai. Dans les secteurs abrités, la banquise côtière peut se former dès la fin de novembre et persister jusqu'à la mi-mai (tableau 31).

La côte sud de Terre-Neuve est généralement libre de glace tout l'hiver (figure 172), mais il arrive souvent que de la glace se forme dans les baies et les bras abrités entre janvier et avril. On note une variation interannuelle considérable dans la distribution et les caractéristiques de la banquise.

La géomorphologie côtière du Labrador est caractérisée par des fjords, des côtes rocheuses et de rares plages. Le littoral, long d'environ 20 000 km, présente une configuration complexe de fjords surcreusés par les glaciers et de plus de 4 000 îles côtières. Dans le nord du Labrador, le relief est élevé et les montagnes côtières sont découpées par de profonds fjords. La moitié sud du Labrador se caractérise par une côte à fjords dont le relief est légèrement moins élevé; un plus grand nombre d'îles et de chenaux parsèment le littoral. Les plages, généralement de galets et de cailloux, s'observent surtout dans les milieux abrités.

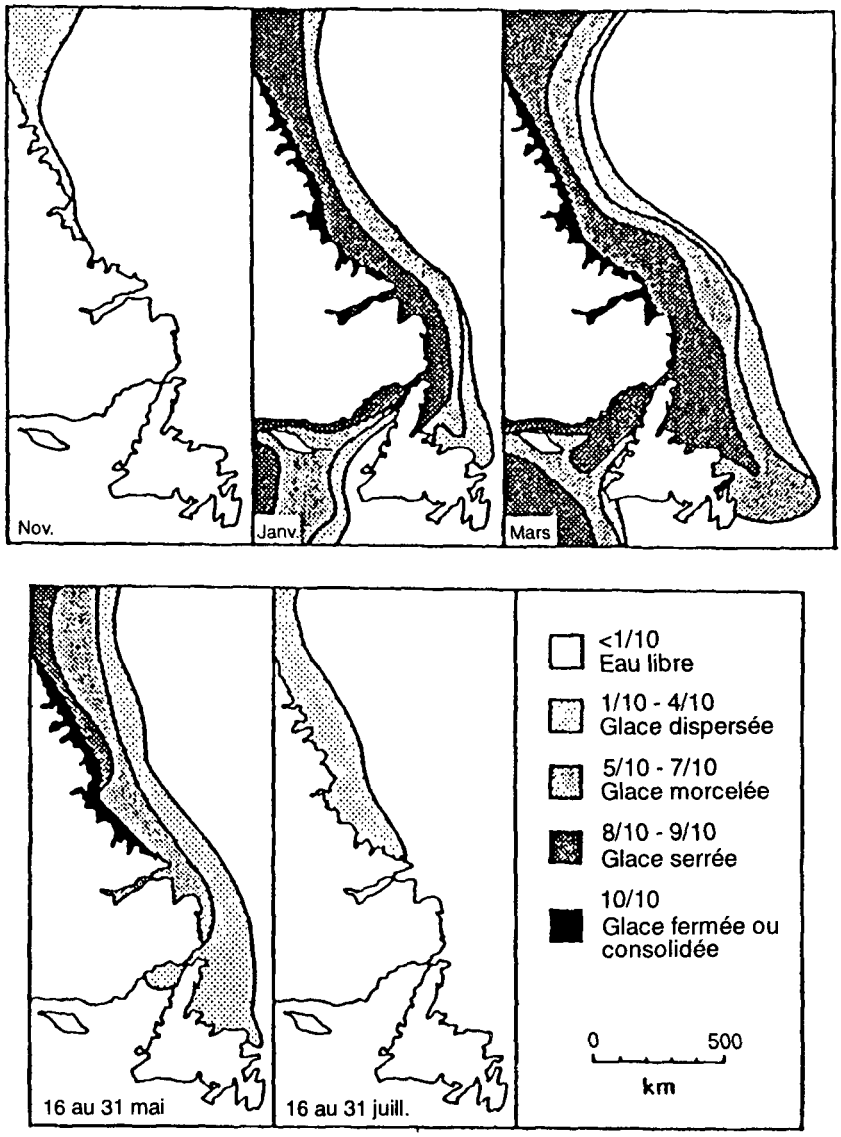


Figure 172 **Extension moyenne de la glace de mer au large : Labrador, Terre-Neuve et secteur nord-est du golfe du Saint-Laurent**

Tableau 31 **Banquise côtière à Botwood** (1939 à 1955) (Allen, 1977)

	Première occurrence	Moyenne	Dernière occurrence
A. Engel			
Formation de glace permanente	22 novembre	8 décembre	2 janvier
Engel complet	21 décembre	10 janvier	19 février
B. Déglacement			
Première détérioration	3 mars	7 avril	26 avril
Eau libre de glace	18 avril	6 mai	23 mai

Plus de 55 % de la côte du Labrador se compose de roche en place qui n'est pas recouverte de sédiments (tableau 32, figure 173) et 30 % présente des battures intertidales jonchées de blocs (figure 175), sur lesquelles se sont souvent formées des levées de blocs (figures 176 et 177) (Woodward-Clyde, 1980d). Ces levées s'observent aussi fréquemment le long des côtes basses abritées ou là où on retrouve des battures intertidales (Rosen, 1979, 1980). La levée extérieure peut dépasser de 3 m le wadden et forme un obstacle majeur aux vagues arrivantes et aux petites embarcations. La côte est constituée de roche en place, stable et résistante, et comporte peu de plages, sauf dans les basses-terres du lac Melville, où on observe une grande quantité de sédiments meubles dans la zone côtière et un faible hydrodynamisme (Reinson *et al.*, 1979). À cet endroit, les plages sont les plus développées, à cause de l'approvisionnement relativement abondant de matériaux issus de l'érosion côtière locale des sédiments meubles. Dans le lac Melville, qui est en fait un fjord et non pas un lac, un gros delta s'est formé à l'embouchure du fleuve Churchill (Syvitski, 1986). À de nombreux endroits, les sédiments de plage sont très grossiers (figure 178), mais là où un approvisionnement de sédiments suffisant existe, quelques petites plages de sable ou de sable et de gravier se sont formées (figure 174).

Tableau 32 Labrador : fréquence des principales caractéristiques du littoral (tiré de Woodward-Clyde Consultants, 1980d)

Nature du littoral	**Pourcentage**
Côtes de roches en place : pas de sédiments	56
Plages continues (y compris celles comportant des battures intertidales jonchées ou non de blocs)	11
Plages continues à battures intertidales bordées d'une levée de blocs	9
Petites plages abritées	8
Côtes à roches en place et battures intertidales jonchées ou non de blocs	6
Côtes à roches en place et battures intertidales bordées d'une levée de blocs	3
Plages à placage (y compris celles comportant des battures intertidales, jonchées ou non de blocs)	3
Petites plages abritées et battures intertidales bordées d'une levée de blocs	2
Fraction de blocs, %	34

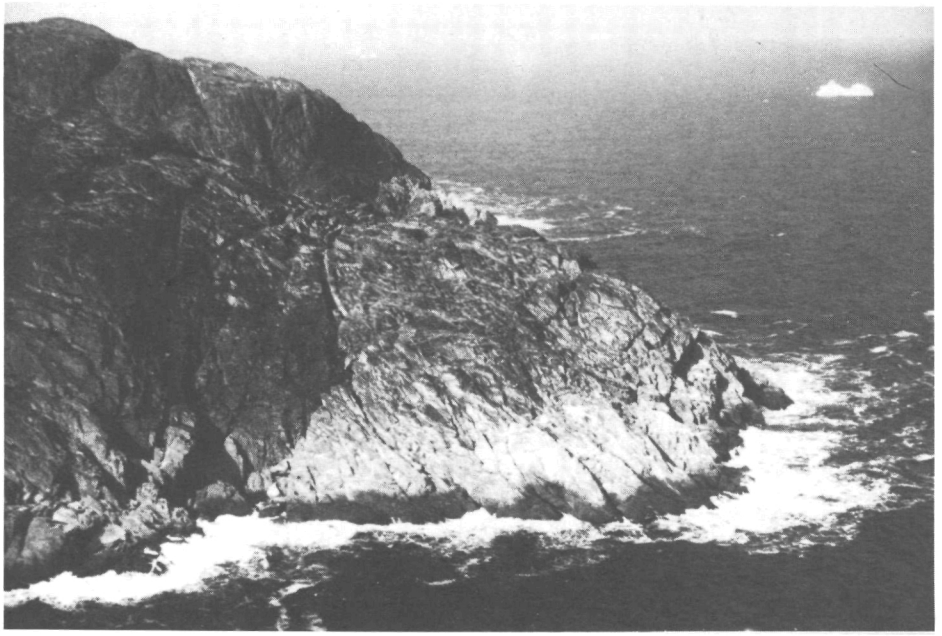


Figure 173 **Côte élevée, accidentée et résistante du cap Bluff, baie St. Michaels** (juin 1981)

Figure 174 **Large plage de sable dans la baie Trunmort près de Cartwright** (août 1980)

Figure 175 **Zone intertidale jonchée de blocs, près de la laisse de basse mer, partie nord-ouest de la baie Sandwich** (juin 1981)

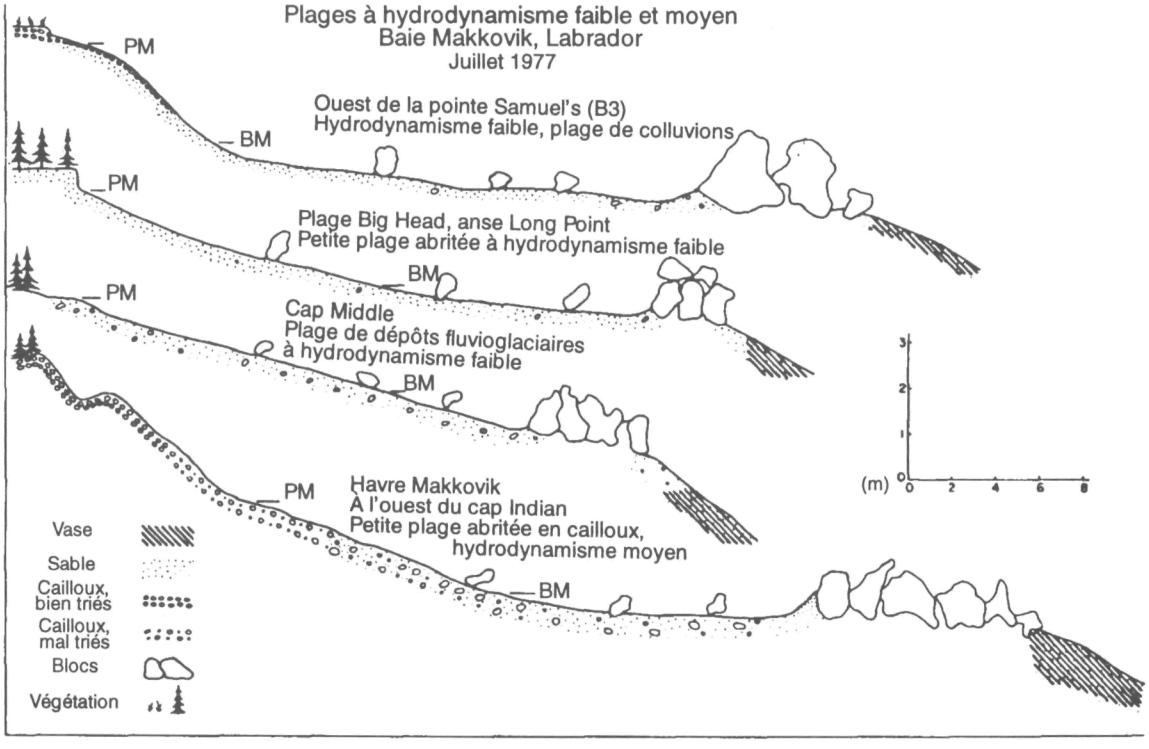


Figure 176 **Profils schématiques des plages présentant des levées de blocs, baie Makkovik, Labrador** (tiré de Rosen, 1980)

Figure 177 **Levée de blocs près de la laisse de basse mer, baie Sandwich** (juin 1981)

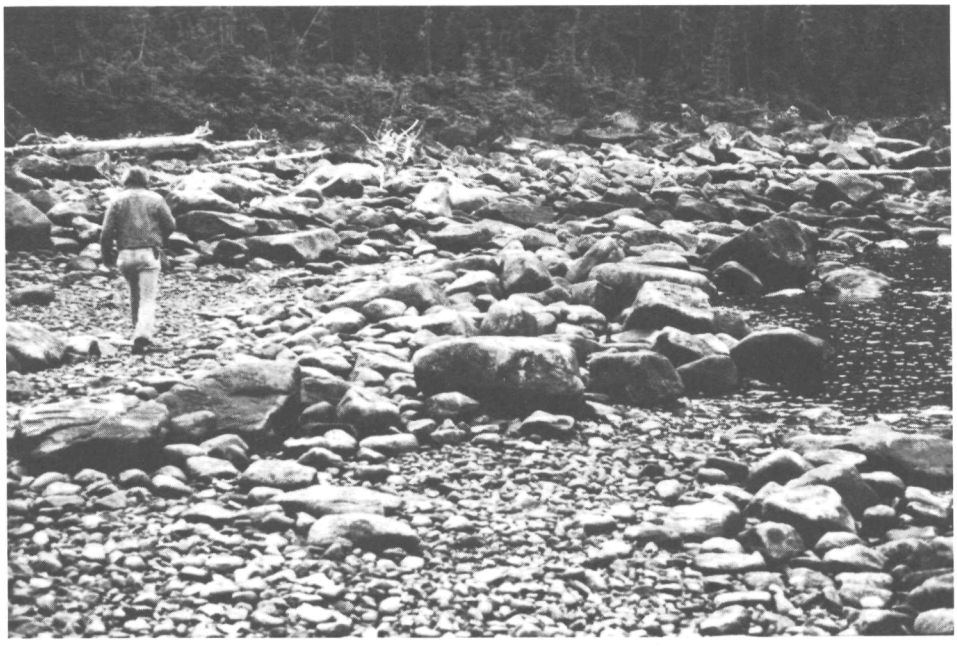


Figure 178 **Plage de sédiments grossiers près de Cartwright** (août 1981)

La côte orientale de Terre-Neuve a un relief plus bas et caractérisé par des fjords (Dolan *et al.*, 1972). Cette partie de Terre-Neuve a un littoral accidenté (figure 179) parsemé de nombreuses îles et baies (figure 180) et d'un très petit nombre de plages, à cause de la rareté de sédiments littoraux. C'est un milieu fortement battu par les vagues, surtout les ondes de tempête (figure 171), où le littoral est recouvert de glace 4 à 7 mois par année (figure 172, tableau 31). Un levé réalisé sur les 4 005 km de côte séparant le détroit de Belle-Isle du fond de la baie Trinity (Owens et White, 1982) a révélé la prédominance de la roche en place et de sédiments grossiers, les falaises et plateformes rocheuses constituant 60 % du littoral (tableau 33). Ce sont dans les baies White et Notre-Dame que l'on observe le plus souvent la présence de levées de blocs, associées à des battures intertidales. Les plages de sable et les marais ne se rencontrent que dans la région des baies Notre-Dame et Bonavista.

La côte sud-ouest de Terre-Neuve est moins exposée aux vagues que les côtes sud-est et est. Toute la côte sud est généralement libre de glace durant la majeure partie de l'hiver. Les plages ne se forment que là où existent des sources locales de sédiments (figure 181). Ces plages se composent généralement de gravier (sable, cailloux et galets) (figure 182) et, sur les côtes exposées, reculent vers les terres à cause de l'effet des ondes de tempête (Shaw et Forbes, 1987). Des sédiments se sont également accumulés dans le fond des baies et des fjords où les cours d'eau déversent leur charge. Les dunes sont rares à cause des quantités limitées de sable dans la zone littorale. Une levée de blocs dans la baie Freshwater et des agglomérations de blocs à Come-By-Chance (Forbes, 1984)

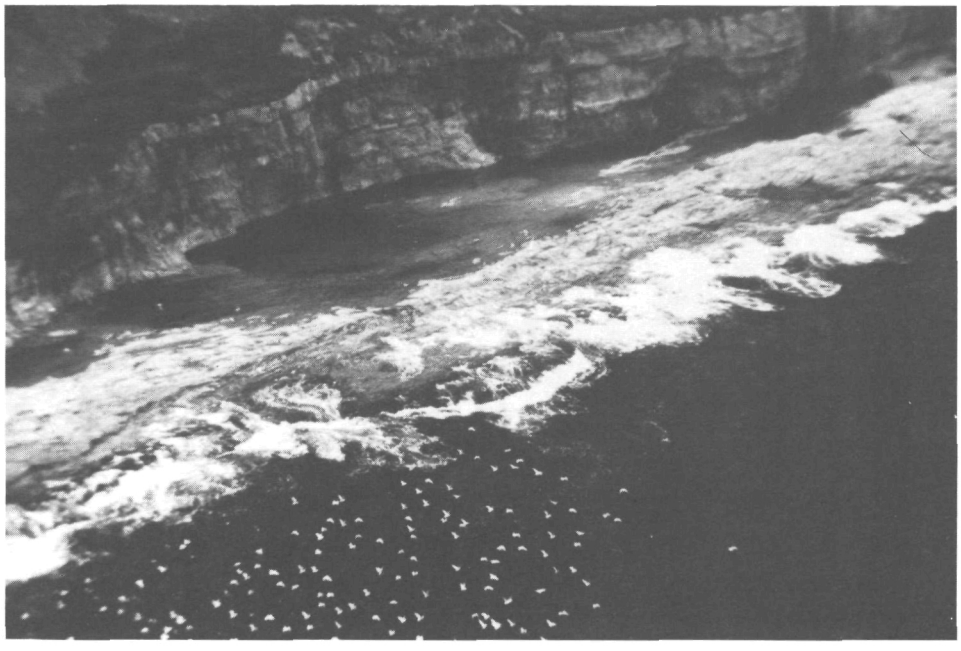


Figure 179 **Large plateforme rocheuse intertidale adossée à une falaise rocheuse verticale, entre Big Brook et Boat Harbour, détroit de Belle-Isle** (juin 1981)

Figure 180 Littoral complexe de chenaux et d'îles près de Boyd's Cove dans le passage Dildo Run, baie des Exploits (juin 1981)

observées sur de vastes vasières intertidales résultent probablement des processus glaciels contemporains sur les côtes. Un levé sur 3 870 km de côte entre le fond de la baie Trinity et l'ouest de la baie Fortune est résumé au tableau 34. Tout comme la côte nord-est de Terre-Neuve (tableau 33) et la côte du Labrador (tableau 32), cette côte est constituée à 60 % de roche en place, mais la prédominance de blocs sur environ un tiers de tout le trait de côte (28 % pour la côte du nord-est de Terre-Neuve et 34 % pour le Labrador) est également notable.

4.5.3 Ouest de Terre-Neuve - secteur nord du golfe du Saint-Laurent

Ce milieu, qui a les mêmes caractéristiques géologiques que celui des côtes orientales du Labrador et de Terre-Neuve, est limité par une vaste mer bordière et donc abrité des vagues très puissantes de l'Atlantique nord-ouest.

La rive nord du golfe du Saint-Laurent, entre le détroit de Belle-Isle et le Saint-Laurent à Pointe-des-Monts, correspond à la bordure sud de la région du plateau Laurentien du Bouclier canadien. Dans la zone côtière, les hauteurs ne dépassent jamais 100 m et le littoral est relativement linéaire, avec la présence de nombreux petits bras et baies. Au large, dans la partie nord du golfe, les îles Mingan et l'île d'Anticosti sont des affleurements de calcaires résistants à pendage sud marqué, le relief est donc plus élevé sur la côte nord que sur la côte sud. Le littoral occidental de Terre-Neuve est relativement linéaire et suit les directions structurales régionales sud-ouest-nord-est. Les basses-terres présentes le long de la moitié nord de cette partie de la côte de Terre-Neuve et dans la péninsule Port-au-Port résultent de l'érosion de roches sédimentaires non résistantes. La côte sud-ouest de Terre-Neuve est une section de hautes-terres d'anciennes roches

Tableau 33 Nord-est de Terre-Neuve : fréquence des principaux types de littoraux (tiré d'Owens et White, 1982)

Nature du littoral	Pourcentage
Falaises de roches en place	38,2
Plage à sédiments mixtes (avec composante secondaire de blocs)	16,1
Plateforme rocheuse	12,6
Plage de sédiments grossiers (avec composante secondaire de blocs)	10,5
Affleurement rocheux dans la zone intertidale	7,1
Plage à sédiments mixtes	5,5
Battures intertidales	4,8
Plage de sable (avec composante secondaire de blocs)	1,8
Plage de sable	1,4
Plage de sédiments grossiers	1,0
Fraction de blocs, %	28,4

volcaniques et intrusives résistantes; le relief atteint 800 m près de la côte.

Les marées sont ici de type semi-diurne mixte avec un marnage moyen compris entre 0,8 et 1,7 m (SHC, 1988). Dans le nord-ouest, le marnage s'accroît en direction de l'estuaire du Saint-Laurent et atteint 2,3 m à Sept-Îles et 2,5 m à Pointe-des-Monts. Dans le détroit de Belle-Isle, le lieu de passage est resserré et on a signalé des courants de flot de 1,8 m/s et de jusant de 1,4 m/s (SHC, 1973).

Tout au long de l'année, les vents soufflent surtout du quadrant ouest, avec une orientation du sud-ouest en été et du nord-ouest en hiver. Leurs vitesses sont plus élevées en hiver, car les systèmes de basse pression qui traversent cette région le long du front polaire y sont plus fréquents et plus intenses. Le fetch maximal observé est de 800 km au sud-ouest de la côte occidentale de Terre-Neuve; il s'agit de la section la plus exposée de cette unité. La rive nord du golfe est un milieu abrité lorsque les vagues sont levées par les vents du nord-ouest, situation fréquente en hiver. Les hauteurs de vagues augmentent vers le large d'ouest en est (tableau 35), comme l'on pourrait s'y attendre dans ce milieu où quasiment toutes les vagues sont produites dans le golfe et où les vents dominants viennent de l'ouest.

De la glace se forme dans les milieux abrités en novembre et décembre. La banquise côtière protège généralement toute la rive nord dès la fin de décembre et la côte nord-ouest de Terre-Neuve jusqu'à la mi-janvier (Markham, 1980). Dans cette unité, toutes les côtes sont protégées par la glace durant la majeure partie de février et

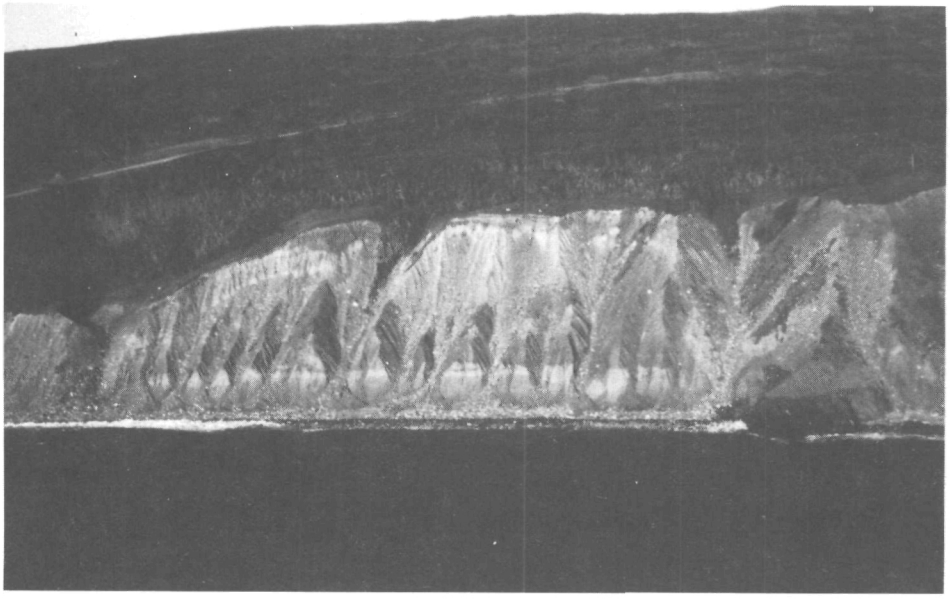


Figure 181 **Falaises de matériaux non résistants près de Jersey Harbour, baie Fortune** (juin 1981)

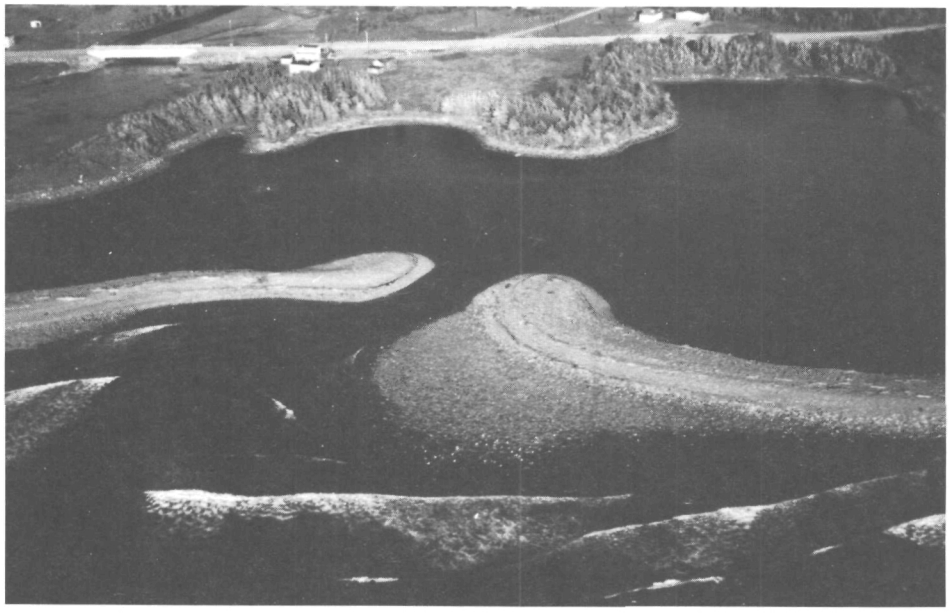


Figure 182 **Sédiments de plage de galets et de blocs et bras à Great Barasway, secteur est de la baie Placentia** (juin 1981)

Tableau 34 Sud-est de Terre-Neuve : fréquence des principaux types de littoraux (tiré de Woodward-Clyde Consultants, 1981c)

Nature du littoral	Fréquence (%)
A. Plage	
Sable	<1
Gravier	4,6
Gravier et blocs	8,8
Galets et cailloux	2,9
Galets, cailloux et blocs	19,2
Blocs	5,2
B. Mixte	
Roches en place et blocs	1,2
C. Roches en place	58,0
Côte avec sédiments, total	42
Côte avec blocs, total	33

de mars (figure 183). Les vents de terre (du nord-ouest) dégagent la côte nord du golfe en direction du sud au début du printemps (mars), bien qu'un pied de glace puisse demeurer sur la rive jusqu'en avril (Dubois, 1980). Cette section est généralement libre de glace à la fin de mai (figure 183), mais, dans le détroit de Belle Isle, la glace peut persister jusqu'à la fin de juillet. Le golfe ne gèle pas complètement et la nature de la couverture de glace varie considérablement d'une année à l'autre, selon la configuration des vents et les températures. Par exemple, au cours du très doux hiver de 1969, les eaux côtières de cette région étaient déjà libres de glace à la mi-mars, à l'exception du détroit de Belle-Isle (Markham, 1980).

Les rives est et nord du golfe sont relativement linéaires, basses et rocheuses. Les sédiments sont généralement rares dans toute la région et le transport de sédiments est très compartimenté à cause de la présence de vastes pans d'affleurements rocheux (Dubois, 1980). Dans la moitié orientale basse du rivage, on observe un grand nombre de baies et de bras parsemés au large de hauts-fonds et d'îles rocheuses peu élevés. Dans cette section, les sédiments sont presque totalement absents et la zone intertidale est essentiellement rocheuse, avec de rares plages de superficie limitée. La section occidentale de la rive nord, à l'ouest de la pointe de Natashquan, est rocheuse et a un relief plus élevé; elle présente quelques grandes accumulations de sédiments, par exemple, à la pointe de Natashquan elle-même et aux embouchures des rivières aux Outardes, Manicouagan, Sainte-Marguerite, Moisie, Mingan et Romaine (Dubois, 1973; 1980). Ces grandes rivières ont érodé les sédiments glaciaires

qui s'étaient déposés sur le Bouclier, d'où la formation de plages de sable locales. En outre, sous l'effet de l'érosion des dépôts glaciaires exposés sur les rivages, des sédiments sont apportés directement à la zone littorale. Dans les îles Mingan et l'île d'Anticosti, les calcaires à pendage marqué vers le sud produisent des falaises abruptes (atteignant 100 m sur l'île d'Anticosti) sur les côtes nord et de bas littoraux en pente douce surmontés de nombreux récifs sur les côtes sud.

La moitié nord de la côte ouest de Terre-Neuve présente un aspect rocheux, irrégulier et bas qui cède la place, vers le sud, à des hautes-terres (figure 184), marquées de quelques fjords près de la baie Bonne et de la Bay of Islands. Des levées de plages de gravier ou des flèches littorales se sont formées là où l'érosion côtière ou fluviale de dépôts glaciaires meubles fournit des sédiments à la zone littorale (figures 185 et 186), comme par exemple dans la baie St. Georges (Forbes, 1984; Shaw et Forbes, 1987). Toute cette section est caractérisée par de basses côtes rocheuses relativement abritées des vagues.

4.5.4 Estuaire du Saint-Laurent

De par sa nature, cet estuaire possède des caractéristiques des milieux fluvial, estuarien et côtier. La moitié orientale de l'estuaire consiste en hautes-terres qui atteignent 500 m sur la rive nord et culminent à 1 000 m sur la rive sud. Sur le plan géologique, ces côtes se composent de roches résistantes du Bouclier sur la rive nord et de roches résistantes métamorphiques et sédimentaires déformées sur la rive sud. Le Saguenay est un vaste fjord de la rive nord de l'estuaire, érodé par la nappe glaciaire pléistocène et constituant aujourd'hui une composante du milieu estuarien. La section à l'ouest de Québec est une région basse de roches sédimentaires moins résistantes. Dans les sections basses, la roche en place est recouverte d'épais dépôts de sédiments meubles, qui fournissent des matériaux à la zone littorale.

L'estuaire a la forme d'un long entonnoir et le marnage moyen augmente vers l'ouest de 3,0 m à Pointe-au-Père, à 4,1 m à Québec et atteint son maximum de 4,97 m à Saint-Joachim (où le marnage de vives-eaux est de 6,37 m) (SHC, 1988). Passé ce point, le marnage diminue pour n'être plus que de 1,9 m à Grondines, mais de petites variations du niveau des eaux (inférieures à 0,2 m) liées aux marées sont perceptibles jusqu'à Montréal. L'une des caractéristiques de ces marées dans l'estuaire est que le niveau de l'eau se soulève plus rapidement qu'il ne s'abaisse. Par exemple, à Grondines, la

Tableau 35 **Données sur les hauteurs de vagues, section nord du golfe du Saint-Laurent** (tiré de Ploeg, 1971)

	Hauteurs de vagues significatives médianes (m)			Hauteurs de vagues significatives 1 fois par année (prévision)
	Été	Hiver	Moyenne juin-décembre	
Sept-Îles	0,6	0,8	0,7	4,9
Au large de l'ouest de l'île d'Anticosti	0,8	1,2	0,9	7,9
Au large de l'est de l'île d'Anticosti	0,9	1,6	1,1	6,1
Cap North (sud du détroit de Cabot)	1,2	3,2	1,4	7,6
Cap Whittle (nord du détroit de Belle-Isle)	1,1	1,4	1,1	5,8

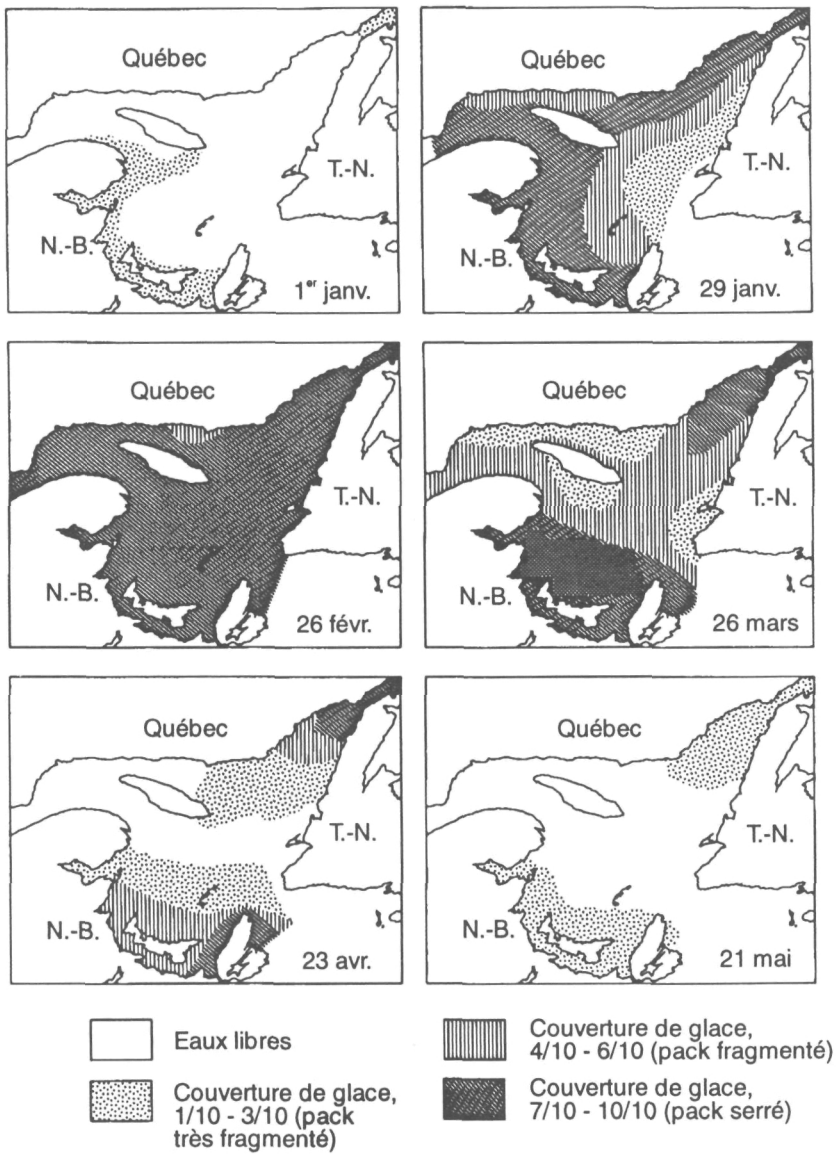


Figure 183 **Distribution moyenne de la glace sur cinq ans, golfe du Saint-Laurent** (à des dates choisies) (d'après Matheson, 1967)

marée descend généralement pendant huit heures mais monte en quatre heures (Dohler, 1969).

Il s'agit d'un milieu à hydrodynamisme faible, à cause des très petits fetches dans l'estuaire. En outre, l'hydrodynamisme est dissipé vu la très grande profondeur d'eau là où le marnage est fort. Les processus qui dominent les littoraux dans le haut estuaire sont de types fluviaux et, dans les estuaires moyen et maritime, plutôt reliés aux marées. De la glace recouvre la zone intertidale en décembre et persiste généralement jusqu'à la fin avril. Le fleuve a généralement une couverture de glace de 10/10, mais les floes ne sont généralement pas soudés les uns aux autres, à cause des courants relativement puissants.

Figure 184 **Littoral rocheux résistant, péninsule de Port-au-Port, côte ouest de Terre-Neuve** (août 1972)

Figure 185 **Cap et plage, port de Trout River, Terre-Neuve** (octobre 1981; photo de C.L. Amos)

Figure 186 Cordon littoral à l'embouchure de la rivière de Fox Island, Terre-Neuve

La géomorphologie côtière de ce milieu essentiellement estuarien va des littoraux rocheux aux larges vasières intertidales adossées à des marais. Les côtes rocheuses sont surtout découpées dans des affleurements de roches métamorphiques ou résistantes du Bouclier, de telle sorte que les taux d'érosion sont faibles et l'apport en sédiments peu important. Dans les haut et moyen estuaires, surtout sur la rive sud, des plateformes intertidales atteignent 2 km de largeur et sont recouvertes de vase et de sable (Dionne, 1985). On note aussi des accumulations de matériaux grossiers (cailloux et blocs) déposés par des processus glaciaires et des mécanismes glaciels (Dionne, 1968; 1981a). La mesure de la variation des hauteurs des wadden du cap Tourmente révèle l'existence d'un cycle : érosion printanière, sédimentation en juin, août et septembre (qui correspond à la période de croissance végétative maximale), érosion automnale et période d'inactivité en hiver, à cause de la présence de la glace (Troude et Serodes, 1985). Les changements associés à ce cycle d'érosion-sédimentation sont d'environ 30 cm.

À de nombreux endroits, les battures intertidales sont adossées à de vastes marais d'une trentaine de kilomètres carrés de superficie totale (Dionne, 1985). Les wadden et les marais sont plus vastes sur la rive sud de l'estuaire que sur la rive nord. L'un des principaux processus géomorphologiques qui s'exercent à ces endroits est lié aux effets de la sédimentation et de l'érosion glacielles en hiver et au printemps. En effet, la glace entraîne la formation de cicatrices d'érosion et le transport par glace de mottes de marais et de sédiments intertidaux (figure 187) (Dionne, 1972; 1981b).

4.5.5 Partie sud du golfe du Saint-Laurent

Les vastes basses-terres situées au sud du golfe du Saint-Laurent sont bordées au

nord-ouest par les hautes-terres résistantes de la Gaspésie et à l'est par les hautes-terres du Cap-Breton. C'est un milieu abrité, exposé surtout aux vagues engendrées localement et aux faibles marnages. Les processus qui s'exercent sur la côte sont limités par la présence de glace jusqu'à quatre mois par année. Les sédiments littoraux sont relativement abondants, ce qui a entraîné la formation de plus de 350 km d'îles-barrières, de cordons littoraux et de flèches littorales.

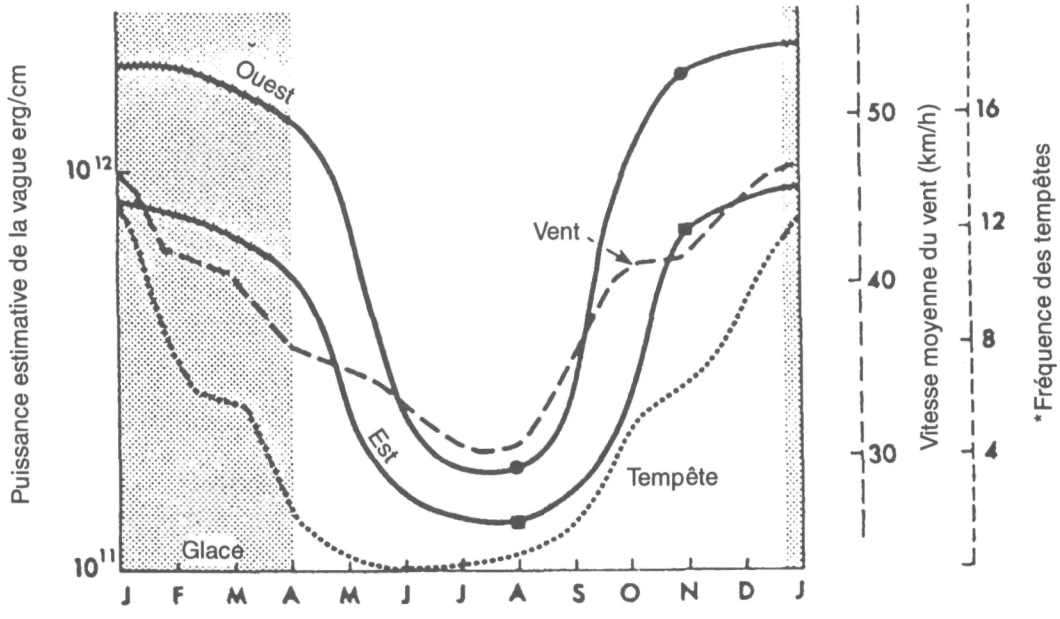
Les roches sédimentaires et métamorphiques résistantes de la Gaspésie sont orientées approximativement dans l'axe est-ouest et sont séparées des basses-terres sédimentaires au sud par le large estuaire de la baie des Chaleurs. Dans sa partie est, le sud du golfe est limité par les roches volcaniques et ignées des hautes-terres du Cap-Breton qui suivent la direction régionale sud-ouest-nord-est des Appalaches. Les vastes basses-terres de roches sédimentaires situées entre ces deux zones de hautes-terres ont une forme semi-circulaire; les plages sous-marines à cet endroit sont très peu profondes. Les Îles-de-la-Madeleine, situées dans la partie centrale de cette plateforme peu profonde, correspondent à de petits affleurements des roches des basses-terres. L'Île-du-Prince-Édouard a été séparée du continent par suite de l'ennoyage d'un système de vallées fluviales élargies par les glaciers. Sur presque toutes ces basses-terres, des accumulations étendues de sédiments ont été laissées par les inlandsis.

Il s'agit d'un milieu où les marées sont faibles; les marnages moyens varient de 0,5 à 2,0 m. Les marées sont de type mixte, semi-diurne, sauf près du détroit de Northumberland où elles sont diurnes. Les vents dominants sont du quadrant ouest et sont forts en hiver. Le mode d'action des vagues est caractérisé par les effets des ondes de tempête engendrées localement sous l'effet des dépressions qui traversent cette région. Les côtes faisant face à l'ouest et au nord sont exposées à un hydrodynamisme plus élevé que sur les côtes faisant face à l'est (figure 188); les hauteurs de vagues augmentent d'ouest en est dans la partie sud du golfe (tableau 36). Les plages et les avant-plages sont couvertes de glace de la mi-décembre à avril ou mai chaque année, ce qui limite l'efficacité de l'action des vagues durant la période où elles seraient habituellement au maximum (Owens, 1976). Malgré les effets limitants de la glace en hiver, on note une différence significative entre l'hydrodynamisme en été et en hiver, à cause du passage de tempêtes dans cette région durant la période libre de glace d'octobre à décembre (figure 188). Dans ce milieu d'ondes de tempête, ce sont parfois les événements rares, mais souvent très puissants, qui dominent le développement des côtes et même l'érosion des hautes-plages (Owens, 1977c; Simmons, 1982).

Les côtes de ce milieu (figure 189) sont essentiellement de hautes falaises rocheuses ou de basses îles-barrières. Les hautes-terres de la Gaspésie (figure 190) et de l'île du Cap-Breton sont découpées par des falaises de roches résistantes (atteignant par endroits 800 m de hauteur) et contre lesquelles s'adossent à l'occasion de petites plages concaves de galets et de cailloux. En Gaspésie, la présence, dans la zone intertidale, de plateformes d'abrasion quasi horizontales, dont la largeur atteint un maximum de 100 m, s'explique par l'érosion marine et littorale de la roche en place (Trenhaile, 1978).

Le littoral peu élevé a été érodé et ennoyé pour produire de nombreux estuaires et baies peu profonds. Les grès relativement peu résistants des basses-terres (figure 191) sont

Figure 187 **Motte de marais transportée par la glace sur les vasières intertidales, rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent, Berthier, Québec** (avril 1974)



a) Hydrodynamisme estimatif sur les cordons littoraux est et ouest des Îles-de-la-Madeleine (Qc)
b) Vitesse moyenne du vent par mois
c) Fréquence mensuelle des tempêtes

La partie ombragée indique la période de couverture de glace de mer ou de la présence de la banquette côtière. Les valeurs de l'hydrodynamisme sont extrapolées et la fréquence des tempêtes(*) représente le nombre de périodes à chaque mois où la vitesse du vent dépasse 55 km/h, à partir de données établies sur une période de 40 ans.

Figure 188 **Variations saisonnières** (tiré d'Owens, 1977c)

Tableau 36 Caractéristiques des vagues de la partie sud du golfe du Saint-Laurent (tiré de McCann, 1979)

	Été	Hiver
Avant-plage		
Baie Kouchibouguac[a]		
Hauteur d'onde moyenne (cm)	36	--
Hauteur d'onde maximale (cm)	189	--
Période d'onde moyenne (s)	2,8	--
Période d'onde maximale (s)	6,4	--
Îles-de-la-Madeleine, est[b]		
Hauteur d'onde significative moyenne (cm)	35	98
Hauteur d'onde significative maximale (cm)	200	350
Période d'onde moyenne (s)	4,1	5,9
Période d'onde maximale (s)	7,5	--
Îles-de-la-Madeleine, ouest[b]		
Hauteur d'onde significative moyenne (cm)	49	110
Hauteur d'onde significative maximale (cm)	230	392
Période d'onde moyenne (s)	4,1	5,1
Période d'onde maximale (s)	8,0	--
Golfe		
Rochers-aux-Oiseaux[c]		
Hauteur d'onde significative moyenne (cm)	107	189
Hauteur d'onde significative maximale (cm)	335	564
Période d'onde moyenne (s)	5,4	7,0
Période d'onde de 1 % (s)	9,4	12,6

Sources: [a] Greenwood et Davidson-Arnott, 1975 (du 9 au 23 août 1973)
[b] Owens, 1977d (du 29 juillet au 15 août 1974 et du 14 au 30 novembre 1975)
[c] Ploeg, 1971 (du 27 juillet au 15 septembre 1967 et du 1er novembre au 11 décembre 1967). Les Rochers-aux-Oiseaux sont situés à 25 km au nord des Îles-de-la-Madeleine et présentent de longs fetches au nord-ouest et au nord-est; ils sont soumis à l'influence de la houle de l'Atlantique.

facilement érodés sous l'effet des processus littoraux et on a observé des taux de recul d'environ 0,5 à 1,5 m/a (Owens, 1974, 1979b; Forbes, 1982). L'érosion de ces roches sédimentaires peu résistantes et des dépôts glaciaires meubles a fourni des matériaux pour la formation du vaste système d'îles-barrières et de cordons littoraux qui, actuellement, ferment partiellement ou complètement nombre des indentations du littoral (Owens, 1974, 1975). Il s'agit d'une côte très dynamique à la fois pour l'érosion des affleurements de la roche en place de la côte et des plages, et aussi pour les processus s'exerçant dans les chenaux de marée. Le système d'îles et de cordons sableux est particulièrement bien développé le long de la côte nord de l'est du Nouveau-Brunswick (figure 192) (Bryant et McCann, 1973; Davidson-Arnott et Greenwood, 1976; Greenwood et Davidson-Arnott, 1975, 1977; McCann, 1979; McCann *et al.*, 1977; Owens, 1974, 1975; Reinson, 1977, 1980), dans le nord de

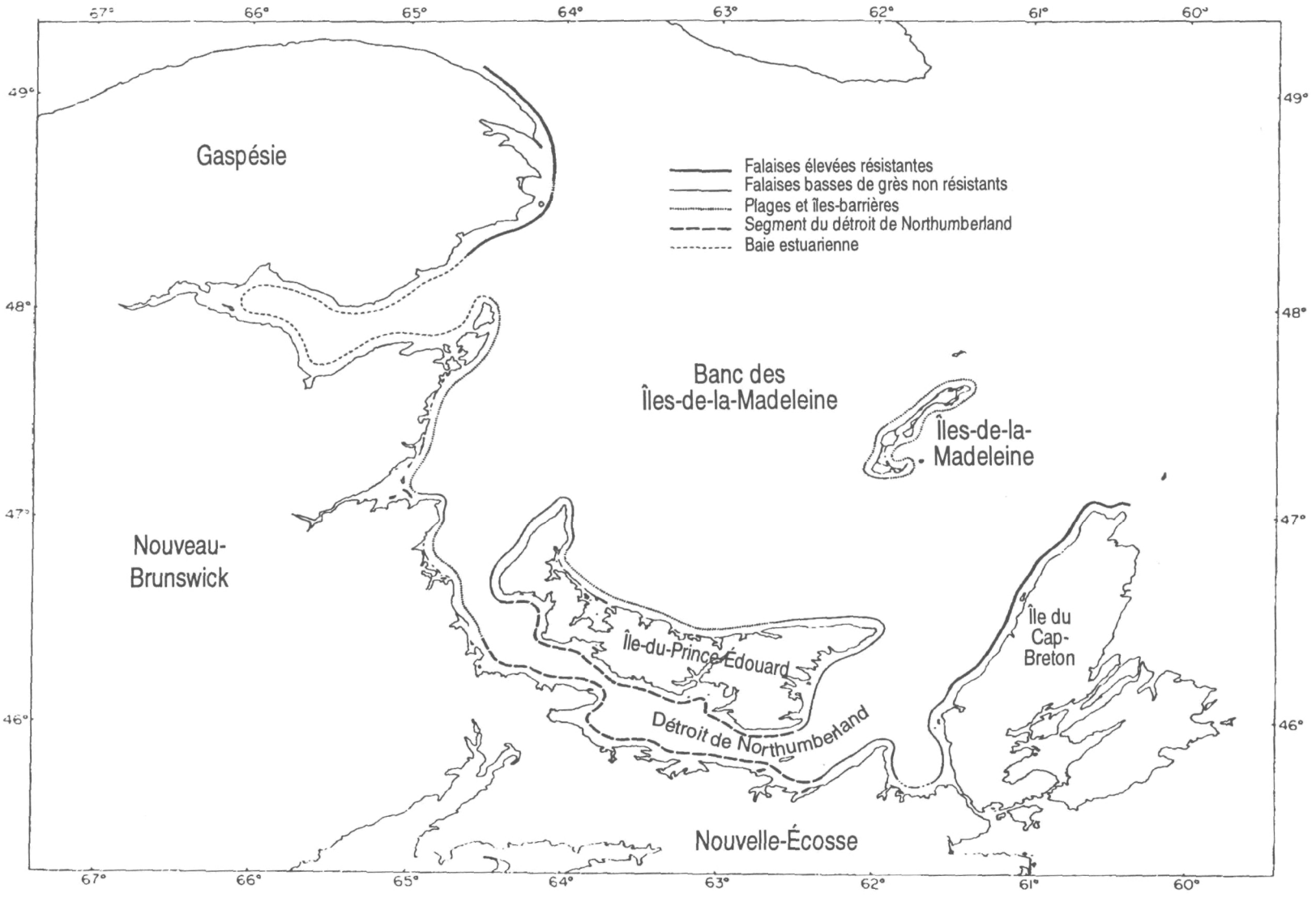


Figure 189 **Géomorphologie côtière de la partie sud du golfe du Saint-Laurent** (tiré d'Owens, 1974)

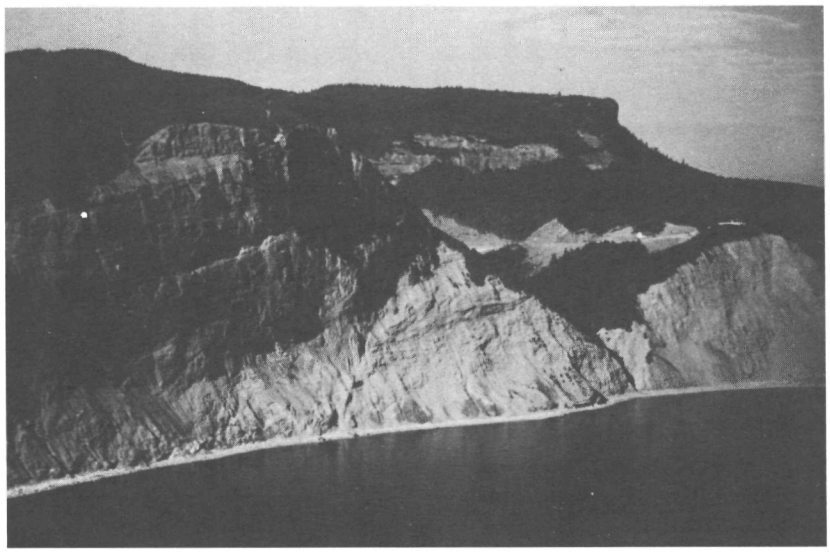


Figure 190 **Falaises élevées** (120 m) **et plages étroites, à l'ouest de Percé, Gaspésie, Québec** (août 1971)

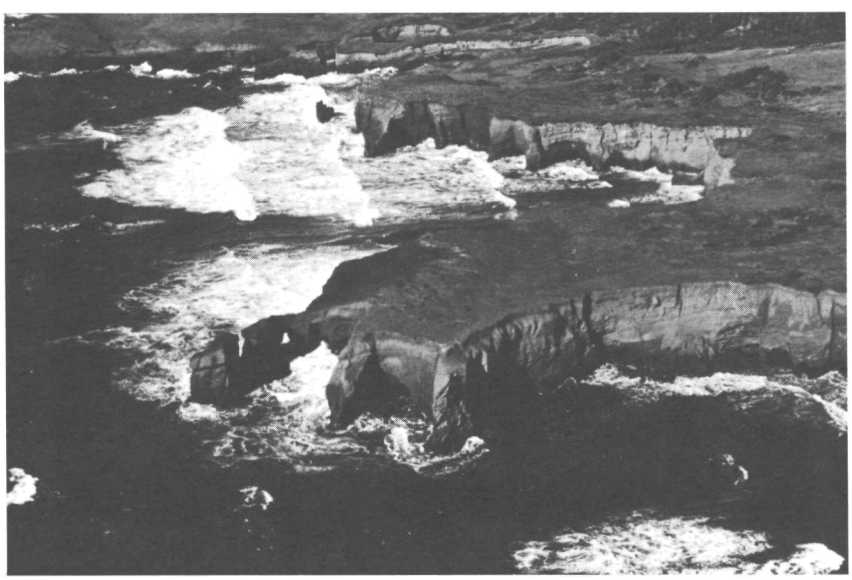


Figure 191 **Basses falaises de grès peu résistants** (15 à 20 m)**, côte ouest des Îles-de-la-Madeleine, Québec** (photo de P. Hague, août 1972)

l'Île-du-Prince-Édouard (figure 193) (Armon et McCann 1977, 1979; Owens, 1979b) et aux Îles-de-la-Madeleine (figure 194) (Owens, 1977c,d; Owens et McCann, 1980).

Les systèmes de cordons et d'îles-barrières du Nouveau-Brunswick, du nord de l'Île-du-Prince-Édouard et des Îles-de-la-Madeleine sont les plus vastes du Canada et constituent en fait la principale caractéristique du milieu côtier. On note toutefois des variations considérables dans les formes et les processus de ces diverses composantes d'une région à l'autre, qui s'expliquent en grande partie par l'orientation du littoral par rapport aux vents d'ouest dominants. Les plages du Nouveau-Brunswick sont généralement abritées puisque les vents d'ouest soufflent vers la mer et que, dans le sud (baie Kouchibouguac), l'Île-du-Prince-Édouard assure une protection supplémentaire contre les vents et les vagues provenant du nord-est. Ces plages où l'hydrodynamisme est relativement faible sont moins bien développées que celles des régions plus exposées; les plages et les dunes y sont généralement basses et souvent recouvertes d'eau durant les tempêtes. Les chenaux de marée sont dynamiques au sens où ils peuvent s'ouvrir, se fermer ou se déplacer le long de la rive, souvent par suite des inversions de la dérive durant les tempêtes où des quantités considérables de sédiments peuvent être redistribuées le long des côtes (Reinson, 1980). La côte du nord de l'Île-du-Prince-Édouard est abritée des vents d'ouest, mais exposée aux vagues provenant du quadrant nord. À cet endroit, les plages sont plus larges, les dunes plus hautes (jusqu'à 10 m) et les chenaux de marée plus stables. Les plages de la côte ouest des Îles-de-la-Madeleine sont exposées aux vagues les plus puissantes de cette région, puisqu'elles font face à la direction des vents dominants, tandis que les plages de l'est des Îles-de-la-Madeleine sont abritées et ont un mode calme (figure 188) semblable à celui du Nouveau-Brunswick (Owens, 1977c,d). Les cordons littoraux face à l'ouest des Îles-de-la-Madeleine comportent des dunes élevées (10 m) et connaissent un cycle caractéristique estival-hivernal de variations, alors que dans les autres régions les variations sont plutôt liées au passage de tempêtes dans la région. Partout dans ce secteur, la stabilité des segments de plage est essentiellement liée à la disponibilité locale de sédiments et au taux de transport littoral des sédiments (McCann, 1985). Les plages se composent souvent d'une mince couche de sédiments reposant sur la roche en place et reculent généralement vers l'intérieur en recouvrant les marais d'arrière-barrière à des vitesses atteignant 1 m/a (Forbes, 1987).

La côte du détroit de Northumberland est un milieu plus abrité et présente divers types de littoraux qui comprennent les basses falaises de grès, les plateformes intertidales (figure 195) avec des dépôts de sable et de vase (figure 196) et les petits cordons littoraux sableux (Owens et Bowen, 1977). Les falaises de grès peu résistant reculent, sous l'effet des processus côtiers, à des vitesses de 1 à 2 m/a (Owens, 1979b). L'engraissement des plages sur ces côtes est limité, car les taux locaux d'apport en sédiments sont inférieurs à ceux des plages plus exposées, où le transport de sédiments est assuré par l'action de vagues plus fortes (Owens, 1980a).

4.5.6 Côte atlantique de la Nouvelle-Écosse

Cette côte basse est un milieu d'ondes de tempête comportant relativement peu de plages. La côte rocheuse résistante suit la direction régionale sud-ouest-nord-est des Appalaches. Le relief est généralement inférieur à 100 m, à l'exception de la côte

Figure 192 **Îles-barrières de sable et chenaux, Tracadie, Nouveau-Brunswick** (juin 1971)

Figure 193 **Plage de Cavendish, côte nord, Île-du-Prince-Édouard** (la large plage sableuse, adossée à de vastes champs de dunes en cours d'érosion, est bordée par une lagune à marée) (août 1972)

Figure 194 **Cordon littoral sableux orienté vers l'ouest, Îles-de-la-Madeleine, Québec** (photo de P. Hague, août 1972)

Figure 195 **Plateforme intertidale et falaise découpées dans des grès peu résistants, entrée du port de Charlottetown, Île-du-Prince-Édouard, détroit de Northumberland** (octobre 1977)

Figure 196 **Cordons littoraux sableux, baie Hillsborough, sud de l'Île-du-Prince-Édouard**
(les cordons se sont formés sur une large plateforme rocheuse à pente douce)
(le marnage moyen est de 1,9 m)

nord-est de l'île du Cap-Breton constituée de hautes falaises.

Les roches sont principalement des affleurements résistants métamorphiques et ignés (figure 197) qui ont été érodés par les glaciers, souvent conformément à la topographie préexistante. Les basses-terres ont été ultérieurement ennoyées par le soulèvement postglaciaire du niveau marin, ce qui a produit un littoral irrégulier marqué de nombreuses baies, petites et grandes, et parsemé d'îles. Dans le sud-est de l'île du Cap-Breton et le nord de la baie de Chedabucto, des affleurements de roches sédimentaires moins résistantes ont été érodés et forment une baie profonde correspondant à une faille importante (Owens, 1971). Les effets des glaciers pléistocènes sont toujours importants puisque les marégraphes indiquent que le taux de soulèvement relatif du niveau marin dans cette région est à l'heure actuelle d'environ 4 mm/a (Grant, 1975).

Le marnage moyen diminue de 3,7 m à Yarmouth à 0,9 m à Sydney. La côte extérieure est très battue par les vagues de l'Atlantique ouest, même s'il s'agit d'une côte partiellement abritée au sens où la plupart des vents viennent de l'ouest-nord-ouest (vents de terre). La formation locale de vagues est liée essentiellement aux vents associés aux systèmes de basse pression qui traversent cette région en hiver; il y a donc une augmentation marquée de l'hydrodynamisme à cette époque de l'année (figures 6 et 94).

La glace peut jouer un rôle important de modification des milieux. Ainsi, l'atténuation des vagues peut se produire en mer, les années de forte accumulation de glace, la banquise pouvant longer la côte dans son déplacement vers le sud sous l'effet du courant du Labrador. La mer est généralement gelée au large de l'est de l'île du Cap-Breton du début de janvier à la

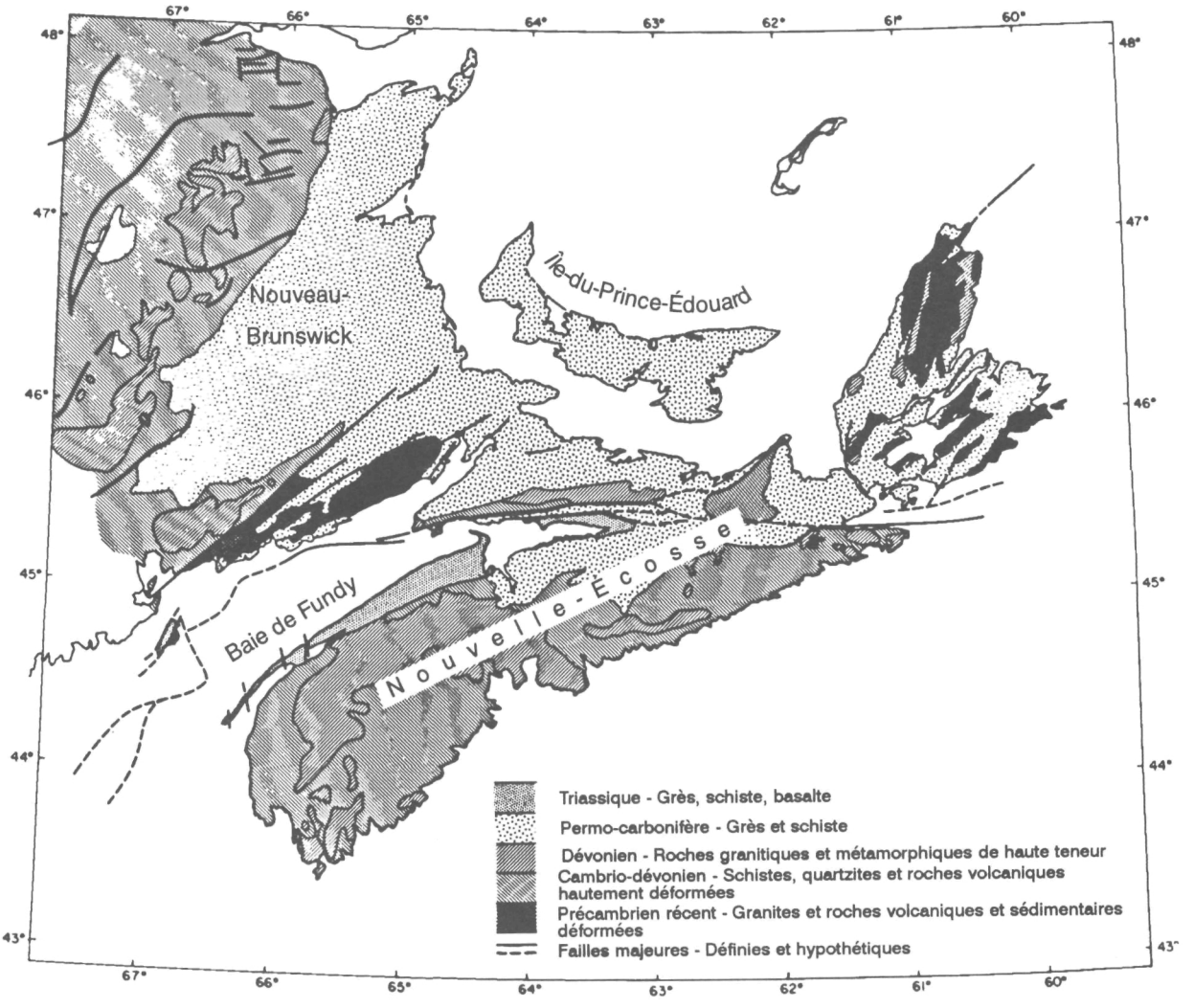


Figure 197 Carte géologique des provinces Maritimes (compilée à partir de diverses sources)

mi-mai et la limite sud moyenne de la banquise en février-mars est la baie de Chedabucto (Markham, 1980). Certaines années (p. ex., en 1969) se caractérisent par l'absence de glace durant l'hiver sur la côte de l'Atlantique, tandis qu'en de très rares occasions, la glace peut s'étendre jusqu'à Yarmouth (p. ex., en 1987). Toutefois, la plupart du temps, la présence de glace est fréquente dans les baies et estuaires abrités de toute la région pendant quatre mois au plus.

La côte atlantique est traitée comme une seule unité aux fins de la présente étude. Des travaux plus détaillés ont cependant permis de subdiviser la côte; par exemple, Owens et Bowen (1977) ont défini quatre segments homogènes et Munroe (1982) a reconnu 12 unités «morpho-dynamiques» entre le détroit de Canso et la péninsule Digby. On remarque une homogénéité considérable au niveau régional, le façonnement des plages étant fortement lié au relèvement du niveau marin. En outre, l'approvisionnement en sédiments est presque partout limité (Boyd *et al.*, 1987).

En présence de sédiments relativement abondants, on a pu observer un certain développement et un certain engraissement des plages, malgré la remontée du niveau des mers (Forbes et Taylor, 1987; Scott *et al.*, 1987). Il arrive plus souvent, par contre, que les approvisionnements en sédiments soient limités et que les plages soient plutôt en train de gagner lentement sur les terres et de recouvrir les marais. Le taux de migration varie, mais dépasse 1 m/a par endroits (Forbes *et al.*, 1990). L'érosion côtière des dépôts glaciaires de surface tels les drumlins, le till et les épandages fluvioglaciaires (figure 198) constitue la principale source de sédiments littoraux; on y observe une proportion élevée de matériaux grossiers, de telle sorte que les plages de galets et de cailloux sont fréquentes (figure 199). De vastes champs de drumlins s'observent le long de la rive dans le sud-est de l'île du Cap-Breton, le nord de la baie de Chedabucto et la région de Halifax-baie Mahone, et c'est dans ces sections côtières que les plages sont le mieux développées (Forbes et Taylor, 1987). La plupart des plages s'étant formées dans des baies, il y a peu d'échanges de sédiments entre celles-ci (Boyd et Penland, 1984; Carter *et al.*, 1987).

Les taux d'érosion des falaises de tills et de migration des plages vers les terres varient considérablement et dépendent largement de l'exposition aux vagues. On a mesuré des taux de recul des falaises de till de 1,3 m/a dans la baie de Chedabucto (Owens et Rashid, 1976), de 2,5 m/a sur les sections exposées et de 0,2 à 0,4 m/a dans les sections abritées de la baie Mahone (Piper, 1980). Un relevé entrepris en 1981 à huit sites choisis (Taylor *et al.*, 1985) a établi des vitesses de recul des falaises de till de 1,1 m/a en moyenne sur la rive est, de 0,4 m/a sur la rive sud, avec un taux maximal de 3,3 m/a pour les caps exposés. Dans certaines régions, les taux de migration ou de recul naturels des plages se sont accrus par suite de l'enlèvement antérieur de sédiments (Owens et Drapeau, 1973) ou à cause de «l'exploitation» de matériaux grossiers (Bowen *et al.*, 1975).

Un levé détaillé du littoral de l'île du Cap-Breton entre Glace Bay et la pointe Michaud a révélé que 33 % de la côte se compose de sédiments de plage grossiers ou de sable (tableau 37), la majeure partie étant constituée de roche en place (Reinson, 1979). Un autre relevé plus général, répertoriant la côte entre le détroit de Canso et la péninsule Digby a permis de déterminer que 32 % de la côte était constitué de roche en place ou d'affleurements de la roche en place recouverts d'un placage de sédiments grossiers (Munroe, 1982). Sur les 68 % restants, la plupart étaient composés de sédiments grossiers (c'est-à-dire de galets et de cailloux) et seulement 5 % étaient caractérisés par des dépôts de sable.

L'aspect de la majeure partie de cette côte est lié à la topographie résistante ancienne résultant de l'érosion glaciaire le long de directions essentiellement fluviales. Des plages occupent les nombreuses baies formées dans la zone côtière par suite de l'érosion des sédiments glaciaires, généralement grossiers, qui ont été laissés derrière l'inlandsis pléistocène en recul. Les plages sont généralement constituées de matériaux à granulométrie grossière (figure 200).

Ces flèches littorales ou barrières à l'embouchure d'une baie (figure 201) délimitent des milieux plus abrités dans lesquels on trouve souvent des systèmes de marais bien développés. Les accumulations de sédiments fins (vase) (figure 202) sont plus fréquentes et les marais (figure 203) plus étendus dans le sud-ouest, où le marnage est également le plus élevé. Il

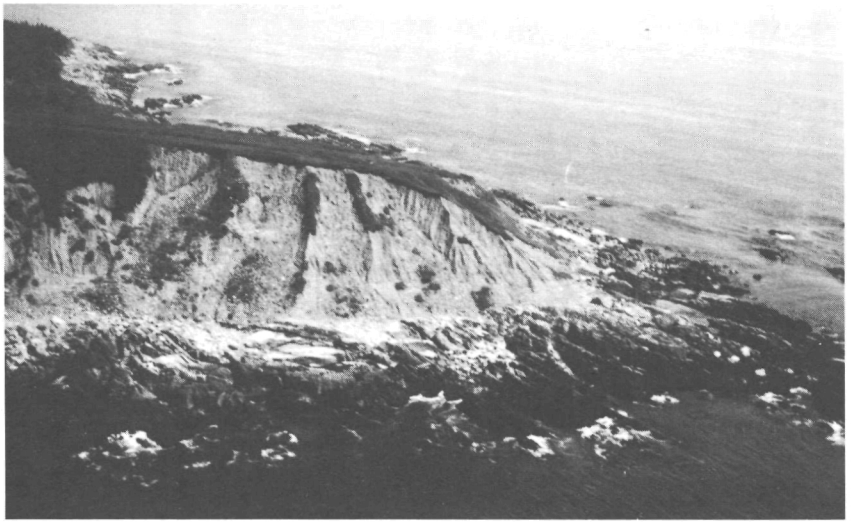


Figure 198 **Dépôts glaciaires meubles en cours d'érosion reposant sur une plateforme intertidale de roche en place résistante, cap La Have, Nouvelle-Écosse** (juillet 1982)

Figure 199 **Plage de blocs, de galets et de cailloux, pointe Larry's, baie Tor, côte est de la Nouvelle-Écosse** (juillet 1982)

Tableau 37 Distribution des types de littoraux, sud-est de l'île du Cap-Breton (tiré de Reinson, 1979)

	Longueur (km)	Plage (%)	Roche (%)
Glace Bay - île Scatari	620	26	74
Île Scatari - fond de la baie Gabarus	810	24	76
Fond de la baie Gabarus - pointe Michaud	775	48	52

existe un contraste marqué à de nombreux endroits entre les sections de promontoires rocheux exposés aux vagues puissantes (figures 204 et 205) et les baies abritées à mode calme (figure 201) dont la zone intertidale présente souvent des plages et des sédiments. Les plages sont les mieux développées là où se sont formés des drumlins dans la zone littorale, mais le transport de sédiments est très compartimenté.

4.5.7 Baie de Fundy

La baie de Fundy, grand rentrant situé entre la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick, se caractérise par un fort marnage. La baie correspond à un demi-graben du Triassique, associé à l'ouverture de l'Atlantique nord le long des directions structurales régionales sud-ouest-nord-est des Appalaches. Les rives nord et sud relativement linéaires de la principale portion de la baie sont composées d'intrusions volcaniques résistantes à relativement résistantes. Dans le fond de la baie, l'érosion fluviale et glaciaire de roches sédimentaires peu résistantes a entraîné la formation de deux vastes rentrants (bassin Minas-baie Cobequid et baie Chignecto) qui sont séparés par de hautes-terres de roches résistantes (les collines Cobequid).

À l'époque de la déglaciation [il y a 14 000 ans avant le présent (BP) (Prest, 1970)], le niveau moyen des mers était de +45 m; il s'est abaissé à -30 m il y a 8 000 ans BP à la suite de la remontée eustatique du niveau de la mer, malgré la rapide détente isostatique survenue dans la région après le retrait de l'inlandsis.

Le niveau moyen de la mer s'est élevé d'environ 15 cm/siècle depuis 7 000 ans BP (Amos et Zaitlin, 1984-1985). Ces variations du niveau marin ont eu un effet majeur sur les marnages et sur les caractéristiques préhistoriques de cette région.

Ce sont les marées et les processus tidaux qui dominent la zone littorale et de l'avant-plage de ce milieu côtier. Le marnage maximal observé de 16,3 m (Dawson, 1917, cité dans Middleton, 1980) a été dépassé durant des tempêtes et a atteint 21 m (Ganong, 1903). Le marnage moyen des marées semi-diurnes augmente d'ouest en est et passe de 5 m dans le fond de la baie à 15 m dans la baie Chignecto et le bassin Minas (SHC, 1988) (figure 206). L'importance du marnage s'explique par l'amplification de la marée océanique semi-diurne par résonance sous l'effet de la géométrie du système baie de Fundy-golfe du Maine (Garrett, 1972).

Les courants sont rapides partout, sauf dans les secteurs abrités, à cause des grands volumes d'eau qui entrent dans la baie et en sortent; d'environ 0,7 m/s à l'embouchure de la baie de Fundy, ils atteignent une vitesse

Figure 200 **Plage de gravier, île Crawley's, sud-ouest de la Nouvelle-Écosse** (*cf.* figure 23, juillet 1982)

Figure 201 **Cordon littoral de gravier en travers de l'estuaire de la rivière Necum Teuch, côte est de la Nouvelle-Écosse** (juillet 1982)

Figure 202 **Vasières intertidales à marée basse, rivière Tukset, sud-ouest de la Nouvelle-Écosse** (juillet 1982)

Figure 203 **Marais, côte ouest du port de Chebogue, sud-ouest de la Nouvelle-Écosse** (juillet 1982)

Figure 204 **Côte élevée et roche en place dans la zone intertidale, cap Smokey, île du Cap-Breton, Nouvelle-Écosse** (juillet 1982)

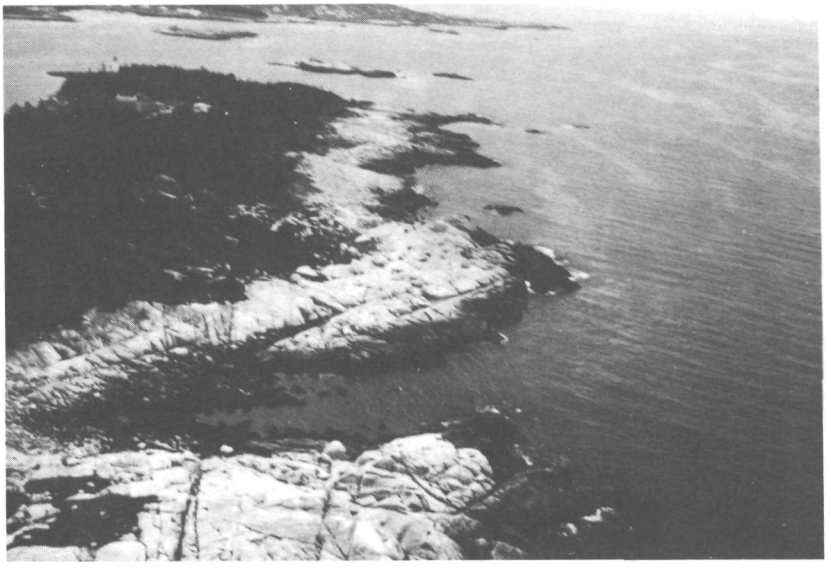


Figure 205 **Basse côte de roche en place résistante, île Paddy's Head, partie est de la baie St. Margarets, Nouvelle-Écosse** (juillet 1982)

maximale supérieure à 5,0 m/s aux marées de vives-eaux dans le bassin Minas (Amos et Long, 1980). Une conséquence importante d'un fort marnage est l'énergie des vagues que se dissipe sur une section verticale considérable de la zone intertidale.

L'importance des processus liés aux vagues par rapport à ceux exercés par les marées diminue d'ouest en est dans la baie. Les hauteurs de vagues sont maximales dans la section inférieure, à l'ouest de St. John. Dans cette région, aux vagues engendrées localement se superpose la houle de l'Atlantique (golfe du Maine) et les hauteurs de vagues dépassent 3,6 m en été et 4,0 m en hiver, seulement 10 % du temps (Swift *et al.*, 1973). Au contraire, dans le bassin Minas, les vagues dépassent 1,5 m de hauteur 10 % du temps et la hauteur moyenne est de 0,15 m en été et 0,61 m en hiver, avec une hauteur maximale mesurée de 1,8 m (Amos et Long, 1980).

L'action des vagues et de la marée est limitée par la présence de glace dans les parties supérieures de la baie de Fundy de la moitié à la fin de décembre à la moitié à la fin d'avril (Knight et Dalrymple, 1976; Gordon et Desplanque, 1981). La banquette côtière (pied de glace) peut avoir une épaisseur supérieure à 5 m et former un mur sur les côtes accores ou dépasser 100 m de largeur sur les pentes douces (Gordon et Desplanque, 1981).

Pour bien comprendre les caractéristiques et la dynamique de ce milieu côtier, il faut savoir que le littoral n'est pas étroit, comme c'est le cas dans les milieux à marée faible et moyenne, mais qu'il atteint par endroits 5 km de largeur. À marée haute, cette zone est recouverte d'eau et soumise aux processus littoraux et marins. À marée basse, cette zone est exposée aux processus subaériens (figure 207). Thomas (1977) a comparé la longueur de la côte et la zone intertidale adjacente; par exemple, dans la baie Chignecto, il a étudié un littoral sur une longueur de 470 km et une zone intertidale de 328 km^2.

La côte de la baie de Fundy (figure 208) a été divisée en six unités par Owens (1977b) qui fournit une description plus détaillée de ces caractéristiques (voir également Welsted, 1974; Owens et Bowen, 1977). La géomorphologie côtière de la baie proprement dite est caractérisée par des plateformes rocheuses, généralement recouvertes d'une mince couche de galets et de cailloux (figures 49, 209 et 210), qui cède la place à des affleurements rocheux à la laisse de haute mer.

À certains endroits, la largeur de ces plateformes peut atteindre 200 m à marée basse et les falaises peuvent atteindre 200 m de hauteur. À cause de la nature résistante des affleurements de la roche en place et du manque général de sédiments glaciaires superficiels, l'apport de sédiments au littoral est habituellement très limité.

Des sections considérables du bassin Minas et de la baie Chignecto sont caractérisées par des vasières intertidales (figure 62a), des battures de sable (figure 63) et des marais (figure 211) qui résultent de l'érosion locale d'affleurements de la roche en place non résistants et des dépôts glaciaires meubles. La côte du bassin Minas est longue de 320 km et présente sur 79 % de son périmètre des falaises d'alluvions ou de tills de grès, de basaltes instables, en cours d'érosion (Amos et Long, 1980). À certains endroits, l'érosion est rapide et les falaises reculent d'environ 2 à 3 m/a; certaines sections de la baie se sont élargies de 6 km depuis la déglaciation, il y a 14 000 ans BP (figure 212) (Amos et Long, 1980). Les taux de recul moyens des falaises varient de

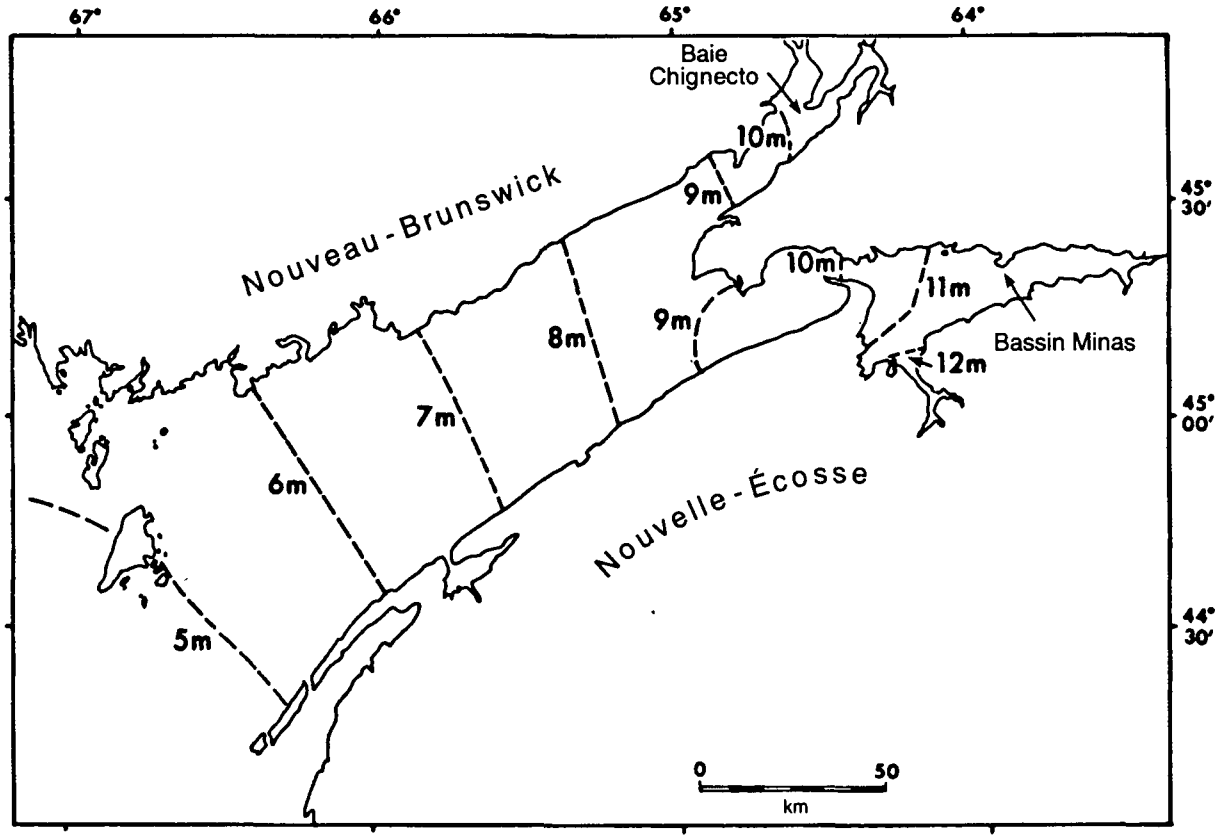


Figure 206 Marnage moyen dans la baie de Fundy

0,5 à 1,5 m/a; les produits de cette érosion sont essentiellement des sédiments de la taille du sable (58 %), suivis de l'argile et du silt (35 %) et enfin des fractions de sédiments grossiers (7 %) (Amos et Long, 1980). Dans la baie Chignecto et le bassin Minas, de vastes pans de plateforme d'abrasion sont précédés d'une plage dans la section supérieure de la zone intertidale, précédée à son tour de slikkes et de vastes champs de mégarides et de dunes sous-marines. Dans les secteurs abrités, notamment la baie Windsor, on observe de vastes et épais dépôts de slikkes. Les dunes sous-marines et les mégarides sont des formes dynamiques, constamment remaniées par les courants de flot et de jusant (Dalrymple *et al.*, 1975; Knight, 1980). Avant la colonisation, on comptait quelque 5 700 ha de marais naturels, mais l'endiguement et le drainage agricole sur une grande échelle ont réduit leur superficie à 5 210 ha (Thomas, 1983).

4.5.8 Île de Sable

L'île de Sable est la portion subaérienne d'un vaste banc de sable situé dans l'océan Atlantique à quelque 160 km au sud-est de la Nouvelle-Écosse. Ce banc mesure 45 m d'épaisseur, 20 km de largeur et 300 km de longueur. L'île, orientée d'ouest en est, a une forme arquée (figure 213) et elle est parsemée de dunes qui atteignent généralement 5 à 10 m de hauteur, mais qui, par endroits, dépassent 25 m. Les dimensions exactes de l'île varient en fonction de l'engraissement ou de l'érosion des flèches littorales aux deux extrémités; à l'heure actuelle, l'île mesure 41 km de longueur et sa largeur maximale est de 1,6 km. Cette île, située sur la bordure extérieure du plateau continental, est composée entièrement de sables meubles

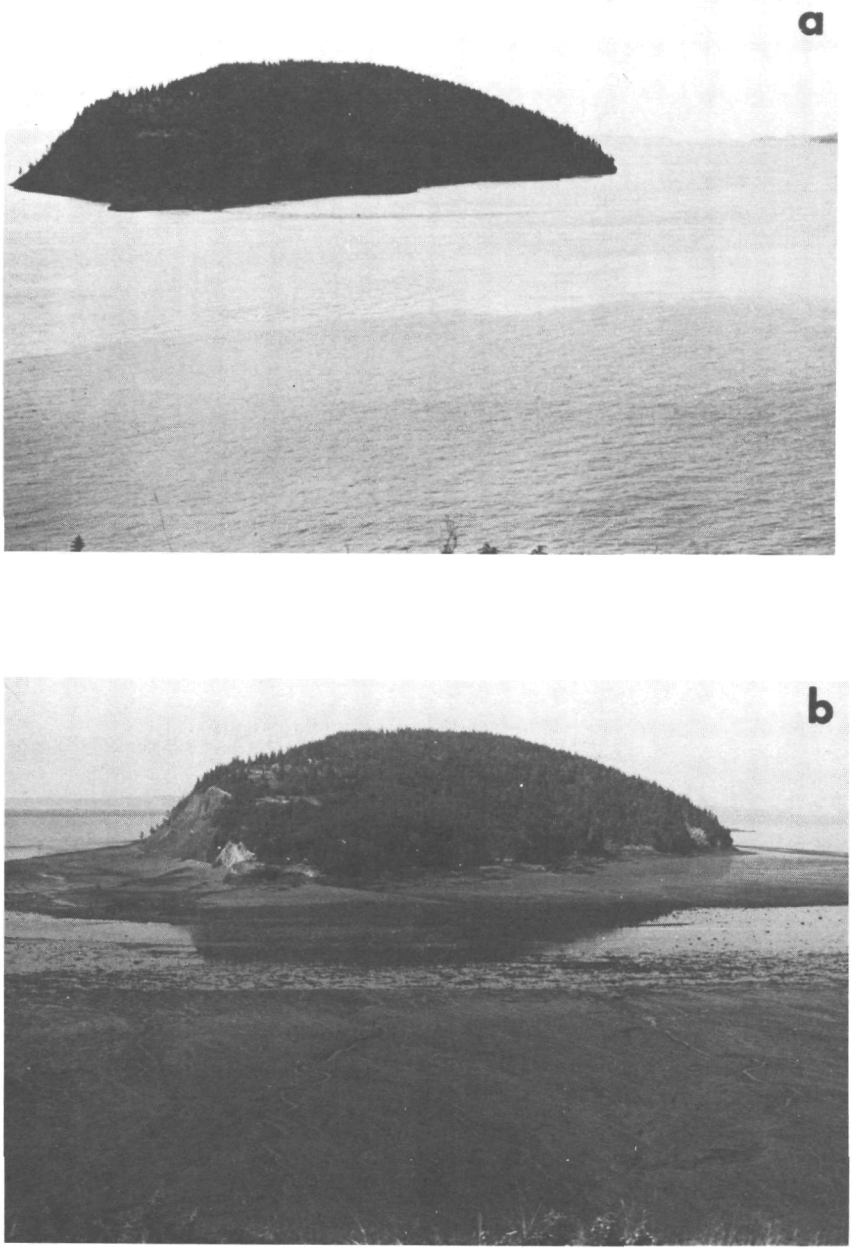


Figure 207 **Îles Five, Nouvelle-Écosse,** *a*) à marée haute et *b*) à marée basse (le marnage moyen est de 11,6 m et les slikkes étendues sont exposées à marée basse)

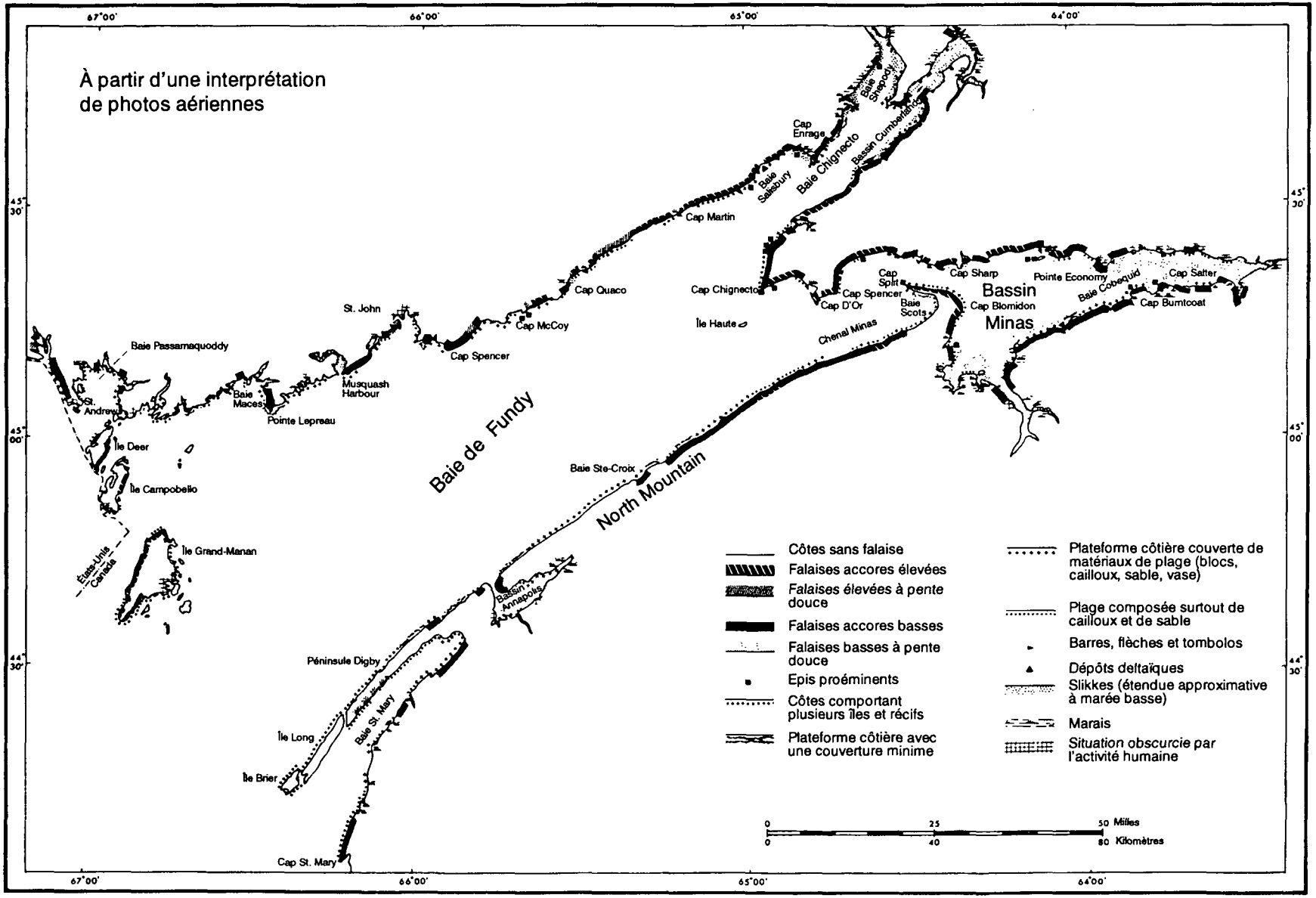


Figure 208 Géomorphologie côtière de la baie de Fundy (tiré de Welsted, 1974)

Figure 209 **Plateforme d'abrasion près de Margaretsville, côte sud de la baie de Fundy** (région comportant de nombreux affleurements rocheux, la zone intertidale étant couverte par endroits de sédiments grossiers)

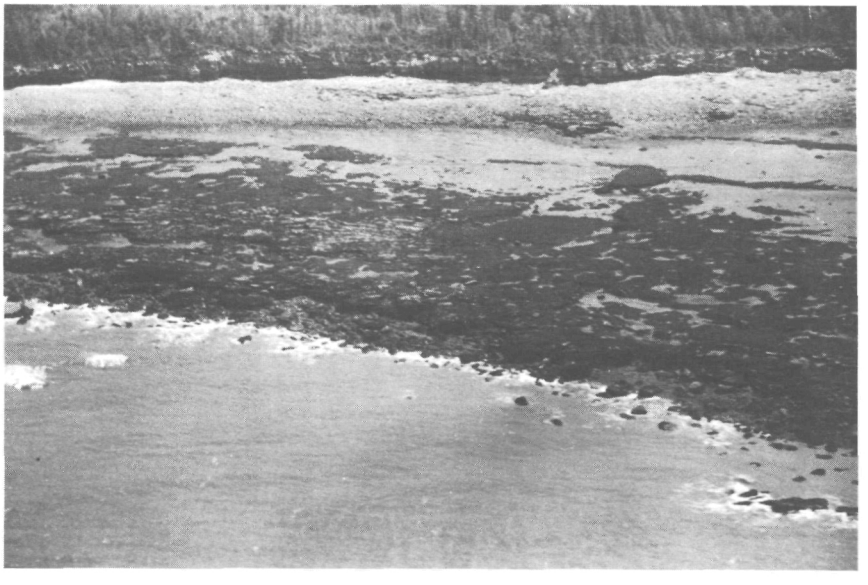


Figure 210 **Côte rocheuse avec plateforme d'abrasion et plage de galets et de cailloux à la base de falaises en recul, côte sud de la baie Chignecto, baie de Fundy**

Figure 211 **Vasières intertidales à mi-marée, côte nord, bassin Annapolis, baie de Fundy** (les wadden sont adossés à des marais qui ont été endigués et mis en valeur)

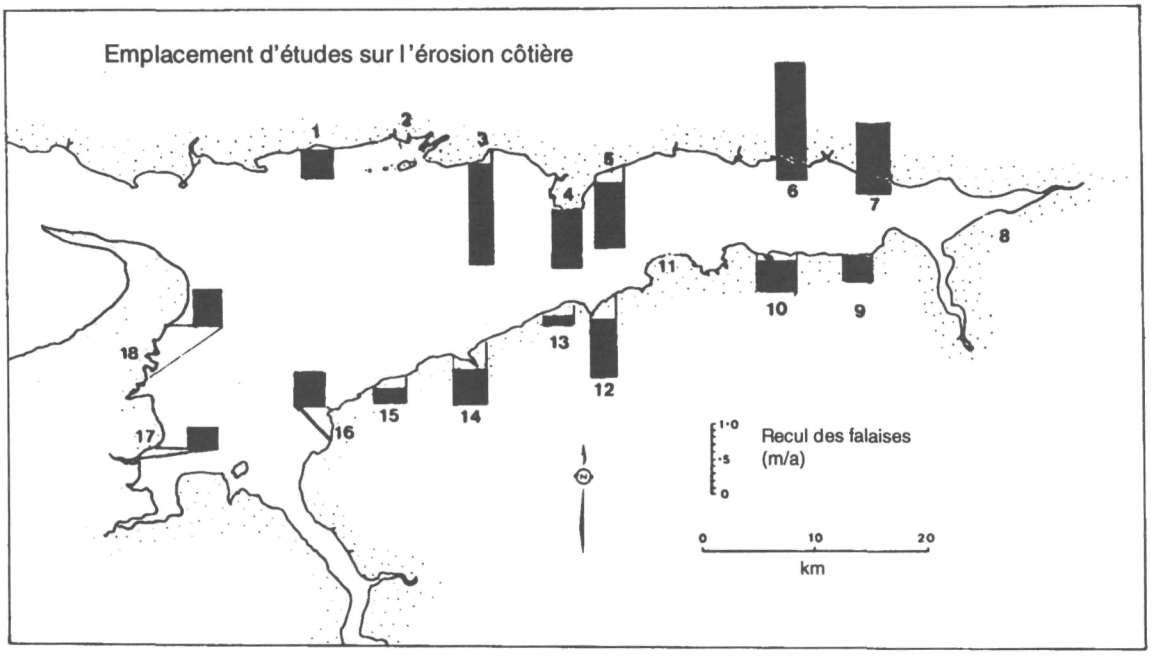


Figure 212 **Histogramme des taux de recul des falaises** (m/a)**, bassin Minas** (tiré d'Amos et Joice, 1977)

Figure 213 **Extrémité est de l'île de Sable** (les dunes sont remplacées par une basse plage de débordement près de l'extrémité est de l'île) (mars 1975)

remaniés sous l'action des vagues depuis les 7 000 dernières années de relèvement uniforme et continu du niveau relatif des mers. Ce relèvement est de l'ordre de 3 cm/siècle (Scott *et al.*, 1987).

Dans ce milieu assez peu influencé par les marées (marnage de 1,1 à 1,6 m), les vents présentent une variabilité saisonnière marquée avec de forts vents du nord-est en hiver et des vents plus faibles du sud-ouest en été (Owens et Bowen, 1977). Les variations saisonnières de la direction et de la vitesse des vents se reflètent dans les caractéristiques des vagues de surface dans cette région. Ainsi, les hauteurs de vagues en pleine mer dépassent 2,5 m 10 % du temps en été et 40 % du temps en hiver (James et Stanley, 1968).

L'île est caractérisée par deux chaînes de dunes qui courent parallèlement aux côtes nord et sud. La forme de l'île est soulignée par des cordons de sable littoraux (1 à 3) dont les caractéristiques varient des cordons parallèles au littoral et entrecoupés de dépressions aux cordons transversaux à topographie de rides (Taylor, 1989). Les dunes de la section sud-ouest sont détruites depuis les années 1850 et les régions intérieures de sable adjacentes (figure 214) sont inondées régulièrement au cours des tempêtes. D'après James et Stanley (1968), les plages connaîtraient une érosion en hiver et un transport de matériaux subséquent se produirait vers l'intérieur en été. Selon Cameron (1965), l'extrémité ouest de l'île s'était érodée de 14,5 km au cours des 200 dernières années, tandis que l'extrémité est avait gagné 17,7 km. Il apparaît donc, qu'à court terme, la taille de cette île ne diminue pas, mais que celle-ci migre lentement vers l'est sur le plateau peu profond (James et Stanley, 1968). Depuis 1975, la rive sud est en net recul, avec des variations à court terme de 35 à 48 m dans la largeur de la plage, à cause de la migration littorale des cordons sableux transversaux.

Figure 214 **Vue vers le sud à partir d'une section de l'est de l'île de Sable** (un grand chenal de débordement (flèche) traverse le champ dunaire de la rive nord)

4.6 Milieux côtiers des Grands Lacs

Les littoraux canadiens de ce réseau de vastes bassins lacustres ont été classés en neuf milieux côtiers (figure 215; tableau 38) selon la géologie et la nature des littoraux. Les processus qui s'exercent sur ces côtes sont relativement uniformes dans tout le réseau, qui est un milieu abrité, non soumis à la marée.

Les milieux côtiers des Grands Lacs inférieurs (sud du lac Huron-lac Sainte-Claire-lac Érié-lac Ontario) ont été relativement bien étudiés (p. ex., Boulden, 1975) avant que ne paraisse le premier rapport sur les milieux côtiers du Canada (Owens, 1977a). Un levé de reconnaissance à basse altitude du littoral réalisé en mai 1978 et couvrant une grande partie des côtes a permis de beaucoup mieux décrire la partie supérieure du bassin des Grands Lacs. Dans le rapport ultérieur (Owens, 1979a), la région des Grands Lacs a été divisée en 32 milieux côtiers, chacun étant décrit séparément. Depuis l'étude de 1977, seuls quelques auteurs (p. ex., Boyd, 1981a; Carter et Haras, 1985; Phillips, 1980; Reinders et assoc., 1988) ont contribué de façon importante à la base de connaissances. De nombreuses divisions de la présente sous-section demeurent donc relativement inchangées. Toutefois, on note de nombreuses contributions dans les domaines portant sur *a*) l'étude détaillée des processus (p. ex., Boyd, 1981b, 1986; Coakley, 1980; Davidson-Arnott et Askin, 1980; Davidson-Arnott et Pember, 1980; Parker et Quigley, 1980; Phillpott, 1986; Quigley et DiNardo, 1980; Zeman et Thompson, 1982) ou *b*) l'effet du niveau des eaux sur l'érosion littorale (Croley, 1986; Davidson-Arnott, 1986; Davidson-Arnott et Kreutzwiser, 1985; Kreutzwiser, 1987; Moulton et Cuthbert, 1987; Yee et Cuthbert, 1985, 1986; Stewart et Yee, 1987). Ces dernières études ont été entreprises en grande partie à cause de la montée du niveau des eaux dans les Grands Lacs.

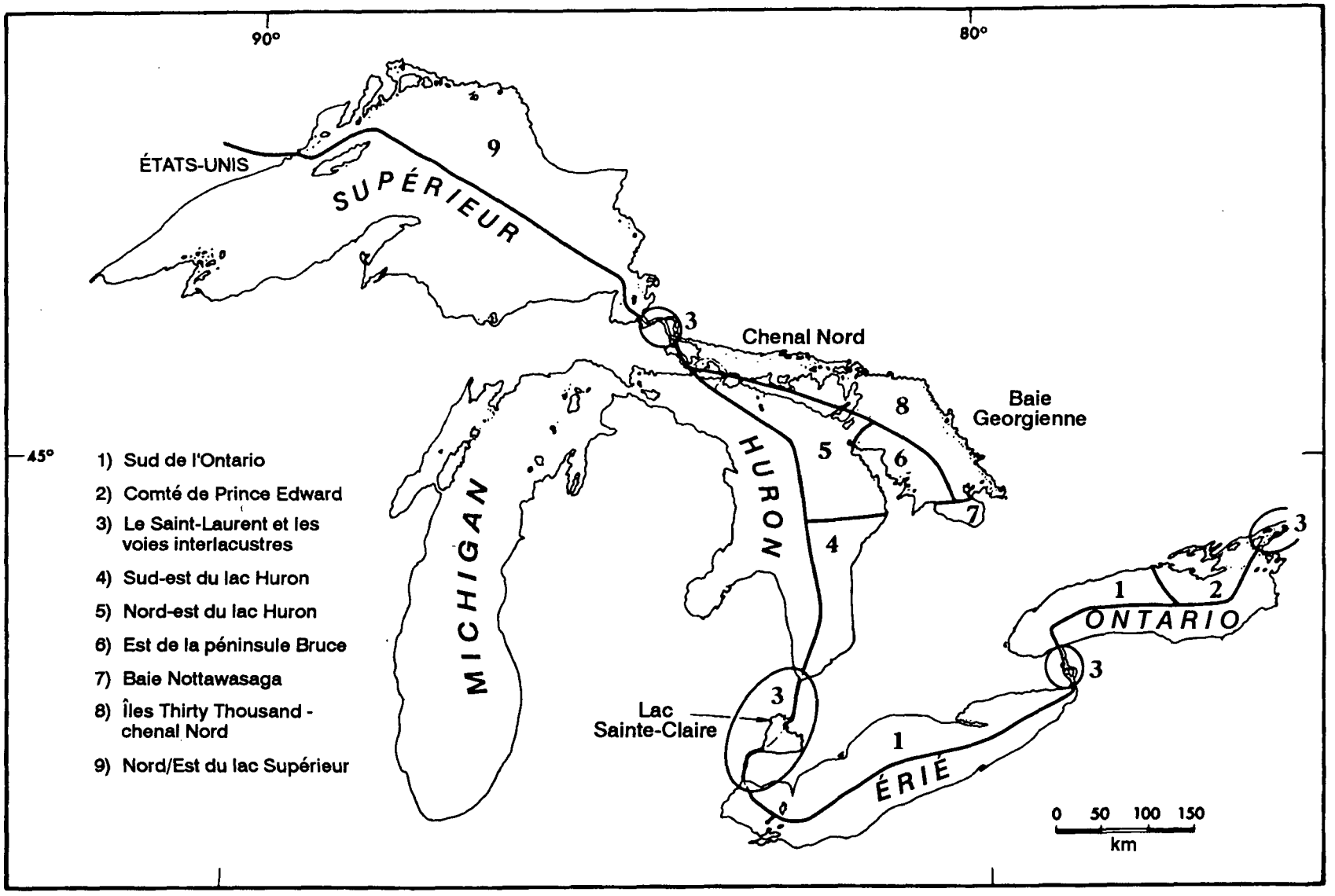


Figure 215 **Milieux côtiers des Grands Lacs** (*cf.* tableau 38)

Tableau 38 Caractéristiques des milieux côtiers des Grands Lacs

	Caractéristiques géologiques	Zone côtière		Fetch et exposition aux vagues	Disponibilité des sédiments
		Haute-plage	Plage		
1. Sud de l'Ontario	Roches sédimentaires recouvertes de dépôts étendus meubles de sable ou d'argile.	Falaises en cours de recul, 5-20 m en général, maximum 110 m.	Mixte (sable/galets) à la base des falaises; cinq importantes accumulations sableuses.	Maximum 400 km, exposé à l'est, abrité à l'ouest. Glace de lac de 3 à 4 mois.	Abondants.
2. Comté de Prince Edward	Calcaires relativement résistants, mince couverture de dépôts glaciaires, direction de la topographie S.-O./N.-E.	Falaises généralement 5-10 m, maximum 30 m.	Cinq cordons sableux de fond de baie dans l'ouest avec dunes; ailleurs, plages étroites ou sable/galets.	Sud et ouest exposé, jusqu'à 400 km, est, très abrité. Glace de lac de 3 à 4 mois.	Abondants dans l'ouest; ailleurs, très rares.
3. Le Saint-Laurent et les voies inter-lacustres	Surtout roches résistantes.	Généralement peu élevée.	Absentes ou plages riveraines de galets et de cailloux.	<50 km, très abrité, surtout milieu fluvial.	Très rares (sauf pour le delta de la rivière Sainte-Claire).
4. Sud-est du lac Huron	Roches sédimentaires recouvertes de dépôts meubles de sable ou d'argile.	Falaises en cours de recul, généralement peu élevées : 5-30 m.	Plages constituées de sédiments allant des sable aux blocs près des falaises; surtout du sable dans le sud.	Maximum 300 km (au nord-ouest). Hydrodynamisme moyen. Glace de 3 à 4 mois.	Abondants.
5. Nord-est du lac Huron	Dolomies résistantes, pendage vers le lac en pente douce.	Relief peu élevé, de nombreux récifs et îles.	Absentes ou petites plages abritées de galets et de cailloux.	Exposé au sud et à l'ouest, hydrodynamisme moyen.	Très rares.
6. Est de la péninsule Bruce	Escarpement de dolomies résistantes.	Relief élevé : falaises atteignant 100 m.	Absentes ou petites plages abritées.	Abrité.	Rares.
7. Baie Nottawasaga	Roches sédimentaires recouvertes de dépôts meubles de sable ou d'argile.	Relief généralement peu élevé.	Cordons sableux de fond de baie.	Exposé au nord-ouest; ailleurs, abrité.	Abondants par endroits.
8. Îles Thirty Thousand, chenal Nord	Roches résistantes du Bouclier sur la terre ferme, calcaires et dolomies résistants sur l'île Manitoulin.	Côte basse ou hautes-terres et falaises atteignant 50 m.	Absentes ou petites plages abritées, étroites.	<150 km, très abrité. Présence de glace sur le lac de 3 à 5 mois.	Très rares.
9. Rive nord du lac Supérieur	Roches résistantes du Bouclier.	Relief élevé, falaises atteignant 300 m.	Absentes ou petites plages abritées et étroites.	Jusqu'à 500 km, exposé. Glace présente sur le lac de 3 à 4 mois.	Très rares.

4.6.1 Aperçu des Grands Lacs

Le réseau des Grands Lacs constitue la plus vaste réserve d'eau douce au monde en superficie (245 000 km^2). Le Canada borde les rives nord des lacs Supérieur, Érié et Ontario et les rives est et nord du lac Huron; le lac Michigan se situe entièrement aux États-Unis. Le trait de côte des Grands Lacs canadiens totalise près de 10 000 km, dont à peu près la moitié correspond aux îles du réseau lacustre (tableau 21). Les lacs sont étagés en gradins : d'abord le lac Supérieur (184 m au-dessus du niveau moyen de la mer), puis le lac Huron (177 m), le lac Érié (174 m) et le lac Ontario (75 m) qui se déverse dans l'Atlantique nord par le fleuve Saint-Laurent (figure 216). Les processus s'exerçant sur les littoraux des Grands Lacs sont essentiellement les mêmes que ceux qui agissent sur les côtes océaniques. Les principales différences sont liées à l'absence de marées astronomiques et à la petite superficie des cuvettes. Il s'agit donc de milieux à hydrodynamisme faible.

Vents. Les vents dominants, dans la région des Grands Lacs, soufflent du quadrant ouest, c'est-à-dire du sud-ouest au nord-ouest. Ces vents sont associés à des dépressions qui se forment le long du front polaire entre l'air arctique froid au nord et la masse d'air continentale plus chaude du centre des États-Unis (*cf.* division 1.2.1). Les dépressions traversent la région d'ouest en est et s'intensifient en hiver, lorsque les différences de pression entre les deux masses d'air sont les plus grandes. Les vents sont donc plus forts en hiver. Localement, des brises de terre et de lac peuvent souffler toute l'année à cause des différences de température entre l'eau et la terre. En été, les brises soufflent vers les lacs, la nuit, et vers les terres, le jour. En hiver, les brises soufflent vers les lacs.

Vagues. Comme les fetches sont limités, les hauteurs de vagues sont généralement petites (<2 m) et les périodes courtes (<5 s). C'est le lac Supérieur qui possède les plus grands fetches (maximum 500 km). L'hydrodynamisme varie selon les saisons,

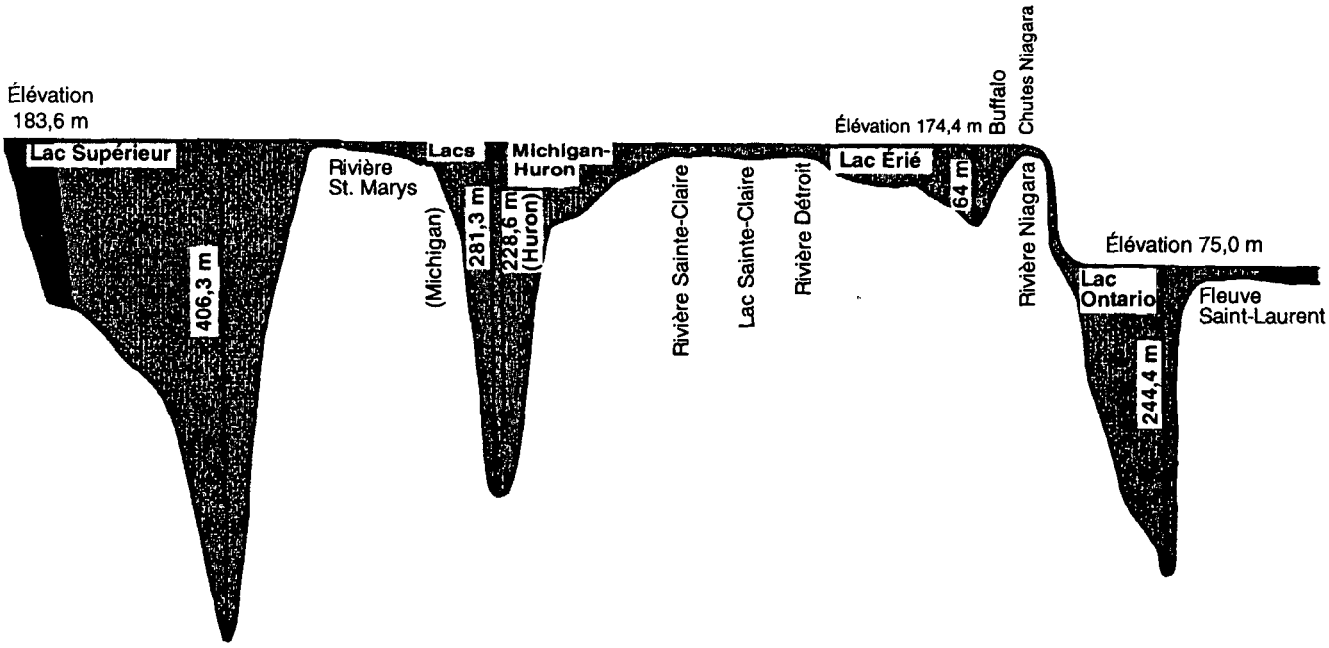


Figure 216 **Profil idéalisé des Grands Lacs représentant les dénivellations et les profondeurs relatives** (tiré de Ragotzkie, 1974)

la vitesse du vent étant maximale en hiver (figure 217). L'énergie qui s'exerce sur les littoraux varie beaucoup en puissance, selon l'orientation de la côte par rapport à la direction des vagues arrivantes. Par exemple, des vents violents du sud-ouest correspondraient à un hydrodynamisme faible sur les côtes du sud-ouest du lac Ontario et du lac Érié, mais à un hydrodynamisme relativement élevé sur les rives nord-est de ces lacs. Les vents dominants étant de l'ouest dans la région du lac Ontario, la hauteur de vague significative moyenne annuelle, de 0,4 m à Toronto, augmente à 0,8 m à l'île Main Duck, dans le nord-est du lac.

Glace. La présence de la glace limite la génération des vagues et leurs effets de novembre à avril (figure 218). Même si les lacs (à l'exception du lac Érié) ne gèlent pas complètement, la présence de glace sur le littoral ne permet pas la redistribution des sédiments par les vagues. En outre, il peut se former des crêtes de pression dans la zone littorale et les glaces peuvent être poussées sur les plages ou les hautes-plages. La glace persiste sur les plages (figure 219) en moyenne trois mois dans les régions du sud (lacs Érié et Ontario) à quatre mois (lac Supérieur et nord du lac Huron).

Niveaux des eaux. Les Grands Lacs ne sont pas soumis à la marée, mais les niveaux des eaux varient selon l'alimentation par leurs tributaires, l'apport en eaux souterraines, les précipitations, l'évaporation et l'écoulement des effluents, la régulation artificielle des débits d'entrée et de sortie et les effets des ondes de tempête. Le niveau de l'eau des lacs varie d'une année à l'autre, selon les variations de l'apport en eau et des pertes; ces fluctuations annuelles sont minimales dans les Grands Lacs supérieurs et maximales dans les sections inférieures du réseau (figure 220). Les niveaux d'eau ont

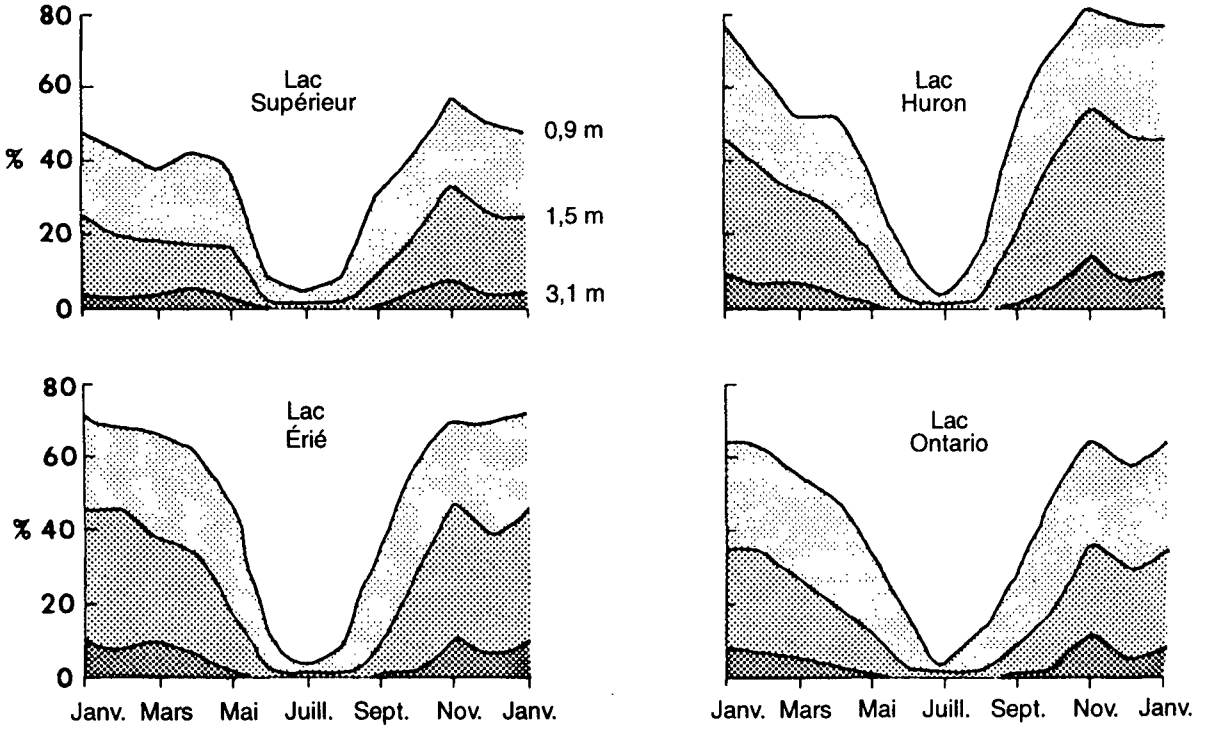


Figure 217 **Fréquence calculée des hauteurs d'ondes significatives pour chacun des lacs** (pour des fetches de 170 km) (Richards et Phillips, 1970)

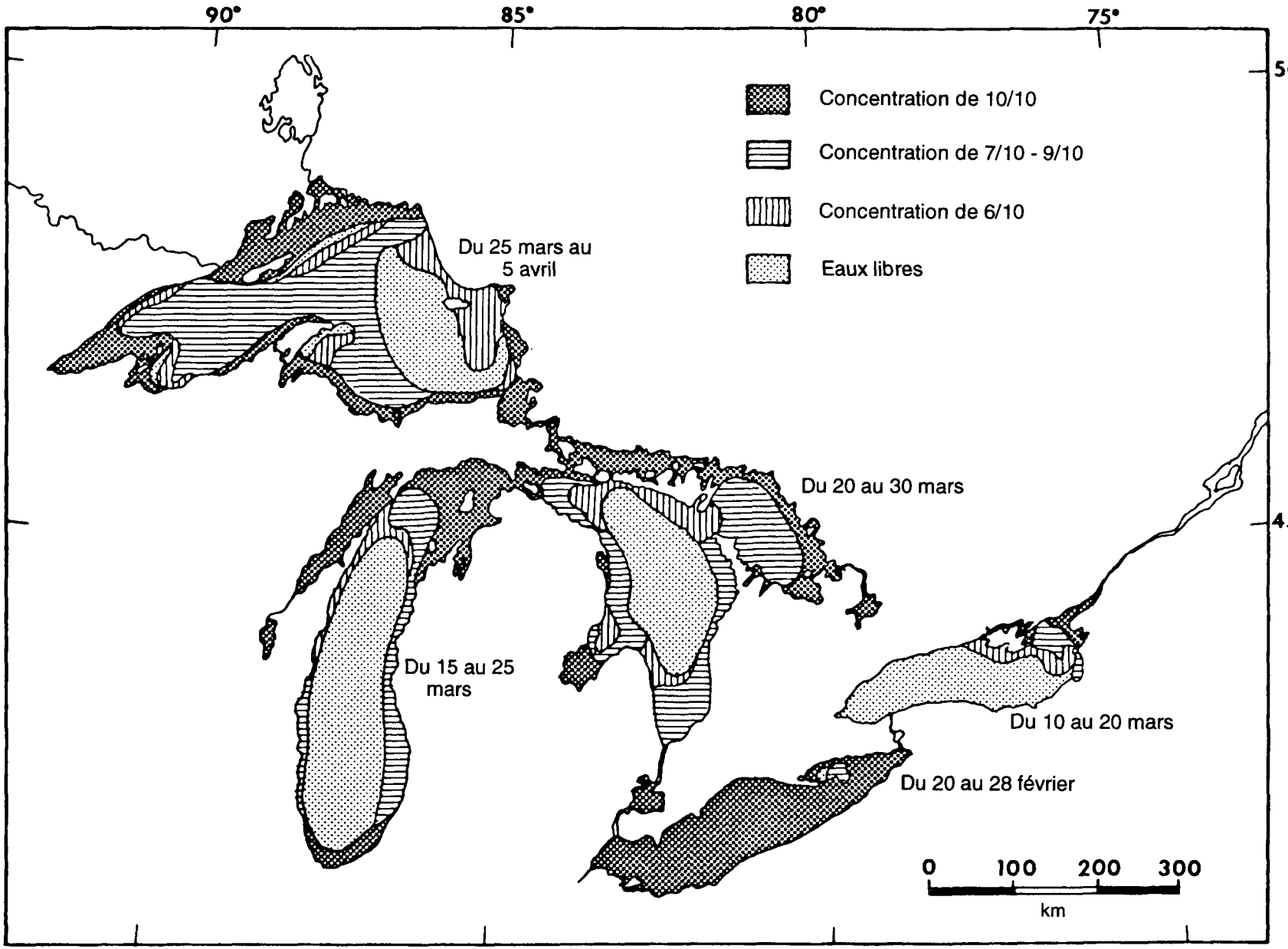


Figure 218 Limites maximales moyennes de la glace et dates de couverture maximale (Rondy, 1976)

Figure 219 **Pied de glace, rive sud du lac Ontario, près de Burlington** (janvier 1968) (le pied de glace mesure environ 1 m de hauteur et protège toute la zone littorale)

baissé régulièrement entre 1986 et 1990, mais ont monté à la suite de précipitations élevées dans les derniers mois de 1990 et les premiers de 1991. On a enregistré des fluctuations à long terme de ce genre atteignant 2 m. Dans le lac Ontario, par exemple, au cours des 70 dernières années, le niveau de l'eau est passé de 73,6 m (1934 à 1935) à 75,6 m (1952) (Great Lakes Basin Commission, 1975). Les variations saisonnières ou mensuelles dues à des facteurs hydrologiques sont d'environ 0,5 m à 0,6 m, bien qu'on ait enregistré une variation atteignant 1,24 m pour le lac Ontario. Le niveau des eaux est généralement maximal au début de l'été et minimal au début de l'hiver (Environnement Canada, 1975). Des précipitations liquides ou neigeuses exceptionnelles combinées à des températures inférieures à la moyenne peuvent entraîner une hausse du niveau des eaux supérieure à la variation saisonnière.

En hiver, la présence tardive de glace et les embâcles de glace dans les rivières qui relient les Grands Lacs peuvent avoir un effet sur le niveau des eaux en accroissant le frottement superficiel et rétrécissant les chenaux, diminuant donc les écoulements entre les lacs. La croissance d'algues en été peut avoir un effet semblable. Dans la rivière Niagara, le frottement causé par les algues réduit les écoulements de 3 % en moyenne (Environnement Canada, 1987).

Les variations à court terme (quotidiennes) sont fréquentes et s'expliquent par la pression barométrique, les ondes de tempête et les marées météorologiques. Par exemple, une tempête sur le lac Érié a fait monter les niveaux d'eau de plus de 1,5 m en décembre 1985 (figure 221). Les niveaux ont monté à l'extrémité est du lac (Port Colbourne et Port Dover) tout en s'abaissant à l'extrémité ouest (Bar Point et

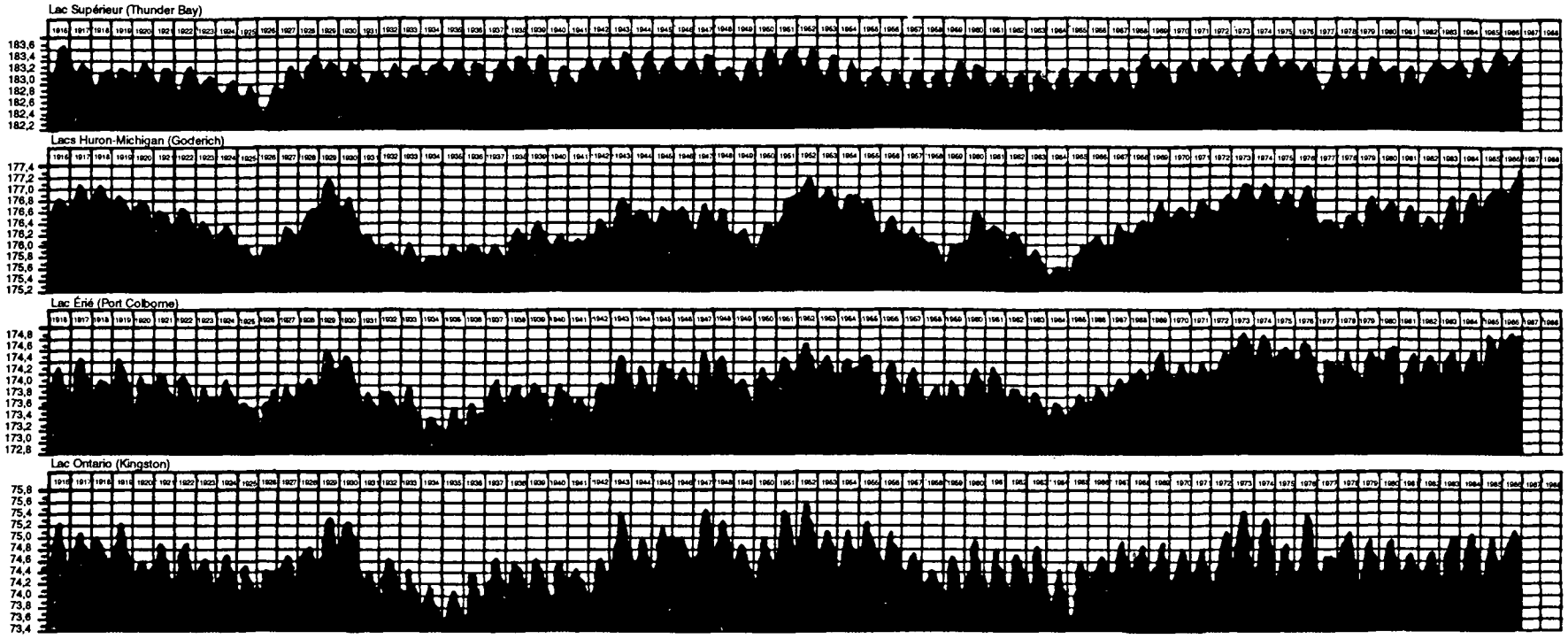


Figure 220 **Niveaux d'eau mensuels moyens** (mètres), **de 1916 à 1986** (Environnement Canada, 1987)

Kingsville). Dans le centre (Erieau et Port Stanley), les niveaux sont restés relativement stables. La figure 7 illustre une onde de tempête semblable qui s'est produite en février 1976 et qui a entraîné des dénivellations d'environ 3 m vers le haut et vers le bas, ainsi qu'un effet de seiche (oscillations du niveau) à Buffalo et Toledo.

Le niveau des lacs est aussi régularisé par l'humain. Par exemple, conformément à une ordonnance de la Commission mixte internationale, le niveau du lac Supérieur ne doit pas dépasser 183 m au-dessus du niveau de la mer. Le niveau est contrôlé par des vannes construites sur la rivière St. Mary's à Sault Ste. Marie depuis 1921. De même, le niveau du lac Ontario a été régularisé depuis l'achèvement d'un projet d'énergie hydroélectrique et de la voie maritime du Saint-Laurent en 1958. Durant la construction de la voie maritime, le fleuve Saint-Laurent a été élargi par dragage pour permettre un accroissement du débit sortant du lac Ontario. Le barrage hydroélectrique Moses-Saunders et d'autres ouvrages de régularisation servent à contrôler les débits sortants, prévenir les inondations et maintenir une profondeur adéquate pour la navigation le long du Saint-Laurent.

Le dragage effectué dans le réseau des rivières Sainte-Claire et Détroit, essentiellement pour la navigation, a au cours des ans fait baisser le niveau du lac Huron de 30 cm, selon certaines estimations. Les principales dérivations d'eau (entrée et sortie) du bassin des Grands Lacs à des fins de navigation, de production électrique, d'utilisations domestique et sanitaire contribuent à modifier à long terme

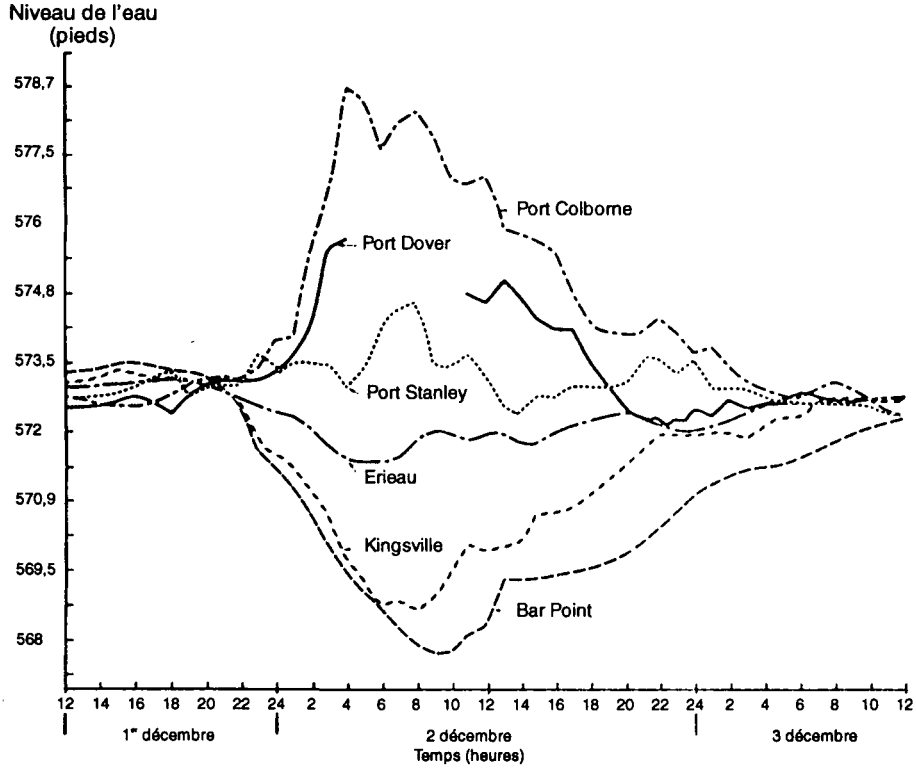


Figure 221 **Fluctuations du niveau des eaux du lac Érié durant la tempête du 2 décembre 1985** (Environnement Canada, 1987)

les niveaux d'eau. La consommation pour l'irrigation, les industries et les résidences totalise plus de 140 m^3/s pour tous les Grands Lacs et augmentera rapidement à l'avenir (Environnement Canada, 1987).

Géologie. Les Grands Lacs ont été creusés par l'affouillement des inlandsis le long de vallées fluviales préexistantes au cours des avancées et des reculs des glaciers pléistocènes. Les lacs ont commencé à se former aux marges des glaciers en recul, il y a environ 15 000 ans; ils ont la même forme depuis 2 000 ans (Hough, 1968). Les lacs sont situés sur la limite sud des roches résistantes exposées du Bouclier canadien. Les roches du Bouclier affleurent dans la région de Sault Ste. Marie et à l'extrémité est du lac Ontario et servent de barrage naturel pour endiguer les lacs Supérieur et Ontario (figure 222). Au sud des affleurements du Bouclier, les roches sédimentaires ont la forme d'une large cuvette (le bassin Michigan) (figure 223). Les lacs Michigan, Huron et Érié occupent ce bassin et sont à peu près au même niveau (figure 223), les deux derniers étant reliés par le lac Sainte-Claire et les rivières Sainte-Claire et Détroit, creusés dans des grès et des schistes argileux assez peu résistants. L'escarpement du Niagara, un affleurement de calcaire résistant, barre le lac Érié (figure 222) et les chutes de la rivière Niagara reculent vers le bassin de l'Érié au rythme d'environ 2 m/a. Depuis la rivière Niagara, l'escarpement continue vers l'ouest, puis monte vers le nord en traversant la péninsule Bruce et l'île Manitoulin, issues de l'érosion de roches moins résistantes au contact de l'escarpement.

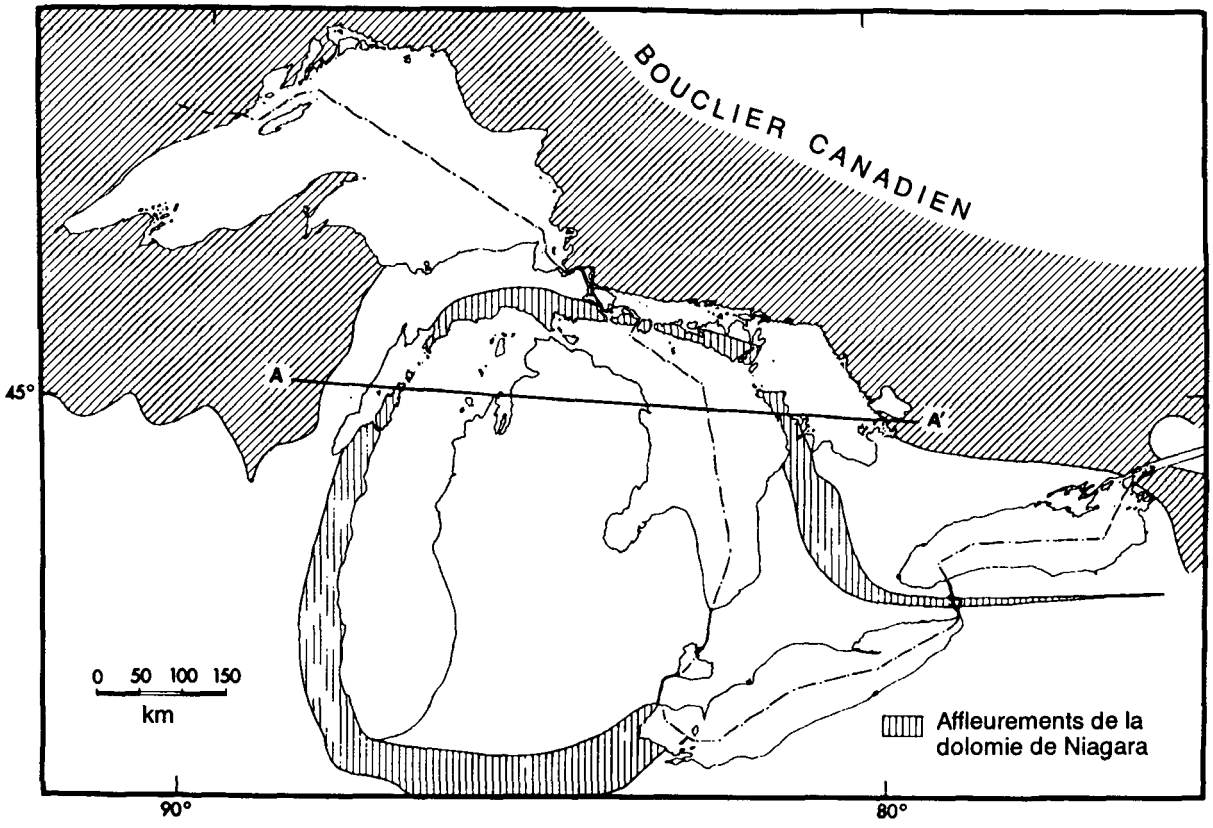


Figure 222 **Géologie simplifiée de la région des Grands Lacs représentant la distribution des roches du Bouclier canadien et les affleurements de dolomie de Niagara**
(la coupe transversale A-A′ est illustrée à la figure 223)

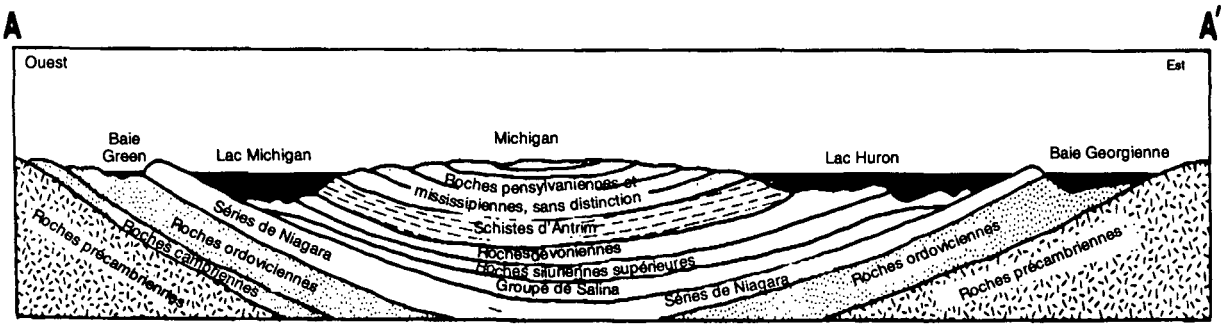


Figure 223 **Coupe transversale du bassin du Michigan** [l'escarpement formé par les séries de Niagara (dolomie) sépare la baie Georgienne du lac Huron et la baie Green du lac Michigan] (Pincus, 1962)

La majorité des rives des Grands Lacs ont un relief peu élevé, le maximum étant de 680 m, près de la côte nord-ouest du lac Supérieur. Au sud du Bouclier canadien, la glace a déposé des volumes considérables de sédiments qui, dans la plupart des régions, recouvrent les affleurements de la roche en place. Ces graviers, sables et argiles meubles sont facilement érodés et forment une grande partie des littoraux du sud du lac Huron et des lacs Érié et Ontario.

Géomorphologie côtière. Les Grands Lacs sont généralement bordés de rochers ou de falaises. Toutes les côtes sont assez peu battues par les vagues, à cause des petits fetches et parce que la glace limite beaucoup l'effet des vagues trois à cinq mois par année. Le relief est généralement bas (<20 m) et, dans les lacs Érié et Ontario et le sud-est du lac Huron, le trait de côte est relativement linéaire, les falaises étant découpées dans des dépôts glaciaires meubles. L'importance de l'érosion dans ces régions explique l'apport de matériaux à la côte, lesquels servent à la formation de plages développées, notamment sur les rives nord des lacs Érié et Ontario (figure 224). Ailleurs, l'apport en sédiments à la côte est très limité vu la nature résistante des affleurements. Les côtes rocheuses sont fréquemment très irrégulières et comportent de nombreux promontoires, baies et îles.

Même s'il n'y a pas de marée dans les lacs, les variations des niveaux des eaux provoquées par des facteurs annuels, saisonniers et météorologiques peuvent atteindre 4 m. Des niveaux d'eau élevés peuvent avoir un effet marqué dans la zone littorale, notamment en ce qui a trait à l'érosion des falaises meubles et aux processus d'érosion et d'ennoyage des plages. Des efforts considérables ont été déployés pour stabiliser les rives peu résistantes au moyen de toute une gamme de méthodes de protection (tableau 39). Dans la plupart des régions, la protection du rivage visait la prévention de l'érosion, mais dans le lac Sainte-Claire et sur l'île Pelée, dans l'ouest du lac Érié, on a plutôt installé des digues pour empêcher l'inondation de la haute-plage.

4.6.2 Sud de l'Ontario

Cette longue section de côte, qui comprend tout le lac Érié et la plus grande partie du lac Ontario, constitue un seul milieu dont la géomorphologie côtière est relativement constante. Une description plus détaillée, selon laquelle cette unité est divisée en 11 régions a été proposée par Owens (1979a). La roche en place de ces basses-terres planes est recouverte de vastes dépôts glaciaires de sable et d'argile. La principale forme de relief est l'escarpement du Niagara qui s'étend d'ouest en est entre

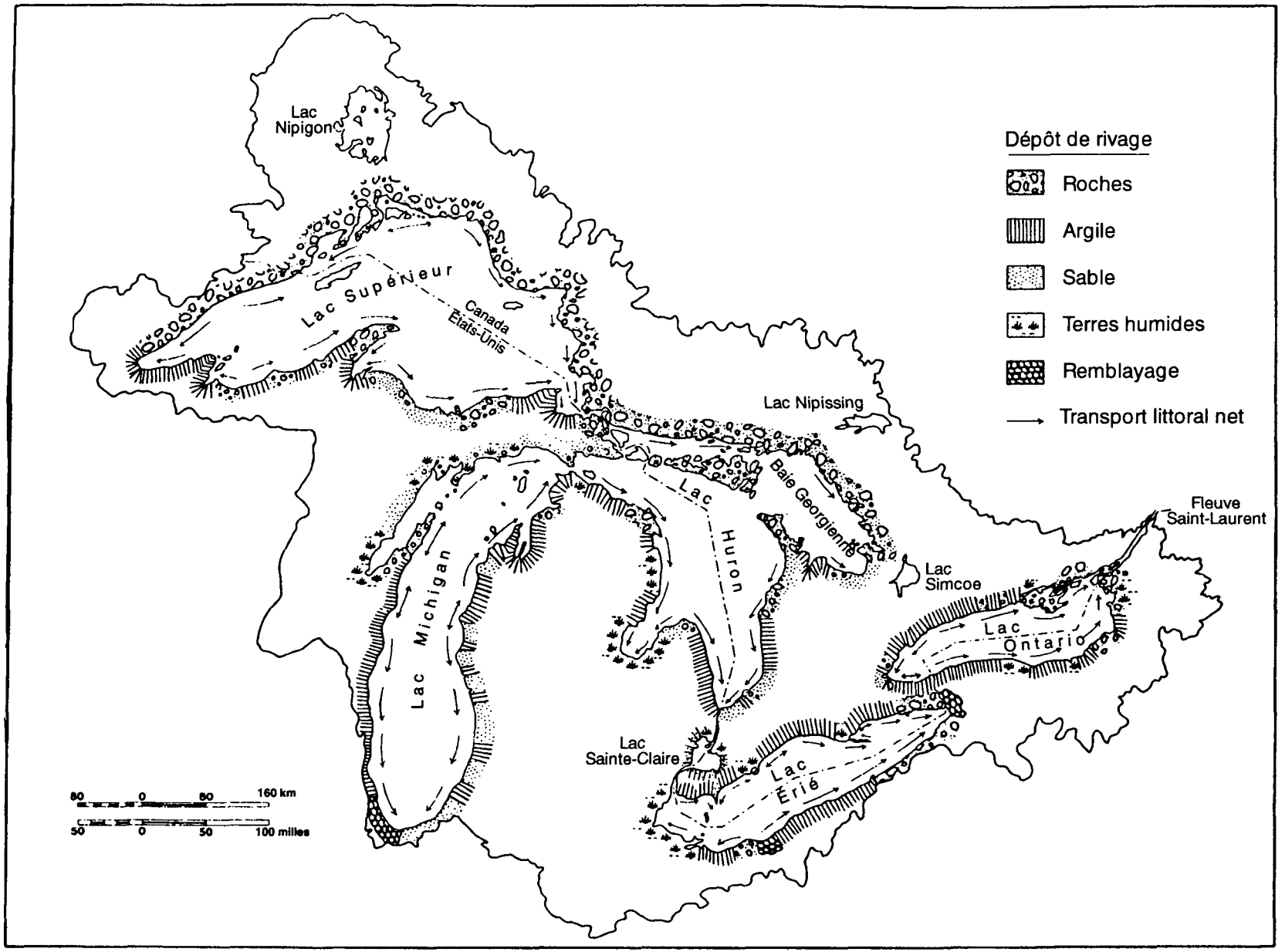


Figure 224 **Le bassin des Grands Lacs** (montrant la bordure du bassin hydrographique, les lacs, les dépôts de rivage et les directions du transport littoral net) (Carter et Haras, 1985)

Tableau 39 Protection des rives des Grands Lacs (d'après Boyd, 1981a)

	Pourcentage du rivage protégé	Principal type de protection (%)			
		Remblais, pierres de revêtement	Ouvrages à la mer	Épis	Digues
Huron	15	7	7	63	-
Sainte-Claire	83	30	34	-	27
Érié	21	40	24	6	-
Ontario	30	48	24	-	2

les deux lacs (figure 223). Les calcaires relativement résistants de cet escarpement forment une étroite ceinture de hautes-terres qui endigue les eaux du lac Érié et court parallèlement à la rive sud du lac Ontario. Ailleurs, le relief est bas et le tracé du littoral s'explique par la présence de deux vastes cuvettes allongées, avec une orientation nord-est-sud-ouest, qui ont été creusées par les inlandsis pléistocènes. Le lac Érié est très peu profond, avec une profondeur moyenne de 20 m et des profondeurs maximales de 64 m dans la section nord-est du lac (figure 216). Le lac Ontario a plutôt une forme de fosse, la portion la plus profonde (244 m) se trouvant le long d'un axe parallèle à la rive sud (Hough, 1968); en outre, la zone des plages sous-marines est plus étroite que dans le cas du lac Érié (Rukavina, 1976).

Les vents dominants sont de l'ouest et soufflent dans l'axe des lacs, de telle sorte que les fetches maximaux (400 km) coïncident avec les vents dominants. L'hydrodynamisme augmente d'ouest en est pour les deux lacs. Les hauteurs d'ondes significatives sont supérieures en hiver; durant la période libre de glace, on peut s'attendre à des hauteurs de vagues supérieures à 1 m la moitié du temps. Les hauteurs de vagues significatives maximales sont d'environ 9 m pour le lac Ontario en mars (probabilité de 0,04 %, une fois en 7 ans) et de 8 m pour le lac Érié en novembre (probabilité de 0,15 %, une fois en 2 ans) (Richards et Phillips, 1970). Les périodes d'ondes maximales sont d'environ 6 à 7 s pour le lac Ontario (Brebner et LeMehaute, 1961). Les vagues sont les plus hautes entre novembre et avril et minimales entre juin et août. La glace limite beaucoup l'action des vagues entre la mi-décembre et la mi-avril. Le lac Érié gèle la plupart des hivers, mais le lac Ontario, plus profond et comportant donc un plus grand volume d'eau et par conséquent plus de chaleur emmagasinée, n'a gelé que deux fois depuis les 100 dernières années. D'habitude, la glace recouvre au plus environ 15 % du lac Ontario.

Le niveau des eaux du lac Érié connaît des fluctuations saisonnières d'environ 0,5 m (Clemens, 1976). Des niveaux maximaux record associés à des précipitations élevées (Moulton et Cuthbert, 1987) ont été établis en 1973-1974 et entre 1985 et 1987 (figure 220). Par exemple, en décembre 1987, le niveau moyen mensuel de

l'eau à Port Colborne dépassait de 0,35 m la moyenne de toutes les années antérieures (SHC, 1987). Les niveaux du lac Ontario ont fluctué de 1,95 m, selon des tendances saisonnières semblables. Les niveaux élevés enregistrés en 1973-1974 ainsi qu'entre 1985 et 1987 n'ont pas été aussi marqués dans le lac Ontario et se situaient sous les niveaux record établis en 1952 (figure 220) (SHC, 1987). Pour les deux lacs, les niveaux sont à leur minimum en janvier-février et à leur maximum en juin (Croley, 1986).

L'action du vent sur la montée et la baisse du niveau des eaux se fait beaucoup sentir dans les deux lacs, surtout dans le lac Érié où ont été enregistrées des différences de hauteur de plus de 2 m d'une extrémité à l'autre du lac (Clemens, 1976; Kreutzweiser, 1987) (figures 7 et 221). Dans de nombreuses sections basses, une montée du niveau entraîne souvent l'inondation des hautes-plages (Boulden, 1975). Dans les cas où des perturbations et des montées de niveau dues au vent coïncident avec des niveaux déjà élevés, l'érosion et l'inondation peuvent s'accroître, comme cela s'est produit lors de la tempête du 2 décembre 1985 sur le lac Érié (figure 221).

Ce milieu est caractérisé par la prédominance de basses falaises côtières de sable et d'argile meubles en cours de recul (figures 225 et 226). On trouve les falaises les plus hautes (110 m) à Scarborough, juste à l'est du port de Toronto dans le lac Ontario; on y a enregistré des vitesses de recul atteignant 3 m/a, même si la moyenne est inférieure à 0,3 m/a pour cette section (Matyas *et al.*, 1974). En général, les hauteurs de falaises vont de 5 à 50 m (figure 227) et les vitesses d'érosion varient dans le temps et l'espace selon l'exposition aux vagues, le niveau des eaux, la hauteur des falaises et la nature du matériau (Environnement Canada et ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 1973). Les falaises du lac Ontario reculeraient en moyenne de 0,43 m/a (Davidson-Arnott et Askin, 1980). Malgré les taux d'érosion élevés et l'abondance des sédiments apportés au littoral, peu de plages se sont formées puisque la capacité nette de transport de sédiments au littoral excède généralement l'apport de sable (figure 228) (Skafel, 1978; Davidson-Arnott, 1986). Par exemple, sur une des sections de la rive sud du lac Ontario, près de Grimsby, la vitesse moyenne de recul est d'environ 1,0 m/a (figure 229), mais la plage fait moins de 10 m de largeur et consiste en un placage de sable et de gravier de moins de 30 cm d'épaisseur (Davidson-Arnott, 1986).

Dans l'extrême nord-est du lac Érié, les affleurements de la roche en place de la zone littorale (figure 230) forment une série de promontoires séparés par des plages de sable (figure 231), qui viennent interrompre le trait de côte généralement rectiligne (Rukavina et St-Jacques, 1971). À l'extrémité ouest du lac, le relief est très bas et de nombreuses sections du littoral sont sujettes aux inondations dès que les niveaux d'eau sont élevés (figure 232). Une grande partie de l'île Pelée est située sous le niveau de l'eau du lac en période de hautes eaux; elle est heureusement protégée par des digues (Alexander et Knowles, 1985). À la fin du 19e siècle, de vastes zones ont été drainées et ainsi mises en valeur. Ces ouvrages sont demeurés relativement stables jusqu'en 1973, mais au cours de la décennie suivante, les niveaux d'eau ont dépassé d'environ 0,5 m la moyenne, entraînant le recul de nombreuses sections au rythme d'environ 1 m/a, notamment sur la rive face à l'est (Alexander et Knowles, 1985).

Par suite de l'érosion des falaises et du transport littoral des sédiments, plusieurs larges formes d'accumulation sont apparues.

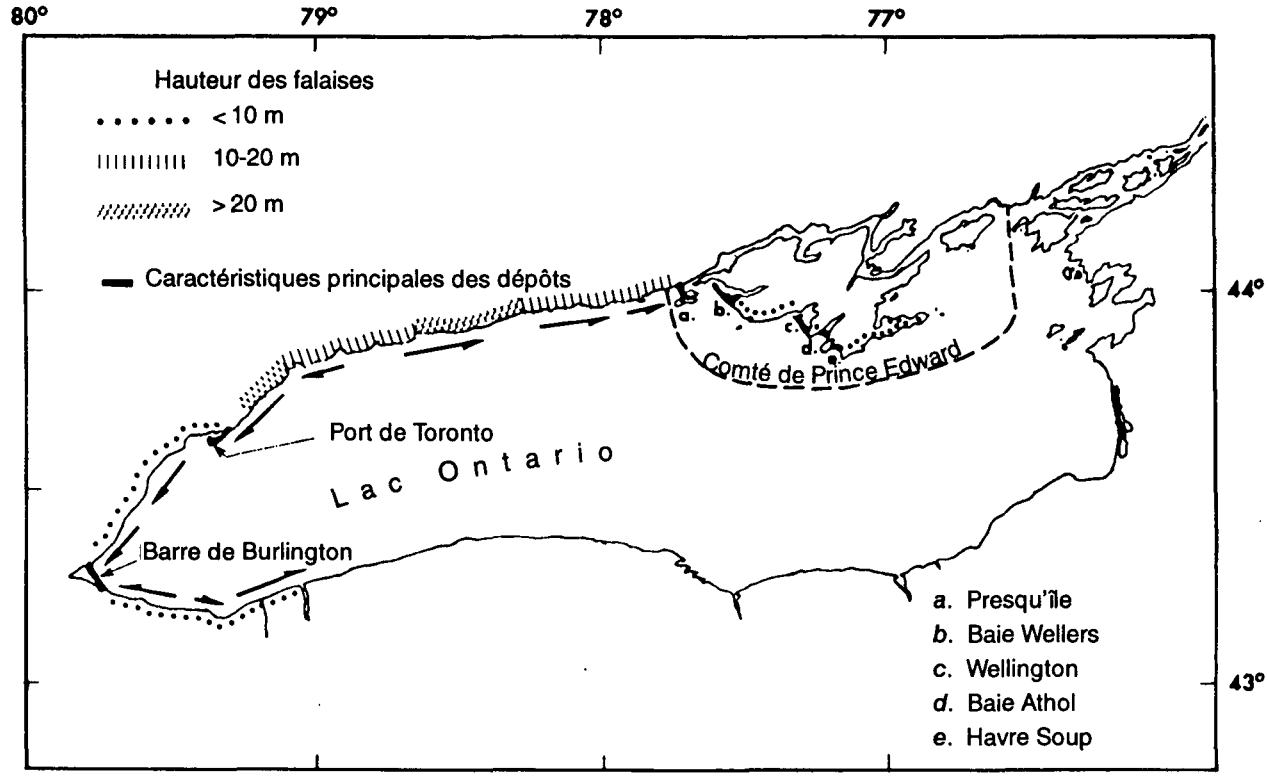


Figure 225 **Lac Ontario : falaises, directions du transport des sédiments et caractéristiques des dépôts**

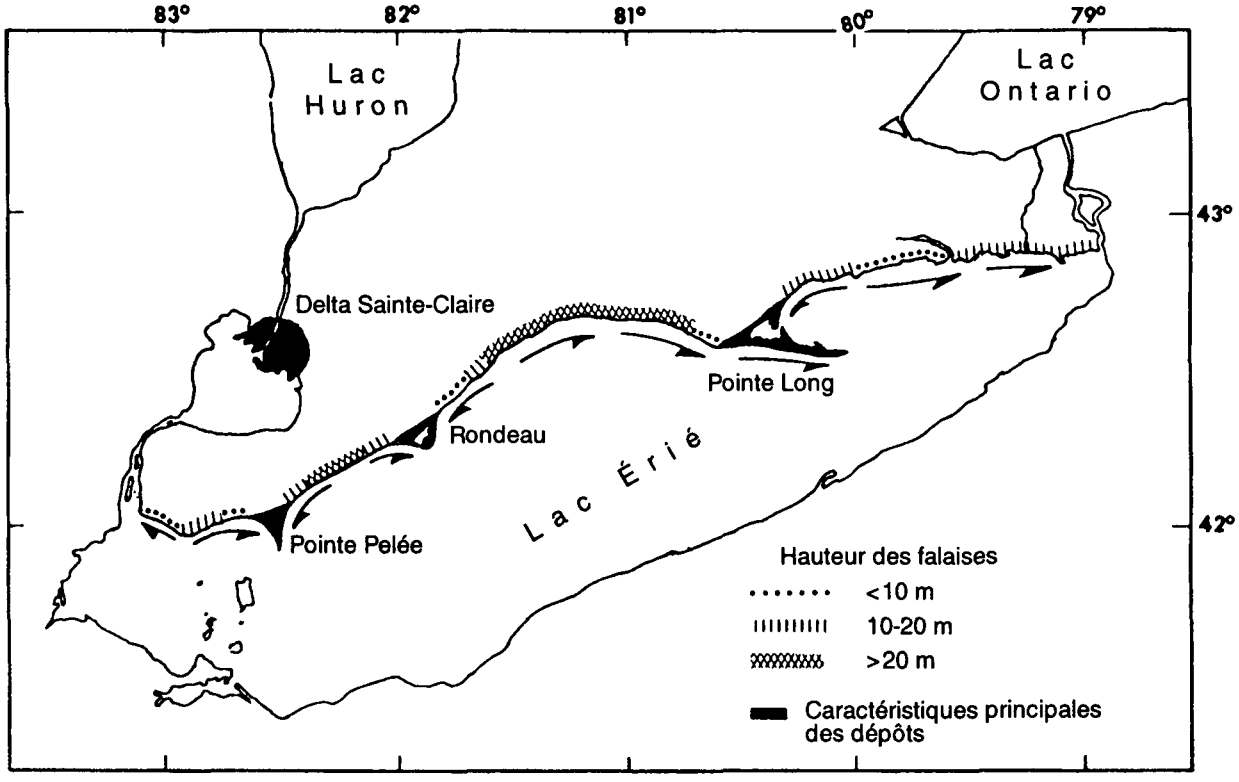


Figure 226 **Lac Érié : falaises, directions du transport des sédiments et caractéristiques des dépôts**

Figure 227 **Falaises au cap Bond près de Newcastle, rive nord du lac Ontario** (mai 1987) (les vitesses de recul sont de 0,5 m/a)

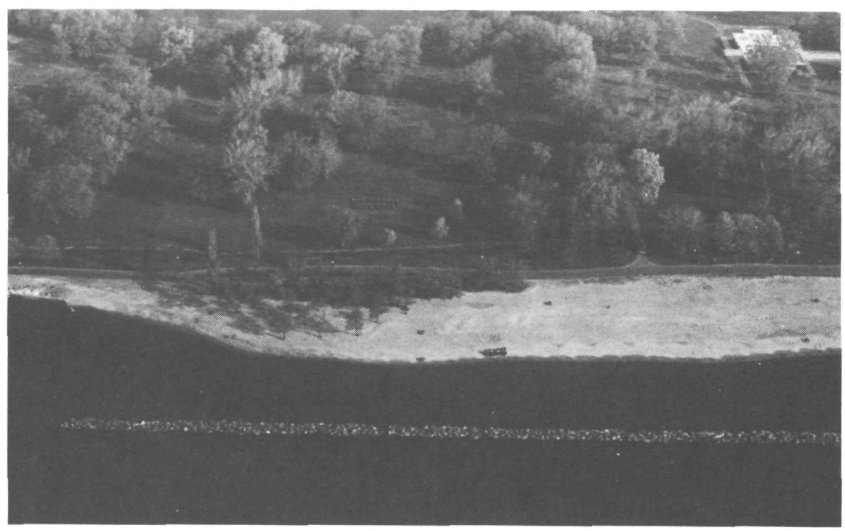


Figure 228 **Plage sablonneuse protégée par un brise-lames côtier, côte sud de la flèche du port de Toronto** (mai 1978) (la section protégée de la plage est large comparée à la partie non protégée, à gauche)

Le long des côtes nord-est, les sédiments sont transportés vers l'est (Rukavina, 1976). Dans le lac Ontario (figure 225), ce processus a donné lieu à la formation de plages du fond des baies de la région du comté Prince Edward (*cf.* division 4.6.3). Dans le lac Érié (figure 226), la pointe Long, qui mesure 40 km, progresse vers l'est au rythme de 7 m/a et porte des dunes qui atteignent 10 m de hauteur (Wood, 1960; St-Jacques et Rukavina, 1973).

Dans l'ouest du lac Ontario, les sédiments érodés sur les falaises de Scarborough sont transportés en direction du sud-ouest vers la flèche qui entoure le port de Toronto. Peu de matériaux dépassent l'extrémité de ce système de flèches (Coakley, 1970), mais à

Figure 229 **Falaise de till (silt-argile) à l'ouest de Grimsby, rive sud du lac Ontario** (mai 1978) (noter les rebuts de construction servant de matériaux de protection contre l'érosion; dans cette section, le littoral recule d'environ 1 m/a)

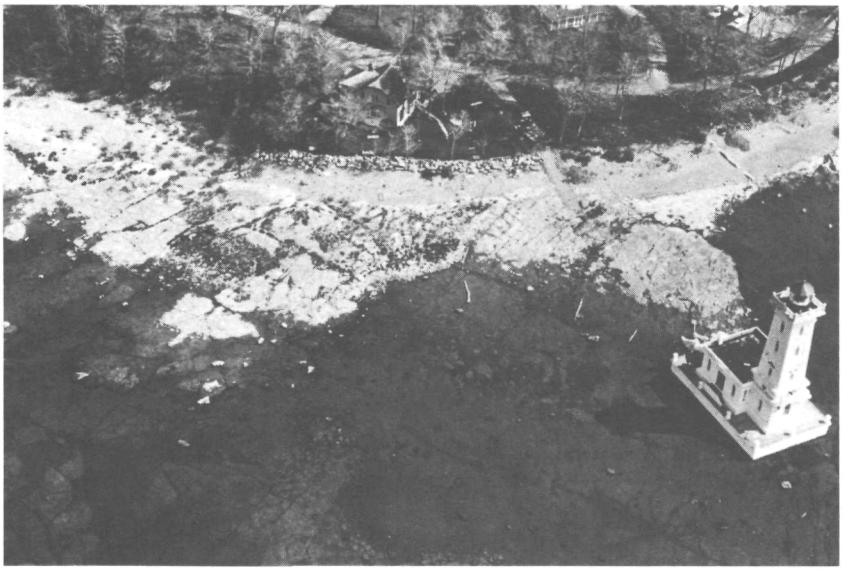


Figure 230 **Plateforme rocheuse précédant un promontoire avec haute-plage de galets et de cailloux, pointe Abino, nord-est du lac Érié** (mai 1978)

l'extrémité sud-ouest du lac, une quantité suffisante de matériaux s'est accumulée par suite du transport littoral le long des rives nord et sud de sorte qu'un vaste cordon s'est formé en travers du port de Hamilton (figure 233) et est venu fermer une importante partie de la baie (Rukavina, 1969). Dans la partie sud-ouest, abritée, du lac Ontario, les sédiments de plage sont rares et les matériaux déversés dans la zone littorale par l'érosion des falaises s'accumulent souvent sur place puisque les courants engendrés par les vagues ne sont pas assez forts pour les transporter (Rukavina, 1969). Dans cette région, on a déterminé que les basses falaises de till (2 à 4 m) reculaient d'environ 1 m/a ou plus (Davidson-Arnott et Amin, 1983).

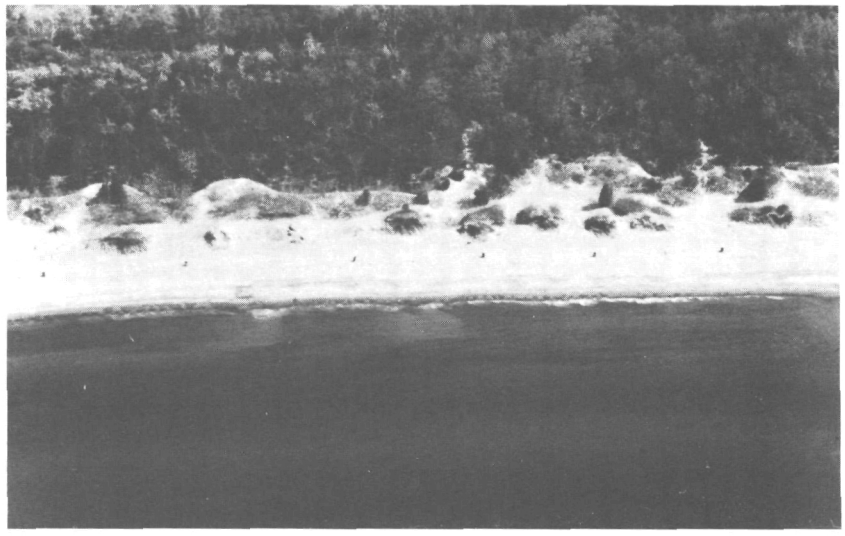


Figure 231 **Large plage de sable prolongée par de basses dunes, côte ouest de la pointe Abino, nord-est du lac Érié** (mai 1978)

Figure 232 **Île-barrière basse, isolant une lagune et des marais; parc provincial Holiday Beach, ruisseau Big, sud-ouest du lac Érié** (photo de N. Rukavina, mai 1978)

Dans l'extrême ouest du lac Érié, abrité des vents d'ouest, les sédiments sont aussi poussés surtout vers le sud-ouest le long de la rive nord. Ainsi, la pointe Pelée (figure 234) migre lentement vers l'ouest à cause de l'hydrodynamisme plus marqué sur la rive face à l'est (Coakley, 1976). Au contraire, Rondeau est plus exposé aux vagues venant de l'ouest et, tout comme la pointe Long, migre vers le nord-est (Owens, 1979a). La vitesse de migration relativement rapide de la pointe Long (7 à 8 m/a en direction de l'est : Wood, 1960) est attribuable à la disponibilité de sédiments érodés et à la forte énergie des vagues du sud-ouest, engendrées le long de l'axe du lac. Ces trois importantes formes d'accumulation qui se trouvent sur la rive

La terrasse est 2 m au-dessus du niveau de l'eau.

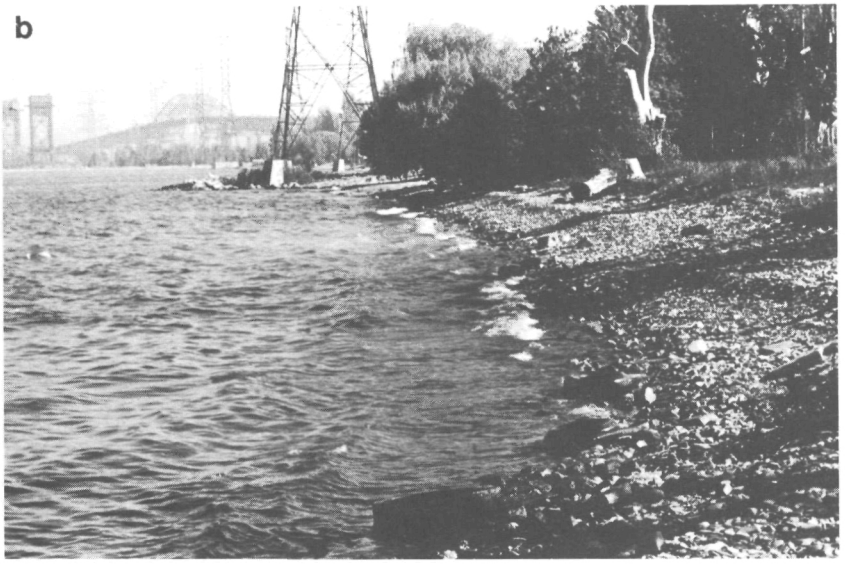
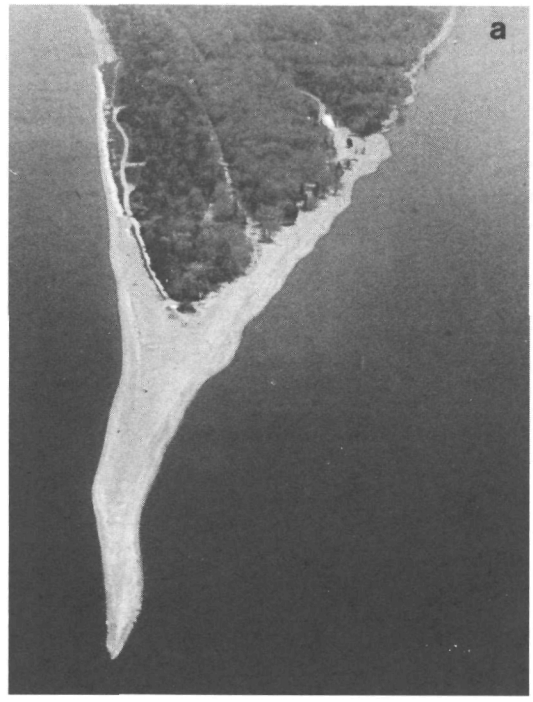
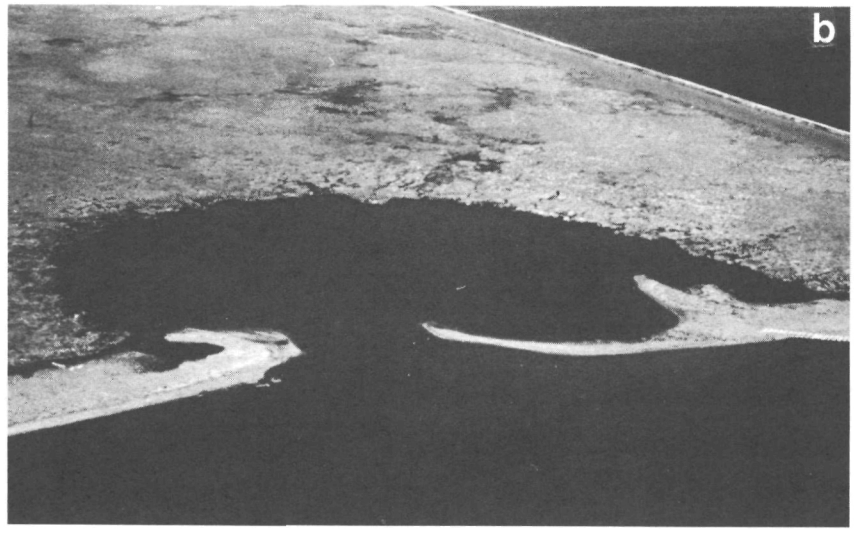


Figure 233 **Barre de Burlington, sud-ouest du lac Ontario** (mai 1978), *a*) large plage sablonneuse située au sud de l'entrée du port et *b*) étroite plage de galets et de cailloux dans la section la plus au nord



a) **Vue de la pointe sud au nord** (photo de N. Rukavina)



b) **L'étang Bush sur la côte est, une zone à faible remplissage sédimentaire**

Figure 234 **Pointe Pelée, rive ouest du lac Érié** (mai 1978)

nord du lac Érié se sont développées sur des moraines submergées (Rukavina, 1976).

On note, dans l'ouest du lac Ontario, une variation saisonnière dans la morphologie littorale et des changements de hauteur atteignant 1 m. Cette variation s'explique par la fluctuation des niveaux de l'eau et par la fréquence des tempêtes. L'érosion du début du printemps et du milieu de l'été est suivie par une période de récupération à la fin de l'été et à l'automne, puis la situation redevient relativement stable en hiver (Rukavina, 1974).

Les principales caractéristiques géomorphologiques des côtes de cette unité sont un littoral rectiligne constitué de falaises de matériaux non résistants, en recul, (figures 235 et 236), parsemé à quelques endroits d'importantes accumulations de sédiments, résultat du transport littoral de matériaux arrachés aux falaises.

4.6.3 Comté de Prince Edward

Ce milieu du nord-est du lac Ontario, de relief élevé (76 m au-dessus du niveau du lac), est formé par un affleurement de calcaires relativement résistants. Cette roche en place constitue une base stable pour le littoral et sépare celui-ci des côtes de sédiments meubles qui caractérisent les autres sections du sud de l'Ontario. Des dépôts glaciaires se sont accumulés par endroits, mais ils sont moins importants et généralement plus minces que dans les autres secteurs du sud de l'Ontario. Les calcaires ont été érodés par les inlandsis le long d'axes sud-ouest-nord-est pour produire une série de dépressions, parallèles à ces axes.

Les vents dominants soufflent du sud-ouest, parallèlement au grand axe du lac Ontario, de telle sorte que les plages face au sud-ouest sont les plus exposées du lac. La section nord-est est donc peu battue par les vagues et, à de nombreux endroits de cette côte irrégulière, l'hydrodynamisme est très faible. La présence de la glace limite l'action des vagues sur le littoral entre la mi-décembre et la mi-avril.

Les variations saisonnières des niveaux d'eau sont de 0,5 m en moyenne et les variations à court terme liées à l'action du vent sont particulièrement importantes lorsque le vent souffle violemment dans l'axe du lac.

Le comté de Prince Edward se caractérise par des promontoires et des falaises de roches exposées, des cordons littoraux de fond de baie (figure 225) et des milieux abrités comportant des marais. Le long de la côte sud, les calcaires résistants forment des falaises au pied desquelles se sont accumulés, dans les secteurs abrités, des matériaux de la taille des galets et des cailloux, issus de l'érosion locale. Dans les sections de l'ouest, l'érosion de la partie exposée a produit de larges plateformes rocheuses planes qui se prolongent en mer jusqu'à 1 km (figure 237).

L'avancée rocheuse, au sud, qui forme la région du comté de Prince Edward, interrompt le transport littoral d'ouest en est des sédiments provenant de l'érosion des falaises de la rive nord du lac Ontario (figure 227). Ces sédiments littoraux ont été emprisonnés dans les rentrants formés par l'érosion glaciaire pour produire de vastes cordons sableux (Rukavina, 1970). Cinq gros cordons de fond de baie (figure 225) se sont développés en travers des dépressions sud-ouest-nord-est dans la baie Presqu'île, la baie Wellers (figure 238), la baie Wellington (cordon de West Bay) (figure 239), la baie Athol (cordon de East Bay) et le havre Soup. Les sections abritées derrière ces cordons comportent de vastes marais. Des dunes atteignant 3 m de hauteur sur le cordon de West Bay (Rukavina et

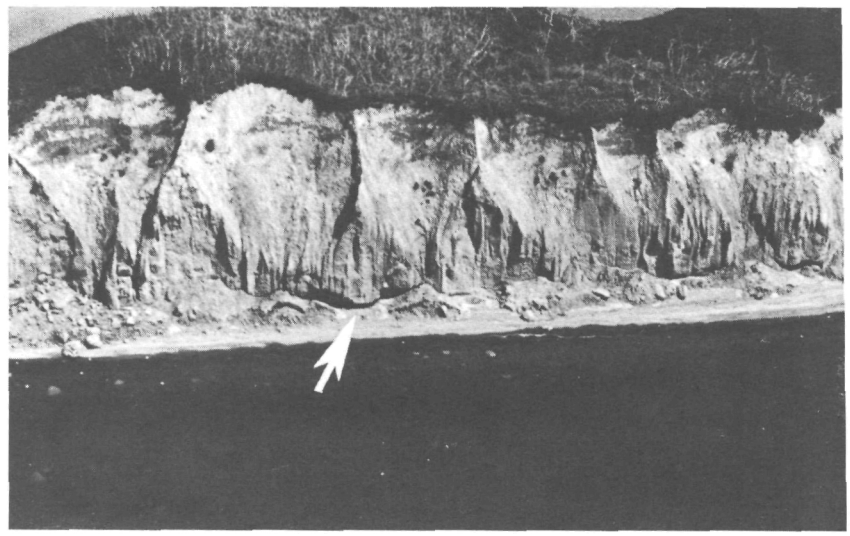


Figure 235 **Falaises verticales festonnées à l'ouest de Port Stanley, lac Érié** (mai 1978)
(la flèche pointe vers une entaille de sapement à la base de la falaise)

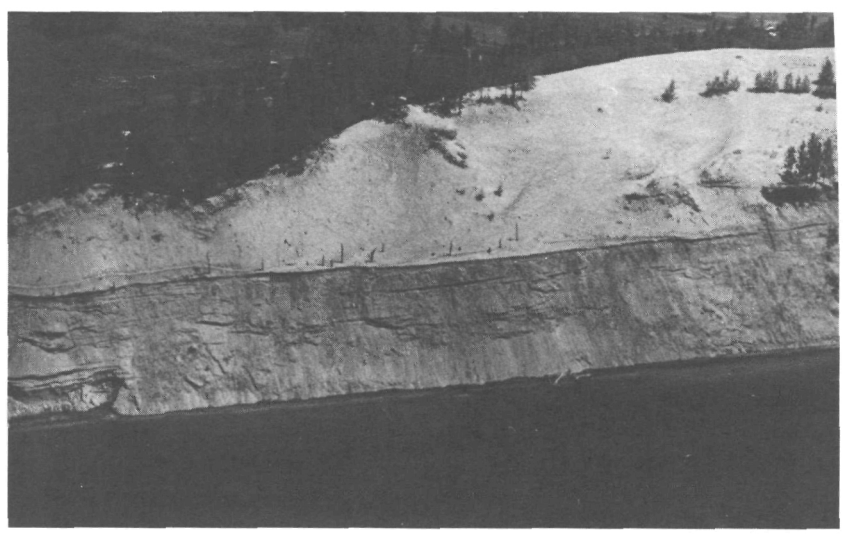


Figure 236 **Falaise de sable et dunes perchées, parc de Sand Hills, Jacksonville, lac Érié**
(mai 1978)

St-Jacques, 1972) et 6 m sur le cordon de la baie Wellers se sont formées. Chacun de ces cinq cordons est distinct et borné par des promontoires rocheux. Contrairement aux cordons sableux du nord-ouest de ce milieu, on note ici la prédominance de plages de galets et de cailloux jusqu'à l'est de la baie Athol (Rukavina et St-Jacques, 1972).

Les côtes nord et est du comté de Prince Edward consistent en une série de grands chenaux et baies qui incluent la longue, étroite et sinueuse baie de Quinte. Il s'agit là d'un milieu très abrité à hydrodynamisme faible et dont les rives, souvent rocheuses, comportent des marais dans les baies et anses (figure 240).

Figure 237 **Plateforme rocheuse exposée près de la baie Wellington, comté de Prince Edward, lac Ontario** (mai 1969)

Figure 238 **Cordons littoraux dans la baie Wellers qui isolent les baies North** (en haut) **et Pleasant** (en bas). Affleurements de roche en place à la pointe Island (en bas) et à la pointe Pierson (au centre) (mai 1978)

4.6.4 Le Saint-Laurent et les voies interlacustres

Ce milieu est composé du fleuve Saint-Laurent, de la rivière Niagara et du canal Welland, de la rivière Sainte-Claire, du lac Sainte-Claire et de la rivière Détroit et de la région de Sault Ste. Marie. Chacun de ces éléments est une voie de communication du réseau des Grands Lacs et constitue essentiellement un milieu fluvial (à l'exception du lac Sainte-Claire) ou d'étroits chenaux, et non pas un véritable milieu côtier.

Le fleuve Saint-Laurent, qui englobe les lacs Saint-François, Saint-Louis et Saint-Pierre, s'étend sur 500 km depuis l'extrémité nord-est du lac Ontario jusqu'à l'île d'Orléans à l'embouchure de l'estuaire du Saint-Laurent. Au sud-ouest, un prolongement des roches résistantes

Figure 239 **Cordon littoral sableux de faible altitude, cordon West Bay, comté de Prince Edward** (mai 1969)

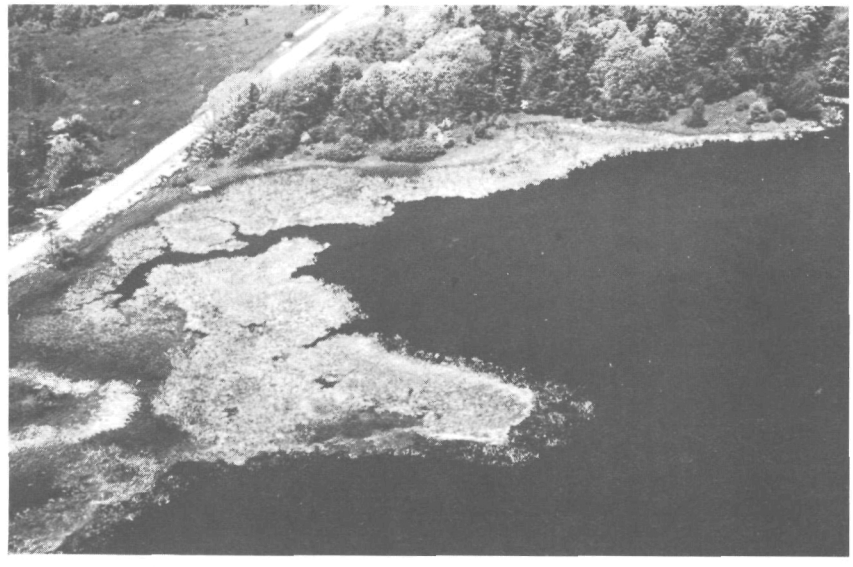


Figure 240 **Petit marais d'une côte ouverte, rive nord, chenal Bateau, au nord de l'île Howe, comté de Prince Edward** (mai 1978)

granitiques du Bouclier (l'axe Frontenac) (figure 222) endigue les eaux du lac Ontario; c'est une section comportant une multitude d'îles et de baies (la région des Mille-Îles; figure 241) avec un grand nombre de variations de pente. Ainsi, entre le lac Ontario et Montréal, le niveau du fleuve baisse de 69 m; celui-ci a été modifié par la construction de la voie maritime du Saint-Laurent, un canal de navigation long de 290 km et comportant écluses et canaux. À l'est de Montréal, le fleuve a été creusé par dragage, mais n'a pas subi d'autre modification. Entre le lac Saint-Pierre et l'île d'Orléans, l'eau est douce mais elle est soumise aux inversions de marée; en effet, le marnage moyen est de 1,9 m à Grondines et il augmente pour atteindre 4,1 m à Québec

Figure 241 **Côte rocheuse résistante, de bas relief, sur l'île Treasure, à l'est de Kingston, région des Mille-Îles** (mai 1978)

(SHC, 1976, 1988). À l'est de l'île d'Orléans, le chenal s'élargit et l'eau devient saumâtre, les eaux du fleuve se mêlant à celles de l'estuaire du Saint-Laurent (division 4.5.4).

Même s'il arrive qu'un clapot de faible amplitude se forme dans les lacs étroits et dans les parties plus larges du chenal, il s'agit plutôt d'un milieu à hydrodynamisme très faible, dominé par les processus fluviaux. La glace est présente de la mi-décembre à la mi-avril. Sur le fleuve, la glace est mobile et forme la banquise, plutôt qu'une couverture de glace complète; sur les littoraux, on observe la présence d'un pied de glace. Les littoraux sont surtout constitués d'affleurements rocheux étroits (figure 241) ou de plages de galets et de cailloux. Dans les secteurs les plus à l'est, où la marée se fait sentir, les vasières intertidales sont fréquentes.

La rivière Niagara, d'une longueur de 56 km, draine les lacs supérieurs et se jette dans le lac Ontario; elle se fraie un chemin au travers des dolomies résistantes de l'escarpement du Niagara, qui endigue les eaux du lac Érié. La dénivellation totale de la rivière est de 99 m entre les deux lacs, dont une baisse de 51 m, lorsque celui-ci traverse la bordure nord de l'escarpement (les chutes du Niagara). Cette section du réseau de voies interlacustres est un milieu fluvial comportant de forts courants; le rivage est constitué essentiellement de structures anthropiques entrecoupées de quelques affleurements rocheux et de plages de sédiments mal triés. À l'ouest de la rivière, les écluses du canal Welland, long de 44,4 km, permettent aux navires de passer d'un lac à l'autre. Les berges du canal sont surtout d'origine anthropique, mais dans les sections inférieures (nord), le littoral est caractérisé par des blocs de béton et des sédiments naturels.

Les lacs Huron et Érié sont reliés par la rivière Sainte-Claire (longueur de 63 km, dénivellation de 1,7 m), le lac Sainte-Claire et la rivière Détroit (51 km). Un vaste delta occupe la partie nord-est du lac Sainte-Claire, là où la rivière se jette dans le lac du même nom (figure 242). Ce delta

Figure 242 **Rive en cours de recul, bras principal de la rivière Sainte-Claire** (flèche) (mai 1978) (bras secondaire Chematogan, en haut de la photo)

en patte d'oie comporte de nombreux larges bras secondaires et bon nombre d'îles et de vastes marais peu élevés (Pezzetta, 1973). Le fetch maximal sur le lac est de 42 km; il s'agit donc d'un milieu à hydrodynamisme très faible. La côte est du lac Sainte-Claire, au nord de l'estuaire de la Thames, est une section basse, endiguée ou marécageuse, très vulnérable aux inondations lorsque le niveau des eaux est élevé (figure 243). C'est ce qui s'est produit durant les maximums record enregistrés en 1986, souvent supérieurs de 0,7 m à la moyenne mensuelle à long terme. Au sud et à l'ouest de la rivière Thames, des plages très étroites et des falaises basses (5 m), en recul, dominent (figure 244). Les autres sections sont des milieux fluviaux (figure 245).

De nombreuses sections des berges de la rivière Sainte-Claire sont anthropiques ou ont tout au moins été modifiées ou protégées. Les caractéristiques varient d'un relief faible présentant des marais ou des plages étroites à des falaises de sédiments meubles en cours d'érosion pouvant atteindre plusieurs mètres de hauteur (figure 246).

Les rapides de Sault Ste. Marie, situés entre le lac Supérieur et le lac Huron, se sont formés là où des roches résistantes du Bouclier barrent les eaux du lac Supérieur. Des canaux et écluses ont été construits pour permettre la navigation entre ces deux lacs, dont la dénivellation atteint 7 m. Il s'agit d'un milieu dominé par les processus fluviaux à rives essentiellement rocheuses, mais présentant aussi d'étroites plages de sédiments mixtes et de vastes marais, tels ceux du lac George.

4.6.5 Sud-est du lac Huron

Entre Sarnia au sud et Sauble au nord, la côte sud-est du lac Huron est caractérisée par des falaises de dépôts glaciaires meubles et des plages de sable ou de sable et de galets. Les falaises, généralement de 5 à 30 m de hauteur,

Figure 243 **Milieu de marais, nord de la baie Mitchell, lac Sainte-Claire** (mai 1978) (photo de N. Rukavina)

Figure 244 **Basse côte et plage étroite, sud-ouest du lac Sainte-Claire** (mai 1978) (photo de N. Rukavina)

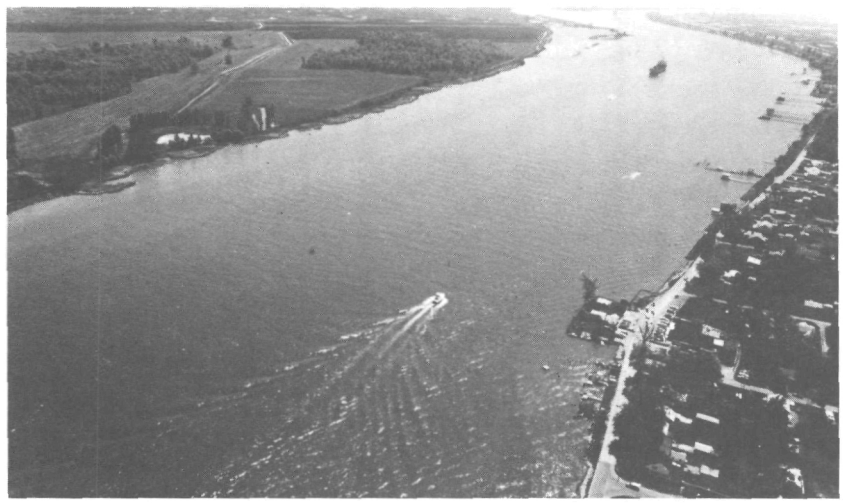


Figure 245 **Vue vers le sud, cours inférieur de la rivière Sainte-Claire** (avec delta et bifurcation de la rivière en haut de la photo) (mai 1978) (photo de N. Rukavina)

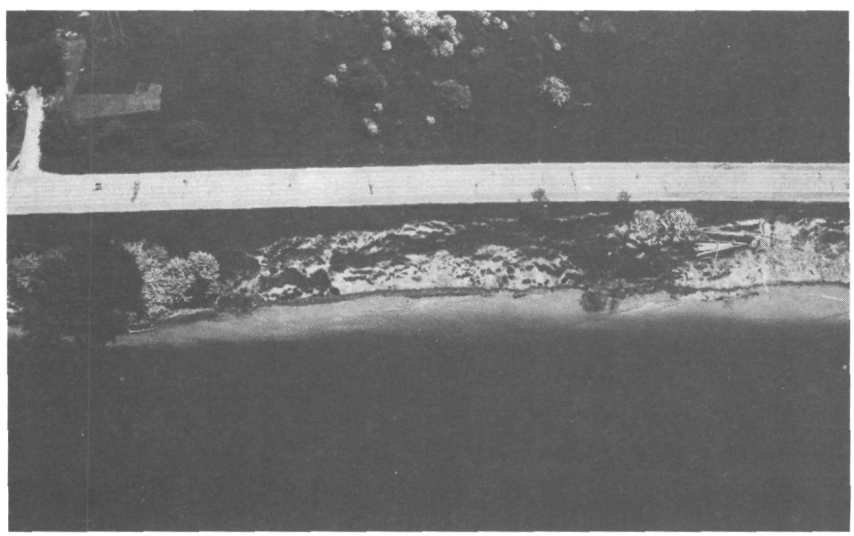


Figure 246 **Basse falaise en recul, rivière Sainte-Claire près de Sarnia** (mai 1978)

sont composées surtout de sable ou d'argile; elles atteignent des hauteurs maximales de 50 m. L'érosion de ces falaises non résistantes, qui reculent à des rythmes atteignant 2 m/a (Boulden, 1975), fournit directement à la zone littorale des matériaux qui y sont remaniés sous l'action des vagues.

La génération des vagues sous l'effet des vents d'ouest dominants est limitée par le court fetch (120 km). La côte face au nord-ouest étant exposée à de plus grands fetches (jusqu'à 300 km), les vagues générées dans ce quadrant peuvent atteindre des hauteurs considérables durant les mois où il n'y a pas de glace. Cela entraîne le déplacement net des sédiments vers le sud

dans la zone littorale de cette unité côtière (Quigley *et al.*, 1974). Les hauteurs de vagues maximales se produisent en hiver et la probabilité de formation de vagues atteignant 9,5 m serait d'environ une fois tous les quatre ans (Richards et Phillips, 1970). De la glace est présente sur le lac ou sur les plages jusqu'à quatre mois chaque année (de janvier au début d'avril). Se superposent aux variations à long terme des niveaux du lac (environ 2 m, figure 220), les variations saisonnières et les ondes de tempête d'environ 1 m ou moins. Ces variations peuvent avoir un effet marqué sur les vitesses d'érosion, surtout lorsque des niveaux d'eau élevés coïncident avec des ondes de tempête très puissantes.

Le trait de côte de ce milieu à faible relief est quasi rectiligne, en raison de l'érosion des falaises meubles; les matériaux ainsi érodés se sont accumulés en travers des baies et des embouchures des cours d'eau, sous l'effet des processus littoraux. Dans les secteurs peu élevés, des cordons sableux précédant des dunes de haute-plage ferment des baies abritées où se sont formés des marais. Les plages adjacentes aux falaises en recul sont étroites et fréquemment composées de sable et de sédiments grossiers mélangés (galets, cailloux et blocs). Entre Sarnia et Grand Bend, la côte est dominée par la présence d'un vaste système de dunes et de plages (figure 247). Entre Grand Bend et Clarke Point par contre, on observe une côte abrupte à falaises en recul comportant seulement des plages étroites (figure 248). Au nord de Clarke Point, on retrouve de larges plages de sable et de galets (figure 249). Dans toute cette région, la roche en place affleure juste sous le niveau du lac; elle est exposée à un certain nombre d'endroits, surtout dans les secteurs nord (figure 250).

4.6.6 Nord-est du lac Huron

La morphologie de l'ouest de la péninsule Bruce et du sud de l'île Manitoulin est essentiellement déterminée par l'affleurement d'une bande de dolomies résistantes de Niagara. Cet affleurement traverse la péninsule Bruce en direction du

Figure 247 **Large plage sablonneuse se prolongeant par un vaste système de dunes endommagé par les véhicules tout terrain, parc provincial Ipperwash, lac Huron** (mai 1978)

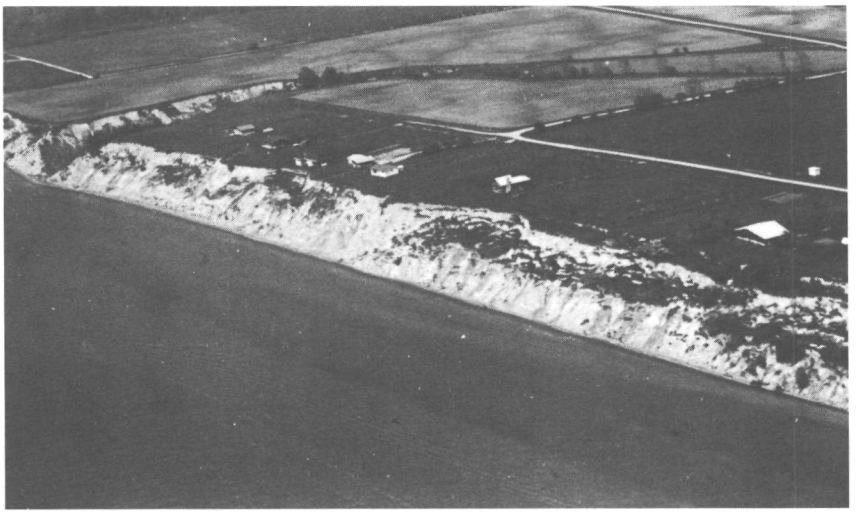


Figure 248 **Falaise en cours d'érosion au nord de Goderich, lac Huron** (mai 1978)

Figure 249 **Plage de Sauble, lac Huron** (mai 1978) (les cordons littoraux sont parallèles à une large plage sablonneuse prolongée par des dunes peu élevées)

nord, bifurque vers l'ouest en travers de l'île Manitoulin, puis se dirige vers le sud pour former la rive ouest du lac Michigan (figure 222). Cet escarpement de calcaire résistant sépare en effet le chenal Nord et la baie Georgienne du lac Huron.
L'affleurement plonge vers le sud et l'ouest, soit vers le centre d'un bassin situé entre les lacs Michigan et Huron (figure 223). Les roches de cette portion de la côte du lac Huron plongent donc, en pente douce, vers le milieu du lac. Les dépôts glaciaires sont discontinus et souvent minces; cette région, d'aspect accidenté, comporte des élévations locales maximales de 150 m au-dessus du niveau de l'eau.

Cette côte se caractérise par des fetches de 300 km vers le sud et de 200 km vers le sud-ouest et elle est exposée à

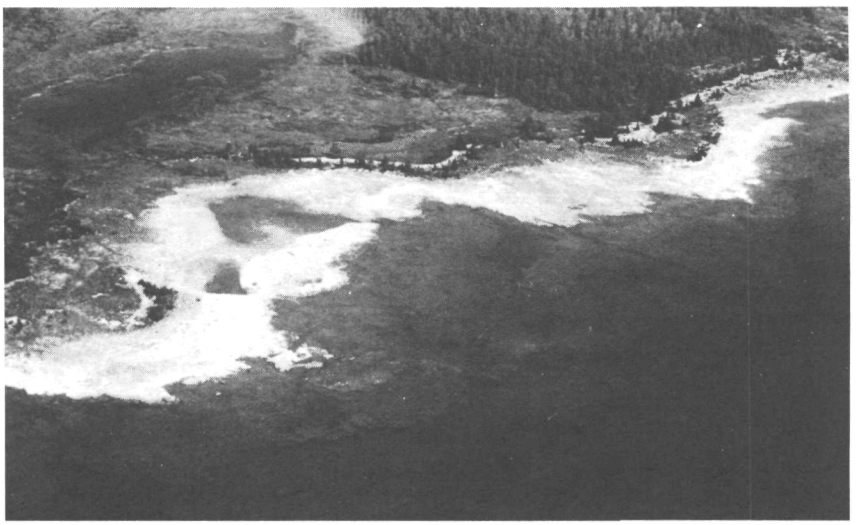


Figure 250 **Affleurements de la roche en place recouverts d'un mince placage de sédiments grossiers précédant des marais, entre Kincardine et Southampton, lac Huron** (mai 1978

l'hydrodynamisme le plus élevé qui soit engendré sur le lac. On peut prévoir des hauteurs de vagues de 5,7 m une fois par année en moyenne (Cole, 1971). En général, les hauteurs de vagues ne dépassent pas 3 m, sauf pour de courtes périodes en hiver (Richards et Phillips, 1970). La présence de la glace limite l'activité des vagues de la fin décembre au début avril. Il se produit tous les ans des variations du niveau de l'eau allant jusqu'à 0,5 m. Toutefois, contrairement aux côtes à falaises constituées de matériaux meubles, ces variations sont moins importantes pour les côtes rocheuses, sauf là où se logent des dépôts de plage.

Les côtes du nord-est du lac Huron sont caractérisées par une zone littorale rocheuse peu élevée, parsemée de nombreux récifs et îles. Ce type de littoral est lié aux schistes argileux, aux calcaires et aux dolomies qui plongent doucement vers le lac (Lewis, 1970). La courbure du trait de côte correspond à la forme en soucoupe du bassin du Michigan (figure 223). La côte est essentiellement rocheuse et les plages peu fréquentes, car les dolomies résistantes de Niagara s'altèrent en sédiments très fins et fournissant peu de matériaux de plage. Là où elles existent, les plages sont issues de l'érosion locale des falaises et sont donc plus vastes là où on trouve des dépôts de sédiments glaciaires à la côte, notamment dans les baies Dominion, Providence et Michael, au sud de l'île Manitoulin. Des marais se sont formés dans les baies abritées où des sédiments fins se sont accumulés.

4.6.7 Côte est de la péninsule Bruce

Contrairement à la côte occidentale de la péninsule, où les roches plongent en pente douce vers le lac, la côte orientale est constituée de la bordure résistante de dolomies de l'escarpement du Niagara (figure 223). Cet escarpement forme une partie de la côte au nord de la baie Colpoys (figure 251), mais les falaises actives ne se trouvent que dans l'extrême nord de la péninsule, où la côte rocheuse accidentée et échancrée présente des altitudes variant de 30 à 70 m. Au sud du détroit de Melville, le littoral est le plus souvent caractérisé par la présence de basses falaises de matériaux meubles en cours d'érosion et de plages de galets et de blocs mal triés, accompagnées souvent de larges plateformes jonchées de

Figure 251 **L'escarpement du Niagara, rive nord de la baie Colpoys, côte est de la péninsule Bruce** (mai 1978) (le littoral est constitué d'une plage de cailloux et de blocs mal triés)

blocs. Au nord du détroit de Melville, les côtes à falaises dominent et les sédiments sont rares, puisque l'érosion des affleurements de roche en place produit des sédiments fins qui quittent la zone littorale sous forme de suspensions. Les vents dominants soufflent vers le large et les fetches maximaux ne sont que de 75 km (au nord-est) et de 115 km (au nord). L'hydrodynamisme est beaucoup moins élevé que sur la côte ouest de la péninsule.

4.6.8 Baie Nottawasaga

Cette petite baie de l'extrême-sud de la baie Georgienne résulte de l'érosion de l'escarpement du Niagara à l'ouest et des roches du Bouclier à l'est. Le fond de la baie est comparable à une très large plage abritée constituant un piège à sédiments pour les matériaux issus de l'érosion des deux rives adjacentes de la baie et transportés le long du littoral vers le sud-est.

Des affleurements de roche en place le long de la rive nord de la baie forment une série de promontoires (figure 252) qui séparent des systèmes de plages sablonneuses à dunes. Au fond de la baie, un long cordon sablonneux sur 10 km précède un vaste système dunaire (Martini, 1975). Les plages de sable du fond de cette baie sont larges (25 à 30 m) (figure 253) et adossées à des dunes atteignant 6 m de hauteur. Ces plages, face au nord-nord-ouest, sont exposées à un fetch maximal de 200 km dans l'axe de la baie Georgienne. Il s'agit toutefois d'un milieu relativement abrité des vagues. La côte est de la baie comporte peu de sédiments et est caractérisée par des affleurements de roche en place. Le relief de la haute-plage est élevé à de nombreux endroits, même si le littoral lui-même est souvent bas. C'est dans la région de Thornbury-Meaford (figure 254) et du cap Rich que la zone littorale est la plus élevée. Ailleurs, les calcaires à faible pendage forment souvent de larges plateformes rocheuses sur le rivage (figure 255).

4.6.9 Îles Thirty Thousand - chenal Nord

La côte donnant sur l'intérieur correspond à la bordure des roches résistantes exposées du Bouclier canadien (figure 222) qui sont ici surtout des granites roses ou gris. La côte sud du chenal Nord (île Manitoulin) est un affleurement résistant de calcaires et de

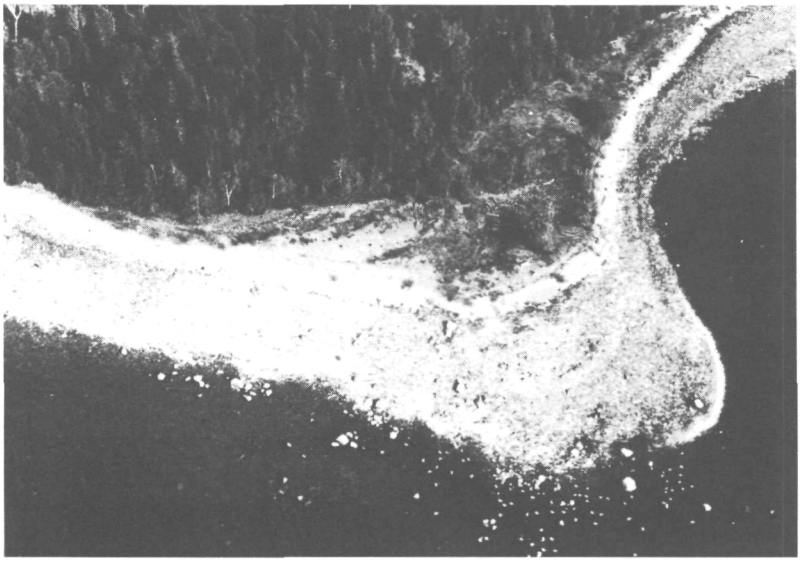


Figure 252 **Plage de cailloux et de blocs et large zone littorale jonchée de blocs, près de la pointe Valil, à l'ouest du cap Rich, est de la baie Nottawasaga** (mai 1978)

Figure 253 **Embouchure de la rivière Nottawasaga, déviée vers l'est par l'expansion d'un système de cordons et de flèches au fond de la baie** (mai 1978)

dolomies qui appartiennent à l'escarpement du Niagara, mais dont les élévations sont inférieures à celles de la côte ouest de la péninsule Bruce. Le relief côtier est généralement bas, et dans toutes les sections, le littoral est très irrégulier et parsemé de nombreux bras, îles et récifs. Les affleurements de roches résistantes n'étant

Figure 254 **Falaises de roches sédimentaires non résistantes en cours d'érosion, est de Meaford, ouest de la baie Nottawasaga** (mai 1978)

Figure 255 **Large plateforme rocheuse près de Craigleith, ouest de Collingwood, baie Georgienne** (mai 1978)

recouverts que par endroits de minces couches de sédiments meubles, les conditions ne sont guère propices à l'érosion et, le cas échéant, les plages sont étroites et constituées de sédiments de la taille des galets.

La baie Georgienne est largement abritée des vagues engendrées dans le lac Huron; ce milieu côtier connaît donc un hydrodynamisme faible à modéré. Vu l'irrégularité du trait de côte, de nombreuses sections de celui-ci correspondent à des milieux très abrités. La baie Georgienne et le chenal Nord se couvrent de glace en hiver et on peut s'attendre à ce que de la glace soit présente sur la plage et dans les milieux littoraux abrités entre la mi-décembre et la fin avril.

Les littoraux de ce milieu sont essentiellement peu élevés, rocheux et irréguliers (figure 256). Ce trait de côte accidenté est interrompu par de petites plages, généralement constituées de galets et de cailloux, et par des falaises rocheuses généralement hautes de 5 à 20 m, mais culminant à l'occasion à 50 m. Là où des plages isolent des lagunes, ou dans des bras abrités, des marais se sont formés. La taille des plages, généralement composées de sédiments mixtes mal triés, est limitée par la rareté des sédiments littoraux (figure 257). Les portions nord et est de la baie Georgienne ont le trait de côte le plus complexe de tout le réseau des Grands Lacs.

4.6.10 Rive nord du lac Supérieur

La côte canadienne du lac Supérieur est tout entière située dans la zone de roches

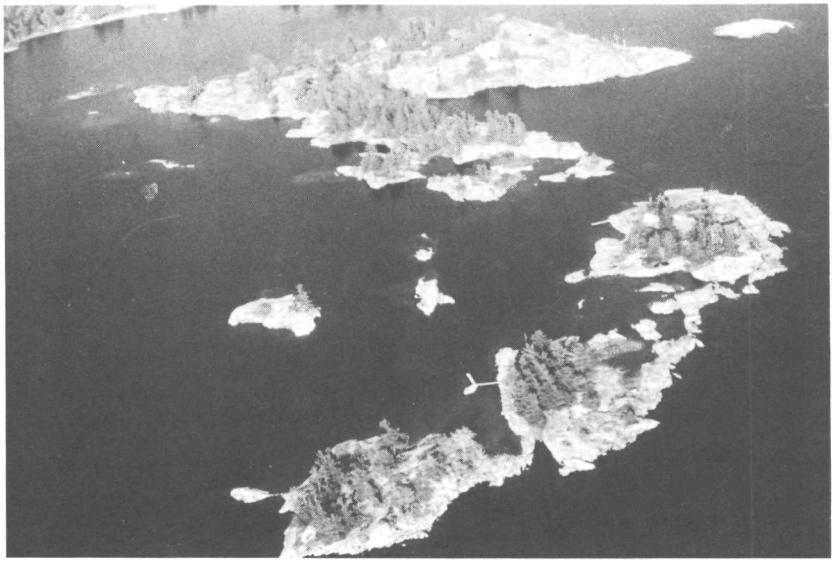


Figure 256 **Îles rocheuses peu élevées près du chenal Muskosh, îles Thirty Thousand, nord-est de la baie Georgienne** (mai 1978)

Figure 257 **Plage de blocs et de cailloux avec large zone littorale peu profonde près de Thunder Bay, nord-est de la baie Georgienne** (mai 1978)

résistantes du Bouclier. À l'exception de la section adjacente à Sault Ste. Marie, le relief y est généralement élevé (figures 258 et 259), notamment dans le nord-ouest, et les falaises côtières de 50 à 100 m sont fréquentes. Au cap Thunder, les falaises atteignent environ 300 m. Sur les roches résistantes du Bouclier, les matériaux superficiels sont peu abondants, de telle sorte que l'apport à la zone littorale de sédiments fins (de la taille du sable) est très limité et, là où elles existent, les plages sont surtout constituées de sédiments grossiers (Phillips, 1980).

Les fetches varient de 250 à 500 km et la majeure partie de la côte est exposée à un hydrodynamisme relativement élevé. Les vagues sont les plus hautes en novembre (Ploeg, 1971); des vagues de 9,1 m se produisent en moyenne une fois par année (Cole, 1971) et des vagues de 11,3 m une fois tous les quatre ans (Richards et Phillips, 1970). La glace est présente au moins quatre mois chaque année; elle commence à se former sur le littoral et dans les baies et havres entre la fin décembre et la mi-janvier. Certaines années, il arrive que le lac gèle complètement, mais la plupart du temps, le centre du lac reste libre de glace (Marshall, 1967) (figure 218). La glace fond en avril et les plages sont généralement libres de glace en mai. Le niveau de l'eau du lac peut varier de 0,6 m sur un an, quoiqu'il puisse se produire des ondes de tempête atteignant 2 m. Ce lac connaît les variations de niveaux à long terme les moins importantes (environ 1,13 m) de tous les Grands Lacs (figure 220).

La côte de la portion nord du lac Supérieur est en grande partie rocheuse et escarpée et présente souvent des falaises élevées et des baies profondes. La côte nord-ouest a des falaises élevées (maximum 300 m), dont les pentes d'éboulis sont très vastes. Les baies Thunder, Black et Nipigon sont séparées du bassin central par une série d'îles résistantes orientées suivant la direction structurale de la région, soit nord-est-sud-ouest. Ces baies constituent un

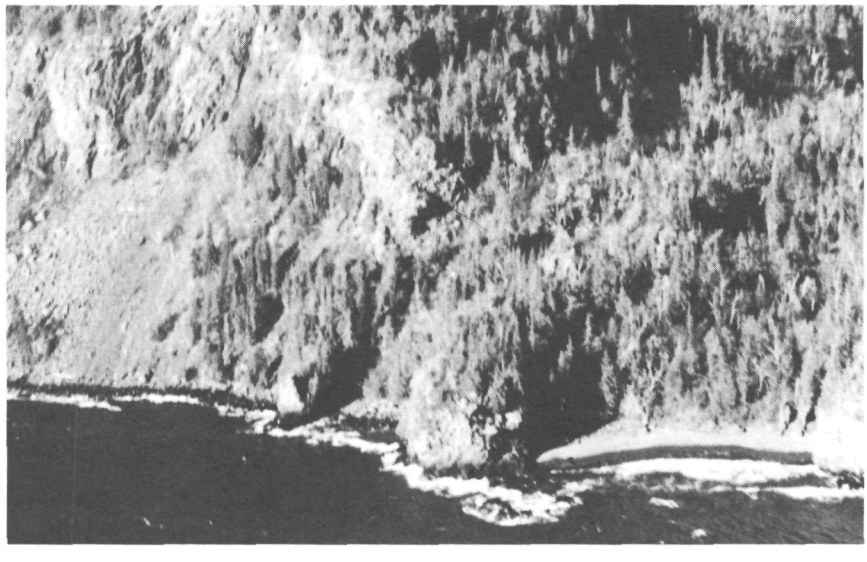


Figure 258 **Côte accore à l'ouest de Terrace Bay, nord du lac Supérieur** (octobre 1978) (cette côte élevée est constituée d'affleurements de roche en place entre lesquels s'intercalent de petites plages de cailloux ou de cailloux et de blocs)

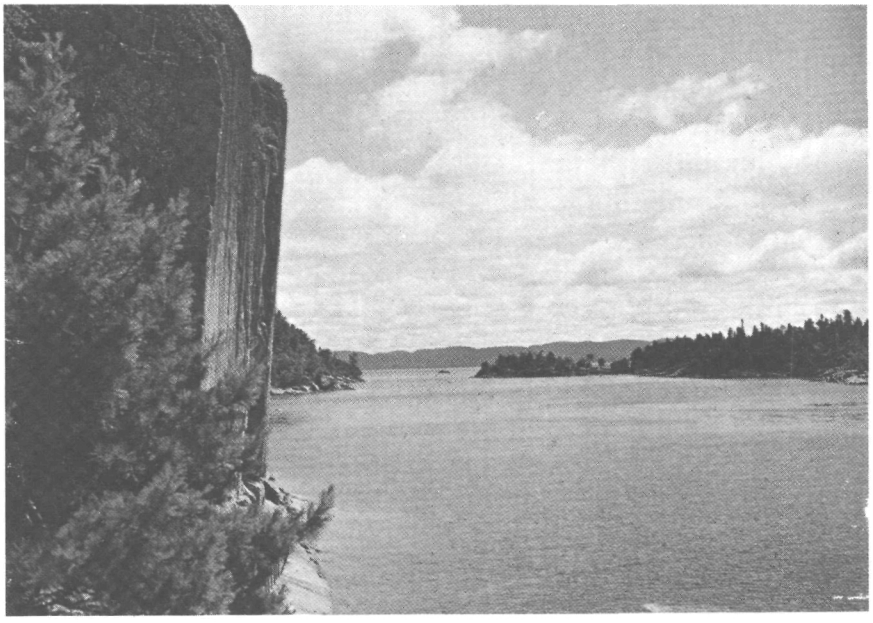


Figure 259 Falaises verticales et zone littorale rocheuse, rocher Agawa, nord-est du lac Supérieur (Pye, 1969)

milieu littoral abrité, complexe, caractérisé par des côtes rocheuses et basses et des plages de sédiments grossiers. Entre Nipigon et Wawa, le relief intérieur est élevé mais les falaises sont peu fréquentes et la côte de roches résistantes est essentiellement basse (figure 260). Cette côte est interrompue par des plages (figure 261), dont les sédiments proviennent de petits deltas. Les deltas se sont formés aux embouchures des cours d'eau traversant des hautes-plages constituées d'anciens dépôts lacustres d'où proviennent les matériaux d'érosion.

La rive est, au sud de Wawa, a un littoral irrégulier, peu élevé, avec de grands rentrants (figure 262) et des eaux peu profondes. Les sédiments sont relativement abondants dans cette région, et de nombreux cordons ou flèches, constitués surtout de sédiments de la taille des sables se sont formés (figure 263). Sur cette côte, les plages exposées sont soumises à un hydrodynamisme élevé, avec formation fréquente de gradins de tempête à plusieurs mètres au-dessus du niveau maximal normal du lac (figure 264).

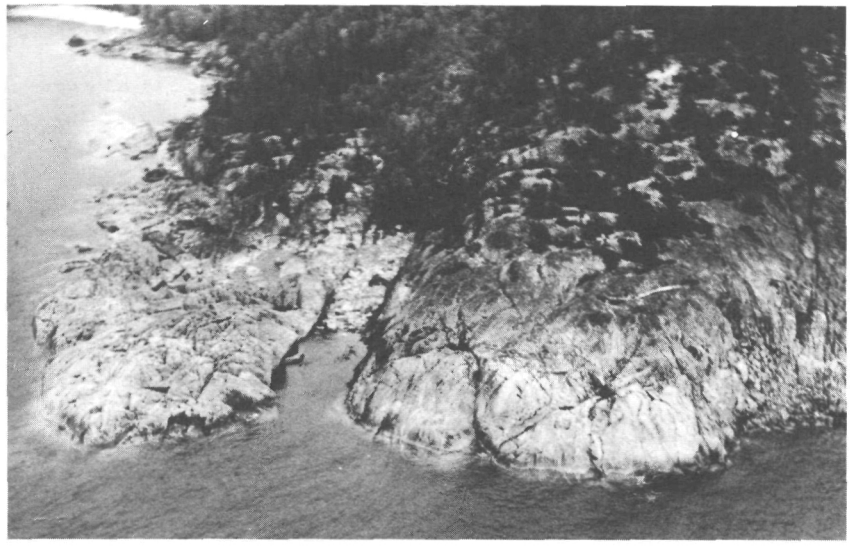


Figure 260 **Côte rocheuse exposée, peu élevée, près de la pointe Theane, nord-est du lac Supérieur** (mai 1978)

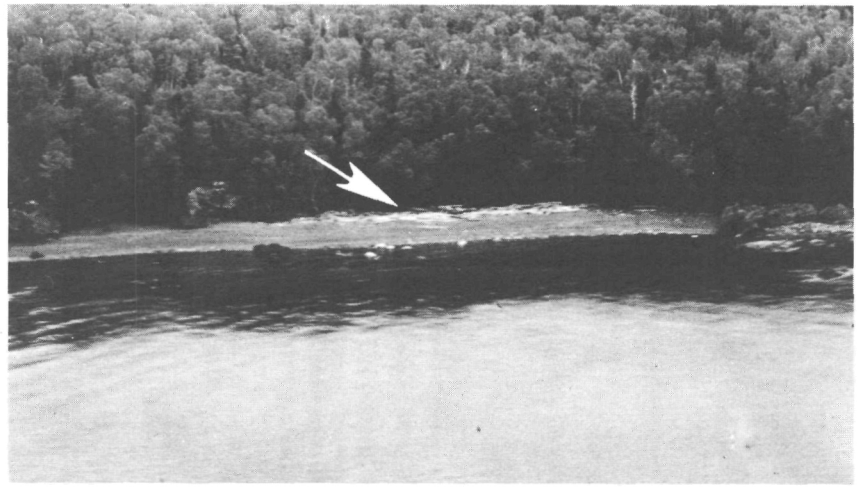


Figure 261 **Plage de cailloux et débris de grumes** (flèche), **sud-ouest de la rivière Montréal, nord-est du lac Supérieur** (mai 1978) (la laisse de grumes est à plus de 4 m au-dessus du niveau du lac)

Figure 262 **Plage de sable, de galets et de blocs peu battue par les vagues dans une anse abritée au sud de la pointe Mamainse, sud-est du lac Supérieur** (octobre 1978)

Figure 263 **Large plage sablonneuse précédant des dunes peu élevées, parc provincial Pancake Bay, baie Whitefish, sud-est du lac Supérieur** (octobre 1978)

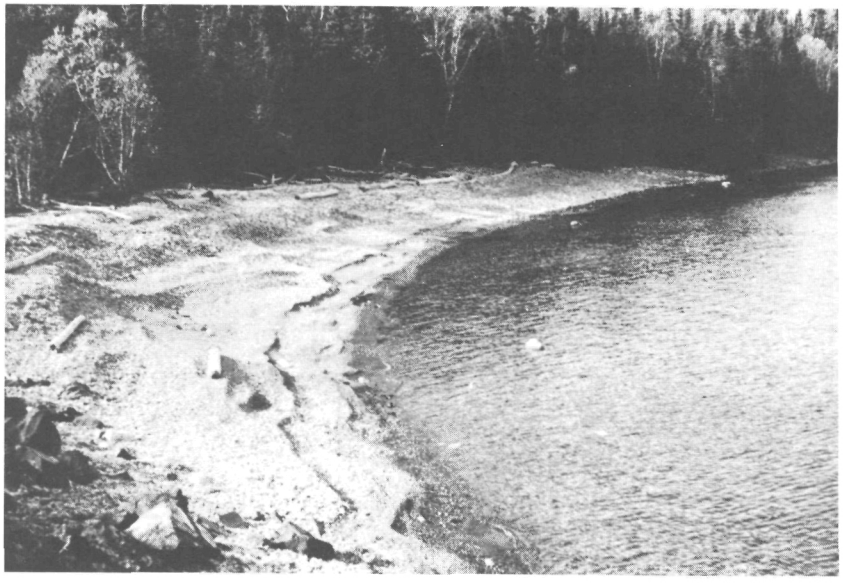


Figure 264 **Plage exposée de galets et de cailloux** (fetch >200 km) **dans la baie Hubbard près de Mamainse, sud-est du lac Supérieur** (la crête de tempête est à plus de 2 m au-dessus du niveau du lac)

Références

ABSORB (Alaskan Beaufort Sea Oil Spill Response Body), Draft Shoreline Oil Spill Response Manual, Anchorage, Alaska (1981).

Alexander, L.J.D. et W.L.C. Knowles, «Pelee Island Shoreline Erosion Study», D.L. Forbes (éd.), *Procès-verbal : Coasts of Canada Conference*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 475-494 (1985).

Allen, A.A., «Comparison of Response Options for Offshore Oil Spills», *Compte rendu : Onzième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 289-306 (1988).

Allen, A.A., «Controlled Burning of Crude Oil on Water Following the Grounding of the *Exxon Valdez*», *Proceedings of the 1991 Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute Publication No. 4529, American Petroleum Institute, Washington, DC, p. 213-216 (1991).

Allen, W.T.R., «Break-up and Freeze-up Dates in Canada», Transports Canada, Direction de la météorologie, CIR 4116, 201 p. (1964).

Allen, W.T.R., «Embâcle, débâcle et épaisseur de la glace au Canada». Service de l'environnement atmosphérique, Pêches et Environnement Canada, rapport CLI-1-77, Downsview, Ontario, 185 p. (1977).

Amos, C.L., «Modern Sedimentary Processes», Chapter 11, *Géologie de la marge continentale de l'est du Canada*, M.J. Keen and G.L. Williams (éd.); Commission géologique du Canada, *Géologie du Canada,* nº 2, p. 609-673 (also Geological Society of America, The Geology of North America, v. I-1) (1990).

Amos, C.L. et G.H.E. Joice, «The Sediment Budget of the Minas Basin, Bay of Fundy, Nova Scotia», Bedford Institute of Oceanography, Data Series BI-D-77-3, Dartmouth, Nova Scotia, 409 p. (1977).

Amos, C.L. et B.F.N. Long, «The Sedimentary Character of the Minas Basin, Bay of Fundy», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 153-180 (1980).

Amos, C.L. et B.A. Zaitlin, «The Effect of Changes in Tidal Range on a Sublittoral Sequence, Bay of Fundy, Canada», Geo-Marine Letters, 4, p. 161-169 (1984-1985).

API (American Petroleum Institute), «Oil Spill Response: Options for Minimizing Adverse Ecological Impacts», American Petroleum Institute, Publication No. 4398, Washington, DC, 98 p. (1985).

Armon, J.W. et S.B. McCann, «Longshore Sediment Transfer and a Sediment Budget for the Malpeque Barrier System, Southern Gulf of

St. Lawrence», *Can. J. Earth Sci.*, *14*(11), p. 2429-2439 (1977).

Armon, J.W. et S.B. McCann, «Morphology and Landward Sediment Transfer in a Transgressive Barrier System, Southern Gulf of St. Lawrence, Canada», *Mar. Geol.*, *31*, p. 333-344 (1979).

Atlas, R.M., P.D. Boehm et J.A. Calder, «Chemical and Biological Weathering of Oil from the *Amoco Cadiz* Oil Spillage, within the Littoral Zone», *Estuarine Coastal Mar. Sci.*, *12*, p. 589-608 (1981).

Baca, B.J., T.E. Lankford et E.R. Gundlach, «Recovery of Brittany Coastal Marshes in the Eight Years since the *Amoco Cadiz* Incident», *Proceedings of the 1987 Oil Spill Conference*, April 6-9, *Baltimore,* American Petroleum Institute, Publication No. 4452, Washington, DC, p. 459-464 (1987).

Baker, J.M., J.H. Crothers, D.I. Little, J.H. Oldham et C.M. Wilson, «Comparison of the Fate and Ecological Effects of Dispersed and Nondispersed Oil in a Variety of Intertidal Habitats», *Oil Spill Chemical Dispersants: Research, Experience and Recommendations*, T.E. Allen (éd.), American Society for Testing and Materials, STP 840, Philadelphia, p. 239-279 (1984).

Baker, J.M., L. Guzman, P.D. Bartlett, D.I. Little et C.M. Wilson, «Long-term Fate and Effects of Untreated Thick Oil Deposits on Salt Marshes». *Proceedings of the 1993 International Oil Spill Conference.*, American Petroleum Institute, Publication No. 4580, Washington, DC, p. 395-399 (1993).

Barbara, M.A. et P.T. Chung, «A Catalog of Oil Properties», Environnement Canada, Division des techniques d'urgences environnementales, rapport EE-77, Ottawa, Ontario, 2824 p. (1986).

Bascom, W., «Waves and Beaches», Anchor Books, New York, NY, 267 p. (1964).

Beals, C.S. (éd.), Science, History and Hudson Bay, Énergie, Mines et Ressources Canada, 2 vol., Ottawa, Ontario (1968).

Benson, R.L., R.S. LeGore et D. Pascoe, «A Mechanized Approach to Beach Cleanup in Saudi Arabia», *Proceedings of the 1993 International Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute, Publication No. 4580, Washington, DC, p. 123-126 (1993).

Bird, J.B., «The Physiography of Arctic Canada», The Johns Hopkins Press, Baltimore, 336 p. (1967).

Bird, J.B., «Arctic Canada», *The World's Coastline*, E.C.F. Bird and M.C. Schwartz (éd.), Van Nostrand Reinhold, New York, NY, p. 241-251 (1985).

Blake, W., «Radiocarbon Age Determination and Post-glacial Emergence at Cape Storm, Southern Ellesmere Island, Arctic Canada», *Geogr. Ann. Ser. A*, v. 57, 1-71 (1975).

Blount, A.E., Two Years after the Metula Oil Spill, Strait of Magellan, Chile: Oil Interaction with Coastal Environments, Department of Geology, University of South Carolina, Columbia,

Unpublished Technical Report No. 16-CRD, 207 p. (1978).

Boehm, P.D., D.S. Page, E.S. Gilfillan, W.A. Stubblefield et E.J. Harner, «Shoreline Ecology Program for Prince William Sound, Alaska, Following the *Exxon Valdez* Oil Spill - Part 2, Chemistry and Toxicology», *Third Symposium on Environmental Toxicology and Risk Assessment: Aquatic, Plant and Terrestrial*, ASTM STP(D)1, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (in press).

Boulden, R.S. (éd.), «Canada - Ontario Great Lakes Shore Damage Survey», rapport technique, Environnement Canada et ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 97 p. (1975).

Bowen, A.J. et D.L. Inman, «Rip Currents, 2: Laboratory and Field Observations», *J. Geophys. Res., 74,* p. 5479-90 (1969).

Bowen, A.J., D.P. Edmond, D.J.W. Piper et D.A. Welsh, «The Maintenance of Beaches», Technical Report, Institute for Environmental Studies, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia, 582 p. (1975).

Boyd, G.L., «Canada/Ontario Great Lakes Erosion Monitoring Programme - Final Report 1973/1980», Ocean Science and Surveys, Pêches et Océans Canada, Laboratoire Bayfield, série des rapports manuscrits, n° 12, Burlington, Ontario, 200 p. (1981a).

Boyd, G.L., «The March 1978 Lakeshore Ice Piling event on Lake St. Clair, Ontario», *Procès-verbal : Atelier sur l'action des glaces sur les rivages*, J.-C. Dionne (éd.), Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 1-13 (1981b).

Boyd, G.L., «A Geomorphic Model of Bluff Erosion on the Great Lakes», *Procès-verbal : Symposium sur les littoraux cohésifs*, M.G. Skafel, (éd.), Burlington, Ontario, du 5 au 7 mai, Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, Ottawa, Ontario, p. 60-68 (1986).

Boyd, R. et S. Penland,«Shoreface Translation and the Holocene Stratigraphic Record - Examples from Nova Scotia, the Mississippi Delta and Eastern Australia», *Mar. Geol., 60,* p. 391-412 (1984).

Boyd, R., A.J. Bowen et R.K. Hall, «An Evolutionary Model for Transgressive Sedimentation on the Eastern Shore of Nova Scotia», *Glaciated Coasts*, D.M. Fitzgerald and P.S. Rosen (éd), Academic Press, Inc., New York, NY, p. 88-114 (1987).

Bragg, J.R. et S.H. Yang, «Clay-oil Flocculation and its Effects on the Rate of Natural Cleansing in Prince William Sound Following the *Exxon Valdez* Oil Spill», *Third Symposium on Environmental Toxicology and Risk Assessment: Aquatic, Plant and Terrestrial*, ASTM STP(D)1, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1992).

Bragg, J.R., R.C. Prince, E.J. Harner et R.M. Atlas, «Bioremediation Effectiveness Following the *Exxon Valdez* Spill», *Proceedings of the 1993 International Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute,

Publication No. 4580, Washington, DC, p. 435-447 (1993).

Brebner, A. et B. LeMehaute, «Wind and Waves at Cobourg, Lake Ontario», Queens University, Civil Engineering Department, Report No. 19, 44 p. (1961).

Bruun, P., «Migrating Sand Waves and Sand Humps, with Special Reference to Investigations Carried out on the Danish North Sea Coast», *Proceedings of the 5th Conference on Coastal Engineering*, p. 269-295 (1955).

Bryant, E.A. et S.B. McCann, «Long and Short Term Changes in the Barrier Islands of Kouchibouguac Bay, Southern Gulf of St. Lawrence», *Marit. Sediments*, *8*(3), p. 101-103 (1973).

Cameron, H.L., «The Shifting Sands of Sable Island», *Geogr. Rev.*, *55*(4), p. 463-476 (1965).

Cameron, G.D.M., R.B. Taylor, D.L. Forbes, D.L. et M.A. Best, «Coastal Geomorphology of Eastern Canada», *Géologie de la marge continentale de l'est du Canada*, M.J. Keen and G.L. Williams (éd.), Commission géologique du Canada, *Géologie du Canada*, nº 2, figure 4 (échelle de 1:2 millions) (1990).

Canada-États-Unis, «Coordinated Great Lakes Physical Data», Unpublished Report of Coordinating Committee on Great Lakes Basic Hydraulic and Hydrologic Data, Cornwall, Ontario, 12 p. (1977).

Carefoot, T., «Pacific Seashores: A Guide to Intertidal Ecology», J.J. Douglas Ltd., Vancouver, Colombie-Britannique, 208 p. (1977).

Carter, C.H. et W.S. Haras, «Great Lakes», *The World's Coastline*, E.C.F. Bird and M.C. Schwartz, (éd.), Van Nostrand Reinhold, New York, NY, p. 253-260 (1985).

Carter, R.W.G., J.D. Orford, D.L. Forbes et R.B. Taylor, «Gravel Barriers, Headlands and Lagoons: An Evolutionary Model», *Coastal Sediments '87*, New Orleans, LA, American Society of Civil Engineers, New York, NY, p. 1776-1792 (1987).

Castle, R.W., C.R. Foget et E. Schrier, «Manual of Practice - Chemical Treating Agents in Oil Spill Control», United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Cincinnati, OH, 137 p. (1982).

Chamberlin, D.W., J.L. Siva, E.R. Mancini et R.A. Levine, «The Arco Anchorage Oil Spill, a Review», *Compte rendu : Huitième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 385-396 (1987).

Clague, J.J. et B.D. Bornhold, «Morphology and Littoral Processes of the Pacific Coast of Canada», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10,Ottawa, Ontario, p. 339-380 (1980).

Clague, J., J.R. Harper, R.J. Hebda et D.E. Howes, «Late Quaternary Sea Levels and Crustal Movements, British

Columbia», *Can. J. Earth Sci., 19,* p. 597-618 (1982).

Clemens, R.H., «Selected Environmental Criteria for the Design of Artificial Structures on the Southeast Shore of Lake Erie», University of South Carolina, Department of Geology, Technical Report CRD No. 8, 95 p. (1976).

Coakley, J.P., «Natural and Artificial Tracer Experiments in Lake Ontario», *Proceedings of the 13th Conference on Great Lakes Research,* p. 198-209 (1970).

Coakley, J.P., «The Formation and Evolution of Point Pelee, Western Lake Erie», *Can. J. Earth Sci., 13*(1), p. 136-144 (1976).

Coakley, J.P., «Postglacial Evolution and Modern Processes at Point Pelee, Lake Erie», *The Coastline of Canada,* S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 429-437 (1980).

Cole, A.L., «Hindcast Waves for the Western Great Lakes», *Proceedings of the 14th Conference on Great Lakes Research,* p. 412-421 (1971).

Collin, A.E., «Oceanography of Lancaster Sound», Ph.D. thesis, McGill University (1962).

CONCAWE, «A Field Guide to Coastal Oil Spill Control and Cleanup Techniques», Oil Spill Cleanup Technology Special Task Force No. 1, Den Haag, 112 p. (1981).

Cooper, E.J., R.E. McColl et F. Smith, «Measurements of Canada's Coastline», Service hydrographique canadien, rapport inédit, 34 p. (1971).

Craig, B.G. et J.G. Fyles, «Pleistocene Geology of Arctic Canada», Commission géologique du Canada, communication nº 60-10, 21 p. (1960).

Croley, T.E., III, «Understanding Recent High Great Lakes Water Levels», Great Lakes Env. Res. Lab., Contribution No. 499, Ann Arbour, Michigan, 11 p. (1986).

Cry, G.W., «Tropical Cyclones of the North Atlantic Ocean», United States Department of Commerce, Weather Bureau, Technical Communication No. 55, 148 p. (1965).

Dalrymple, R.W., R.J. Night et G.V. Middleton, «Intertidal Sand Bars in Cobequid Bay (Bay of Fundy)», *Estuarine Research,* vol. 2, L.E. Cronin (éd.), Academic Press, New York, NY, p. 293-307 (1975).

D'Anglejan, B., «Effects of Seasonal Changes on the Sedimentary Regime of a Subarctic Estuary, Rupert Bay (Canada)», *Sediment. Geol., 26,* p. 51-68 (1980).

Davidson-Arnott, R.G.D., «Erosion of the Nearshore Profile in Till: Rates, Controls and Implications for Shoreline Protection», *Procès-verbal : Symposium sur les littoraux cohésifs,* M.G. Skafel (éd.), , Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 137-149 (1986).

Davidson-Arnott, R.G.D. et S.M.N. Amin, «Application of Computer Modeling

and Sediment Budget Techniques to Shore Erosion Problems, S.W. Lake Ontario», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1983*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 253-267 (1983).

Davidson-Arnott, R.G.D. et R.W. Askin, «Factors Controlling Erosion of the Nearshore Profile in Overconsolidated Till, Grimsby, Lake Ontario», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 123-199 (1980).

Davidson-Arnott, R.G.D. et B. Greenwood, «Facies Relationships on a Barred Coast, Kouchibouguac Bay, New Brunswick», *Beach and Nearshore Sedimentation*, R.A. Davis, Jr., and R.L. Ethington (éd.), Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication No. 24, p.149-168 (1976).

Davidson-Arnott, R.G.D et R.D. Kreutzwiser, «Coastal Processes and Shoreline Encroachment: Implications for Shoreline Management in Ontario», *Can. Geogr.*, *29*(3), p. 256-262 (1985).

Davidson-Arnott, R.G.D. et G.F. Pember, «Morphology and Sedimentology of Multiple Parallel Bar Systems, Southern Georgian Bay, Ontario», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 417-428 (1980).

Davies, J.L., «Geographical Variation in Coastal Development», Oliver and Boyd, Edinburgh, 204 p. (second ed., 1980, 212 p.) (1972).

Davis, R.A., Jr. et W.T. Fox, «Beach and Nearshore Dynamics in Eastern Lake Michigan», Technical Report No. 4, ONR Contract 388-092, 145 p. (1971).

Davis, R.A., Jr., W.T. Fox, M.O. Hayes et J.C. Boothroyd, «Comparison of Ridge and Runnel Systems in Tidal and Non-tidal Environments», *J. Sediment. Petrol., 42*, p. 413-421 (1972).

Deslauriers, P.C., B.J. Morson et E.J. Sobey, «Field Manual for Oil Spills in Cold Climates», United States Environmental Protection Agency, Report EPA-600/8-82-011, Cincinnati, OH, 161 p. (1982).

Dickins, D.F., L. Martin, I. Bjerkelund, S. Potter, D. Erickson, J. Harper, P. Norton, S. Johnson et P. Vonk, «Environmental Atlas for Beaufort Sea Oil Spill Response», Environnement Canada, publié par D.F. Dickins, Assoc. Ltd., Vancouver, Colombie-Britannique, 182 p. (1987) (voir également *Compte rendu : Huitième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 423-447.

Dickins, D.F., I. Bjerkelund, P. Vonk, S. Potter, K. Finley, R. Stephen, C. Holdsworth, D. Reimer, A. Godon, W. Duval, I. Bulst et A. Sekerak, «Lancaster Sound Region - A Coastal Atlas for Environmental Protection», Environnement Canada, Protection de l'environnement, Yellowknife, Yukon (1990a).

Dickins, D.F., H. Rueggeberg, M. Poulin, I. Bjerkelund, J. Haggarty, L. Solsberg, J. Harper, A. Godon, D. Reimer,

J. Booth et K. Neary, «Oil Spill Response Atlas for the Southwest Coast of Vancouver Island», Department of the Environment, British Columbia, Environmental Emergencies and Coastal Protection Branch, Victoria, British Columbia (1990b).

Dionne, J.-C., «Schorre Morphology on the South Shore of the St. Lawrence Estuary», *Am. J. Sci., 266*(5), p. 380-388 (1968).

Dionne, J.-C., «Aspects morpho-sédimentologiques du glaciel, en particulier des côtes du Saint-Laurent, thèse, Université de Paris, 412 p. (1972) (voir aussi le Laboratoire d'écologie forestière, Université de Sherbrooke, rapport QF-X-9, Sherbrooke, Québec, 324 p.)

Dionne, J.-C., «Les glaces comme agent littoral sur la côte orientale de la Baie de James, Québec», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 80-92 (1980a).

Dionne, J.-C., «An Outline of the Eastern James Bay Coastal Environments», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 311-338 (1980b).

Dionne, J.-C., «A Boulder-strewn Tidal Flat, North Shore of the Gulf of St. Lawrence, Quebec», *Géographie physique et quaternaire, 35*, p. 261-267 (1981a)

Dionne, J.-C., «Ice Action in Muddy Tidal Flats, Middle St. Lawrence Estuary», *Procès-verbal : Atelier sur l'action des glaces sur les rivages*, J.-C. Dionne (éd.), Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 81-87 (1981b).

Dionne, J.-C., «An Estimate of Ice-drifted Sediments Based on Mud Content of Ice Cover at Montmagny, Middle St. Lawrence Estuary», *Mar. Geol, 57*, p. 149-166 (1984).

Dionne, J.-C., «L'érosion anthropique des marais intertidaux de Saint-Laurent» D.L. Forbes (éd.), *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1985,* Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 547-568 (1985).

Dohler, G., «Tides in Canadian Waters», Service hydrographique canadien, Direction générale des services de la mer, Ottawa, Ontario, 14 p. (1969).

Dolan, R., «Coastal Landforms; Crescentic and Rhythmic», Geol. Soc. Am. Bull., 82, p. 177-180 (1971).

Dolan, R., B. Hayden, G. Hornberger, J. Zieman et M. Vincent, «Classification of the Coastal Environments of the World, Part 1, The Americas», Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Technical Report No. 1, 163 p. (1972).

Dome Petroleum Ltd., Esso Ressources Canada, Ressources Gulf Canada, «Environmental Impact Statement for Hydrocarbon Development in the Beaufort Sea - Mackenzie Delta Region», 7 vol., Calgary, Alberta (1982).

Douglas, R.J.W. (éd.), «Geology and Economic Minerals of Canada», Commission géologique du Canada, *Econ. Geol. Rept. No. 1*, 5e édition, 823 p. (1970).

Drake, J.J. et S.B. McCann, «The Movement of Isolated Boulders on Tidal Flats by Ice Floes», *Can. J. Earth Sci., 19* (4), p. 748-754 (1982).

Drapeau, G., «Natural Cleaning of Oil Polluted Shores» *Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference,* Vancouver, Colombie-Britannique, American Society of Civil Engineers, New York, NY, p. 2557-2575 (1973).

Dubois, J.M.M., «Essai de classification de la zone cotière et d'identification d'unités physiographiques sur la côte nord du Saint-Laurent», Travaux publics Canada, Montréal, *Étude des rives du St-Laurent*, 71 p. et annexes (1973).

Dubois, J.M.M., «Géomorphologie du littoral de la côte nord du Saint-Laurent : Analyse sommaire», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 215-238 (1980).

Dunbar, M. et K.R. Greenaway, «Arctic Canada from the Air», Conseil de recherches pour la défense, Ottawa, Ontario, 541 p. (1956).

Duncan, J.R., «The Effects of Water Table and Tidal Cycle on Swash-backwash Sediment Distribution and Beach Profile Development», *Mar. Geol., 2*, p. 186-197 (1964).

Duval, W.S. (éd.), «A Review of the Biological Fate and Effects of Oil in Cold Marine Environments», rapport inédit d'ESL Environmental Services Ltd., S.L. Ross Environmental Research Ltd. et Arctic Laboratories Ltd. pour Environnement Canada, Service de la protection de l'environnement, Edmonton, Alberta, 242 p. (1985).

Eis, S. et D. Craigdallie, «Shore and Landscape Analysis of the Western Section of the Capital Region District of British Columbia», Environnement Canada, Service de la forestrie, rapport BC-X-208, Victoria, Colombie-Britannique, 22 p. et cartes (1980).

Environnement Canada, «The Fraser River Estuary», région du Pacifique, groupe de travail sur les estuaires, série spéciale sur les estuaires, nº 1, 518 p. (1974).

Environnement Canada, «The Squamish River Estuary», région du Pacifique, groupe de travail sur les estuaires, série spéciale sur les estuaires, nº 2, 361 p. (1975a).

Environnement Canada, «The Skeena River Estuary», région du Pacifique, groupe de travail sur les estuaires, série spéciale sur les estuaires, nº 3, 418 p. (1975b).

Environnement Canada, «The Cowichan - Chemainus River Estuaries», région du Pacifique, groupe de travail sur les estuaires, série spéciale sur les estuaires, nº 4, 328 p. (1976a).

Environnement Canada, «The Nanaimo River Estuary», région du Pacifique, groupe de travail sur les estuaires, série

spéciale sur les estuaires, n° 5, 298 p. (1976b).

Environnement Canada, «The Kitimat River Estuary», région du Pacifique, groupe de travail sur les estuaires, série spéciale sur les estuaires, n° 6, 296 p. (1976c).

Environnement Canada, «The Campbell River Estuary», région du Pacifique, groupe de travail sur les estuaires, série spéciale sur les estuaires, n° 7, 346 p. (1977).

Environnement Canada, «The Courtenay River Estuary», région du Pacifique, groupe de travail sur les estuaires, série spéciale sur les estuaires, n° 8, 355 p. (1979).

Environnement Canada, Monthly and Yearly Mean Water Levels, v. 1, Inland, Marine Environmental Data Service, Ottawa, Ontario, 145 p. (1975).

Environnement Canada, «Coastal Resources Folio - East Coast of Vancouver Island», Direction générale des terres, Vancouver, Colombie- Britannique, plusieurs volumes (1981).

Environnement Canada, «Guidelines on the Use and Acceptability of Oil Spill Dispersants», 2e édition, Direction des services techniques, Ottawa, Ontario, 31 p. (1984).

Environnement Canada, «Living with the Great Lakes; The Great Lakes Water Levels Communications Center», Burlington, Ontario, 8 p. (1987).

Environnement Canada, *Oilspill SCAT Manual for the Coastlines of British Columbia*, préparé par Woodward-Clyde Consultants pour la Direction du développement technologique, Conservation et Protection, Environnement Canada, Edmonton, Alberta, 245 p. (1992).

Environnement Canada et ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, «Canada - Ontario Great Lakes Shore Damage Survey - Coastal Zone Atlas», 637 p. (1973).

EPA (Environmental Protection Agency des États-Unis), «Oil Spill Decisions for Debris Disposal, vol. 1 - Procedures Manual», Office of Research and Development, Cincinnati, OH, 101 p. (1977).

Evans, O.F., «Mass Transportation of Sediments on Subaqueous Terraces», *J. Geol., 47*, p. 325-334 (1939).

Exxon Corporation, «Oil Spill Cleanup Manual: vol. 2, Response Guidelines», Unpublished Report, Houston, Texas, 124 p. (1979).

Fingas, M.F., W.S. Duval et G.B. Stevenson, «Principes fondamentaux du nettoyage des déversements d'hydrocarbures : compte tenu spécialement du sud du Canada», Direction des interventions d'urgence, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, 155 p. (1979).

Finley, R.C., «Morphologic Development and Dynamic Processes of a Barrier Island Inlet, North Inlet, S.C.», *Estuarine Research, vol. 2 - Geology and Engineering*, L.E. Cronin (éd.), Academic Press, New York, NY, p. 277-292 (1975).

Foget, C.R., E. Schrier, M. Cramer et R.W. Castle, Manual of Practice for Protection and Cleanup of Shorelines. I: Decision Guide. II: Implementation Guide, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency, Report EPA-600/7-/78-187 (a and b), Cincinnati, 283 p. (1979).

Forbes, D.L., «Sedimentary Processes and Sediments, Babbage River Delta, Yukon Coast», Commission géologique du Canada, communication nº 75-1B, Ottawa, Ontario, p. 157-160 (1975).

Forbes, D.L., «Sources of Sand Contributing to Harbour Shoaling at Pte. Sapin, New Brunswick», Procès-verbal : *Atelier sur l'érosion et l'ensablement des rivages de l'Atlantique, Halifax, novembre 1982*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 51-58 (1982).

Forbes, D.L., «Coastal Geomorphology and Sediments of Newfoundland», *Recherches en cours - partie B*, Commission géologique du Canada, communication nº 84-1B, Ottawa, Ontario, p. 11-24 (1984).

Forbes, D.L., «Shoreface Sediment Distribution and Sand Supply at C2S2 Sites in the Southern Gulf of St. Lawrence», *Coastal Sediments '87*, N.C. Kraus (éd.), American Society of Civil Engineering, New York, NY, p. 694-709 (1987).

Forbes, D.L. et D. Frobel, «Coastal Erosion and Sedimentation in the Canadian Beaufort Sea», *Recherches en cours - partie B*, Commission géologique du Canada, communication no 85-1B, Ottawa, Ontario, p. 69-80 (1985).

Forbes, D.L. et D. Frobel, «Coastal Video Survey - Canadian Beaufort Sea», Commission géologique du Canada, dossier public 1256, Ottawa, Ontario (1986).

Forbes, D.L. et R. B. Taylor, «Coarse-grained Beach Sedimentation under Paraglacial Conditions, Canadian Atlantic Coast», *Glaciated Coasts*, D. Fitzgerald and P. Rosen (éd.), Academic Press, Inc., New York, NY, p. 51-86 (1987).

Forbes, D.L., R.B. Taylor et D. Frobel, «Coastal Studies in the Western Arctic Archipelago (Melville, Mackenzie King, Lougheed, and Nearby Islands)», Commission géologique du Canada, dossier public 1409, Ottawa, Ontario, 29 p. (1986).

Forbes, D.L., R.B. Taylor, J. Shaw, R.W.G. Carter et J.D. Orford, «Development and Stability of Barrier Beaches on the Atlantic Coast of Nova Scotia», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1990,* du 8 au 11 mai, Kingston, Ontario, ACOS, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 83-98 (1990).

Fox, W.T. et R.A. Davis Jr., «Beach Processes on the Oregon Coast», ONR Technical Report No. 12, contract 388-092, 81 p. (1974).

Fusey, P. et J. Oudet, «Relative Influence of Physical Removal and Biodegradation in the Depuration of Petroleum-Contaminated Seashore Sediments», *Mar. Pollut. Bull.*, *15*(4), p. 136-141 (1984).

Galvin, C.J., «Breaker Type Classification on Three Laboratory Beaches», *J. Geophys. Res., 73*(12), p. 3651-3659 (1968).

Ganong, W. F., «The Vegetation of the Bay of Fundy Salt and Diked Marshes: An Ecological Study», *Bot. Gaz., 36*, p. 161-186, 280-302, 349-367 et 429-455 (1903).

Garrett, C.J.R., «Tidal Resonance in the Bay of Fundy and Gulf of St. Lawrence», *Nature, 238*, p. 441-443 (1972).

Getter, C.D., G. Cintron, B. Dicks, R.R. III Lewis et E.D. Seneca, «The Recovery and Restoration of Salt Marshes and Mangroves Following an Oil Spill», *Restoration of Habitats Impacted by Oil Spills*, J. Cairns and A.L. Buikema (éd.), Ann Arbor Science Book, Butterworth, Stoneham, Mass., p. 65-114 (1984).

Gilbert, R., «The Movement of Gravel by the Alga *Fucus vesiculosus* (L.) on an Arctic Tidal Flat», *J. Sediment. Petrol., 54*(2), p. 463-468 (1984).

Gilbert, R. et A.E. Aitkin, «The Role of Sea Ice in Biophysical Processes on Intertidal Flats at Pangnirtung (Baffin Island), N.W.T.», Procès-verbal : Atelier sur l'action des glaces sur les rivages, J.-C. Dionne (éd.), Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 89-103 (1981).

Gilfillan, E.S., D.S. Page, E.J. Harner et P.D. Boehm, «Shoreline Ecology Program for Prince William Sound, Alaska, Following the *Exxon Valdez* Oil Spill - Part 3, Biology», *Third Symposium on Environmental Toxicology and Risk Assessment: Aquatic, Plant and Terrestrial,* American Society for Testing and Materials, ASTM STP(D)1, Philadelphia, PA (in press).

Glass, D.J. (éd.), «Geology of Vancouver Area, British Columbia: Guidebook for Field Excursions A05-C05», Congrès géologique international, Montréal, Québec, 47 p. (1972).

Gordon, D.C., Jr. et C. Desplanque, «Ice Dynamics in the Chignecto Bay Region of the Bay of Fundy», *Procès-verbal : Atelier sur l'action des glaces sur les rivages*, J.-C. Dionne (éd.), Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 35-52 (1981).

Grant, D.R., «Recent Coastal Submergence of the Maritime Provinces», *Proceedings of the Nova Scotia Institute of Science, 27*, suppl. 3, p. 83-102 (1975).

Great Lakes Basin Commission, «Great Lakes Basin Framework Study: Appendix 11 - Levels and Flows», Great Lakes Basin Commission, Ann Arbor, Michigan, 207 p. (1975).

Greenwood, B. et R.G.D. Davidson-Arnott, «Marine Bars and Nearshore Sedimentary Processes, Kouchibouguac Bay, New Brunswick», *Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation,* J. Hails and A. Carr (éd.), Wiley & Sons, New York, NY, p. 123-150 (1975).

Greenwood, B. et R.G.D. Davidson- Arnott, «An Interpretive Study of Coastal Processes, Kouchibouguac National Park, New Brunswick», rapport inédit pour Parcs Canada, Affaires indiennes

et du Nord canadien, Ottawa, Ontario, 298 p. (1977).

Groupe spécial de l'opération «hydrocarbures», *Nettoyage du mazout répandu par* l'Arrow dans la baie *Chédabouctou*, vol, I, rapport au ministre des Transports, Ottawa, Ontario, 45 p. (1970a).

Groupe spécial de l'opération «hydrocarbures», *Nettoyage du mazout répandu par l'*Arrow dans la baie *Chédabouctou,* vol, II, rapport au ministre des Transports, Ottawa, Ontario, 106 p. (1970b).

Groves, S., W.G. Green et J.R. Harper, «Queen Charlotte Islands Coastal Zone: Digital Mapping and Linked Data Base Systems», ESRF Report 85, Ottawa, Ontario, 115 p. (1988).

Guimont, P. et C. Laverdiere, «Le sud-est de la mer d'Hudson: un relief de cuesta», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication no 80-10, Ottawa, Ontario, p. 303-309 (1980).

Gundlach, E.R., «Oil-holding Capacities and Removal Coefficients for Different Shoreline Types to Computer Simulate Spills in Coastal Waters», *Proceedings of the 1987 International Oil Spill Conference*, Publication No. 4452, American Petroleum Institute, Washington, DC, p. 451-457 (1987).

Gundlach, E.R. et M.O., Hayes, «Vulnerability of Coastal Environments to Oil Spill Impacts», *Mar. Technol. Soc. J. 12*(4), p. 18-27 (1978).

Gundlach, E.R., C.H., Ruby, M.O., Hayes et E. Blount, «The *Urquiola* Oil Spill, La Coruna, Spain - Impact and Reaction on Beaches and Rocky Coasts», *Environ. Geol. Water Sci., 2*(3), p. 131-143 (1978).

Gundlach, E.R., C.D. Getter et M.O. Hayes, «Sensitivity of Coastal Environments to Spilled Oil: Strait of Juan de Fuca and Northern Puget Sound», prepared for N.O.A.A., Contract No. NA79RAC0016 (1980).

Gundlach, E.R., P.D. Boehm, M. Marchand, R.M. Atlas, D.M. Ward et D.A. Wolfe, «The Fate of *Amoco Cadiz* Oil», *Science, 221*, p. 122-129 (1983).

Haggarty, J.C., C.B. Wooley, J.M. Erlandson et A. Crowell, «The 1990 Exxon Cultural Resource Program - Site Protection and Maritime Cultural Ecology in Prince William Sound and the Gulf of Alaska», Exxon Shipping Co. and Exxon Co. USA, Anchorage, Alaska, 339 p. (1991).

Hale, P.B. et S.B. McCann, «Rhythmic Topography in a Mesotidal, Low-wave Energy Environment», *J. Sediment. Petrol., 52*, p. 415-430 (1982).

Hann, R.W., L. Rice, M-C. Trujillo et H.H. Young, «Oil Spill Cleanup Activities, the Amoco Cadiz *Oil Spill*», W.N. Hess (éd.), NOAA/EPS Special Report, Washington, DC, p. 229-275 (1978).

Harper, J.R., «The Physical Processes Affecting Stability of Tundra Cliff Coasts», unpublished Ph.D. dissertation, Louisiana State University, Baton Rouge, 212 p. (1978).

Harper, J.R., «Seasonal Changes in Beach Morphology along the B.C. Coast», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 136-150 (1980a).

Harper, J.R., «Coastal Processes on Northeastern Graham Island, Queen Charlotte Islands, B.C.», *Recherches en cours - partie A*, Commission géologique du Canada, communication nº 80-1A, Ottawa, Ontario, p. 13-18 (1980b).

Harper, J.R., «Coastal Landform Inventory of the West Coast Trail, Pacific Rim National Park», rapport inédit de Woodward-Clyde Consultants pour Parcs Canada, Région de l'Ouest, Calgary, Alberta, 143 p. (1981).

Harper, J.R. et E.H. Owens, «Coastal Regions and Landforms of British Columbia», *Coastal Zone Management in British Columbia*, B. Sadler (éd.), University of Victoria, Department of Geography, Cornett Occasional Paper No. 3, p. 29-51 (1983).

Harper, J.R. et B. Sawyer, «Coastal Analysis of the Long Beach Segment and the Broken Islands Group, Pacific Rim National Park», préparé par Woodward-Clyde Consultants pour Parcs Canada, Calgary, Alberta (1983).

Harper, J.R., G.A. Miskulin, D.R. Green, D. Hope et J.H. Vandermeulen, «Experiments on the Fate of Oil in Low Energy Marine Environments», *Compte rendu : Huitième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario (1985a).

Harper, J.R., R.D. Reimer et A.D. Collins, «Canadian Beaufort Sea Physical Shore-zone Analysis», rapport inédit préparé pour la Commission géologique du Canada et le ministère des Affaires indiennes et du Nord canadien par Dobrocky Seatech Ltd., Ottawa, Ontario 105 p. (1985b).

Harper, J.R., D.F. Dickins, D. Howes et G. Sergy, «Recent Shoreline Mapping Projects in British Columbia and Significance to Oil Spill Counter Measure Planning», *Compte rendu : Quinzième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 293-300 (1992).

Hattersley-Smith, G., «The Ward Hunt Ice Shelf: Recent Changes of the Ice Front», *J. Glaciol., 4*, p. 415-424 (1963).

Hayes, M.O., «Hurricanes as Geological Agents: Case Studies of Hurricanes Carla, 1961, and Cindy, 1963», Bureau of Economic Geology, the University of Texas, Austin, Report of Investigations No. 61, 56 p. (1967).

Hayes, M.O., «Forms of Sediment Accumulation in the Beach Zone», *Waves and Beaches*, Academic Press, New York, NY, p. 297-356 (1972).

Hayes, M.O., «Morphology of Sand Accumulation in Estuaries», *Estuarine Research, vol. 2* - Geology and Engineering, L.E. Cronin (éd.), Academic Press, New York, NY, p. 3-22 (1975).

Hayes, M.O. et J.C. Boothroyd, «Storms as Modifying Agents in the Coastal Zone», *Coastal Environments: NE Massachusetts and NH*, Hayes, M.O. (éd.), contribution No. 1-CRG, University of Massachusetts, Department of Geology, p. 245-265 (1969).

Hayes, M.O., E.H. Owens, D.K. Hubbard et R.W. Abele. «The Investigation of Form and Processes in the Littoral Zone», *Coastal Geomorphology*, D.L. Coates (éd.), Publication in Geomorphology, S.U.N.Y., Binghamton, New York, NY, p. 11-41 (1973).

Hayes, M.O., J. Michel et D.C. Noe, «Factors Controlling Initial Deposition and Long-term Fate of Spilled Oil on Gravel Beaches», Proceedings of the 1991 International Oil Spill Conference, American Petroleum Institute, Publication No. 4529, Washington, DC, p. 453-465 (1991).

Hess, W.N. (éd.), «The Amoco Cadiz Oil Spill», NOAA/EPS Special Report, Washington, DC, 281 p. (1978).

Hill, P.R., D.L. Forbes, S.R. Dallimore et P. Morgan. «Examples of Shoreface Development in the Beaufort Sea», *Procès-verbal : Symposium sur les littoraux cohésifs*, M.G. Skafel (éd.) Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 428-448 (1986).

Hine, A.C., «Bedform Distribution and Migration Patterns on Tidal Deltas in the Chatham Harbor Estuary, Cape Cod, Massachusetts», *Estuarine Research, vol. 2, Geology and Engineering*, L.E. Cronin (éd.), Academic Press, New York, NY, p. 235-252 (1975).

Hine, A.C., «Mechanisms of Berm Development and Resulting Beach Growth along a Barrier Spit Complex», *Sedimentology, 26*, p. 333-351 (1979).

Hoff, R., «Biorestauration : une mesure d'intervention en cas de déversement de pétrole en mer», *Bulletin de la lutte contre les déversements, 17*(1) : 1-14 (1992).

Holden, B.J., «Whiffen Spit, An Investigation of Erosion», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 324-336 (1980).

Holland, S.S., *Landforms of British Columbia*, British Columbia Department of Mines and Petroleum Resources, bull. 48, 138 p. (1976).

Hom-ma, M. et C.J. Sonu. «Rhythmic Patterns of Longshore Bars Related to Sediment characteristics», *Procedure of the Eighth Coastal Engineering Conference, Mexico City*, American Society of Civil Engineers, New York, NY, p. 1-29 (1962).

Hough, J.L., «Great Lakes», *Encyclopedia of Geomorphology*, R.W. Fairbridge (éd.), Reinhold, New York, NY, p. 499-506 (1968).

Howes, D.E. et J.R. Harper, «Physical Shorezone Analysis of the Saanich Peninsula», MOE Technical Report 9, British Columbia Ministry of Environment, Victoria, British Columbia, 42 p. (1984).

Howes, D.E., P. Wainwright, R. Baird, L. Berg, J. Cooper, J.M. Haggarty, J.R. Harper, E.H. Owens, P.D. Reimer et K. Summers, «Oil Spill Response Atlas for the Southern Strait of Georgia», Environmental Emergency Services Branch, Ministry of Environment, Victoria, British Columbia (1992).

Hubbard, D.K., «Morphology and Hydrodynamics of Merrimack River Ebb-tidal Delta», *Estuarine Research, vol. 2 - Geology and Engineering*, L.E. Cronin (éd.), Academic Press, New York, NY, p. 253-266 (1975).

Hughes, D.E. et S. Stafford, «Bacterial Degradation of Crude Oil», in J. Wordley Smith, p. 39-46 (1976).

Humphrey, B., G.A. Sergy et E.H. Owens, «Stranded Oil Persistence in Cold Climates», Compte *rendu : 13e Colloque technique des déversements d'hydrocarbures en mer et dans l'Arctique (AMOP),* Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 401-410 (1990).

Humphrey, B., E.H. Owens et G. Sergy, «Long-term Results from the BIOS Shoreline Experiment - Surface Oil Cover», Proceedings of the International Oil Spill Conference, *San Diego, CA*, American Petroleum Institute, Publication No. 4529, Washington, DC, p. 447-452 (1991).

Humphrey, B., E.H. Owens et G.A. Sergy, Sort et persistance du pétrole brut échoué : survol sur neuf années du projet BIOS, île de Baffin (T.N.-O.), Canada, Environnement Canada, rapport SPE 3/SP/4, Ottawa, Ontario, 46 p. (1992).

Hunter, S., «The Oiling of ICS», *Proceedings of the International Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute, Publication No. 4580, Washington, DC, p. 25-30 (1993).

Industry Task Group, «Oil Spill Response in the Arctic. Part 1 - An Assessment of Containment, Recovery and Disposal Techniques», Shell Oil Co., Sohio Alaska Petr. Co., Exxon Co. U.S.A., and Amoco Prod. Co., Anchorage, Alaska (1983).

Industry Task Group, «Oil Spill Response in the Arctic. Part 3 - Technical Documentation», Shell Oil Co., Sohio Alaska Petr. Co., Exxon Co. U.S.A., and Amoco Prod. Co., Anchorage, Alaska, 76 p. (1984).

Inman, D.L. et C.E. Nordstrom, «On the Tectonic and Morphologic Classification of Coasts», *J. Geol., 79,* p. 1-121 (1971).

I.T.O.P.F. (International Tanker Owners Pollution Federation), «Response to Marine Oil Spills», published by Witherby & Co., London, 115 p. (1987).

Jahns, H.O., J.R. Bragg, L.C. Dash et E.H. Owens, «Natural Cleaning of Shorelines Following the Exxon Valdez Spill», *Proceedings of the 1991 International Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute, Publication No. 4529, Washington, DC, p. 167-176 (1991).

James, N.P. et D.J. Stanley, «Sable Island Bank off Nova Scotia: Sediment Dispersal and Recent History», *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull., 52*(11), p. 2208-2230. (1968).

Jeffries, M.O., «Ice Island Calvings and Ice Shelf Changes, Milne Ice Shelf and Ayles Ice Shelf, Ellesmere Island, N.W.T.», *Arctic, 39*(1), p. 15-19 (1986).

Jeffries, M.O., «The Growth, Structure and Disintegration of Arctic Ice Shelves», *Polar Rec., 23*(147), p. 631-649 (1987).

Johnson, D.W., «Beach Cusps», *Geol. Soc. Am. Bull., 21*, p. 604-624 (1910).

King, C.A.M., «Beaches and Coasts», Edward Arnold, London, 570 p. (1972).

King, C.A.M. et W.W. Williams, «The Formation and Movement of Sand Bars by Wave Action», *Geogr. J., 113*, p. 70-85 (1949).

Kirk, R.M., «Rates and Forms of Erosion on Intertidal Platforms at Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand», *N.Z. J. Geol. Geophys., 20*(30), p. 571-613 (1977).

Knight, R.J., «Linear Sand Bar Development and Tidal Current Flow in Cobequid Bay (Bay of Fundy), Nova Scotia», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 153-180 (1980).

Knight, R.J. et R.W. Dalrymple, «Winter Conditions in a Macro-tidal Environment; Cobequid Bay, Nova Scotia», *La Revue de géographie de Montréal, 39*(1-2), p. 65-85 (1976).

Komar, P.D., «Beach Processes and Sedimentation», Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 429 p. (1976).

Kostaschuk, R.A., «Rivermouth Processes in a Fjord Delta, British Columbia», *Mar. Geol., 69*, p. 1-23 (1985).

Kostaschuk, R.A. et S.B. McCann, «Observations on Delta-forming Processes in a Fjord-head Delta, British Columbia, Canada», *Sediment. Geol., 36*, p. 269-288 (1983).

Krauel, D.P., «Shoreline Evolution and Man-made Structures, Kye Bay, Vancouver Island», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 337-351 (1980).

Krawetz, M.T. et S.B. McCann, «Coastal Characteristics, East-central Ellesmere Island, District of Franklin», *Recherches en cours - partie A*, Commission géologique du Canada, communication nº 86-1A, Ottawa, Ontario, p. 749-754 (1986).

Kreutzwiser, R.D., «Managing the Great Lakes Shoreline Hazard», *J. S. Water Conserv., 42*(3), p. 150-154 (1987).

Lane, P.A., J.H. Vandermeulen, M.J. Crowel et D.G. Patriquin, «Impact of Experimentally Dispersed Crude Oil on Vegetation in a Northwestern Atlantic Salt Marsh - Preliminary Observations», *Proceedings of the 1987 Oil Spill Conference,* April 6-9, *Baltimore,* American Petroleum Institute, Publication No. 4452, Washington, DC, p. 509-514 (1987).

Lauriol, B. et T.T. Gray, «Processes Responsible for the Concentration of Boulders in the Intertidal Zone in Leaf Basin, Ungava», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.),

Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 281-292 (1980).

Levine, R.A., «Operational Aspects of the Response to the Arco Anchorage Oil Spill, Port Angeles, Washington», *Proceedings of the 1987 Oil Spill Conference,* April 6-9, *Baltimore,* American Petroleum Institute, Publication No. 4452, Washington, DC, p. 3-7 (1987).

Lewis, C.F.M., «Recent Uplift of Manitoulin Island, Ontario», *Can. J. Earth Sci.*, 7(2), Part 2, p. 665-675 (1970).

Lewis, C.P., «Deltaic Processes and Delta Morphology, Mackenzie Delta, N.W.T., (Abst.); Program and Abstracts», *The Coastline of Canada*, Halifax, May 1-3, p. 25 (1978).

Lewis, C.P. et D.L. Forbes, «Sediments and Sedimentary Processes, Yukon-Beaufort Sea coast», Environmental-Social Committee, Northern Pipelines Task Force on Northern Oil Development, Report No. 74-29, 40 p. (1974).

Little, D.I. et D.L. Scales, «The Persistence of Oil Stranded on Sediment Shorelines», *Proceedings of the 1987 Oil Spill Conference,* April 6-9, *Baltimore,* American Petroleum Institute, Publication No. 4452, Washington, DC, p. 433-438 (1987).

Little, D., J.M. Baker, T.P. Abbiss, S.J. Rowland et P.J. C. Tibbetts, «The Fate and Effects of Dispersant-treated Compared with Untreated Crude Oil, with Particular Reference to Sheltered Intertidal Sediments», *Proceedings of the 1981 Oil Spill Conference, Atlanta, Ga.,* American Petroleum Institute, Washington, DC, p. 283-293 (1981).

Little, D.I., T.B. Abbiss, J.M. Baker, B.M. Dicks et P.J.C. Tibbetts, «The Effect of Chemical Dispersants on the Flux of Stranded Crude Oil into Fine Intertidal Sand», *Rapport du procès-verbal de la réunion du Conseil international pour l'exploration de la mer, 186*, p. 219-233 (1986).

Logan, N.J., D.E. Thornton et S.L. Ross, «Oil Spill Countermeasures for the Southern Beaufort Sea», Institute of Ocean Sciences, Department of Environment, Report No. 31a, Sidney, British Columbia, (1975).

Luternauer, J.L., «Skeena Delta Sedimentation, British Columbia», *Report of Activities - Part A,* Commission géologique du Canada, communication nº 76-1A, Ottawa, Ontario, p. 239-242 (1976).

Luternauer, J.L., «Genesis of Morphologic Features on the Western Delta Front of the Fraser River, British Columbia - Status of Knowledge», The Coastline of Canada, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 381-396 (1980).

Luternauer, J.L. et J.W. Murray, «Sedimentation of the Western Delta Front of the Fraser River Delta», Can. J. Earth Sci., 10, p. 1642-1663 (1973).

MacDonald, B.C. et C.P. Lewis, «Geomorphic and Sedimentologic Processes of Rivers and Coasts, Yukon Coastal Plain», Environmental Social Committee, Northern Pipelines Task

Force on Northern Oil Development, Report No. 73-39, 245 p. (1973).

Mackay, J.R., «The Mackenzie Delta Area, N.W.T.», ministère des Mines et des Relevés techniques, Direction générale de la géographie, mémoire nº 8, Ottawa, Ontario, 202 p. (1963).

Mackay, J.R., «Fifty Years (1935-1965) of Coastal Retreat West of Tuktoyaktuk, District of Franklin», *Recherches en cours - partie A*, Commission géologique du Canada, communication no 86-1A, Ottawa, Ontario, p. 727-735 (1986).

Maiero, D.J., R.W. Castle et O.L. Crain, «Protection, Cleanup and Restoration of Salt Marshes Endangered by Oil Spills - A Procedural Manual», Industrial Development Research Laboratory, Office of Research and Development, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 152 p. (1978).

Markham, W.E., «Atlas des glaces : littoral de l'Est canadien», *Service de l'environnement atmosphérique*, Environnement Canada, Toronto, Ontario, 98 p. (1980)

Markham, W.E., «The Ice Cover», *Canadian Inland Seas*, I.M. Martini (éd.), Oceanography Series, Elsevier Science Publishers, New York, NY, vol. 44, p. 101-116 (1986).

Marshall, E.W., «Lake Superior Ice Characteristics», Proceedings of the 10th Conference on Great Lakes Research, p. 214-220 (1967).

Martini, I.M., «Sedimentology of a Lacustrine Barrier System at Wasaga Beach, Ontario, Canada», *Sediment. Geol., 14*, p. 169-190 (1975).

Martini, I.P., «Geomorphological Features of the Ontario Coast of Hudson Bay», *Nat. can., 109*, p. 415-429 (1982).

Martini, I.P., *Canadian Inland Seas*, Elsevier Science Publishers, Oceanography Series, New York, NY, vol. 44, 512 p. (1986).

Martini, I.P., D.W. Cowell et G.W. Wickware, «Geomorphology of Southwestern James Bay: A Low Energy, Emergent Coast», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication no 80-10, Ottawa, Ontario, p. 293-301 (1980).

Marty, R.C., E.H. Owens et D.E. Howes, «Waste Management Guidelines for Marine Oil Spill Response in British Columbia», Environmental Emergency Services Branch, Ministry of Environment, Lands and Parks, Province of British Columbia, Victoria, British Columbia, 78 p. et annexes (1993).

Matheson, K.M., «The Meteorological Effect on Ice in the Gulf of St. Lawrence», McGill University, Marine Science Center, Unpublished Report No. 3, 110 p. (1967).

Matyas, E.C., O.C. White et B. LeLievre, «A Study of Shoreline Erosion in Western Lake Ontario», Commission géologique du Canada, communication nº 74-1B, Ottawa, Ontario, p. 204-205 (1974).

Maxwell, J.B., «Climatic Regions of the Canadian Arctic Islands», *Arctic*, *34*(3), p. 225-240 (1981).

Maxwell, J.B., «A Climate Overview of the Canadian Inland Seas», Canadian Inland Seas, I.P. Martini (éd.), Elsevier Science Publishers, New York, NY, Vol. 44, p. 79-100 (1986).

McCann, S.B., «Barrier Islands in the Southern Gulf of St. Lawrence», Barrier Islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico, S.P. Leatherman (éd.), Academic Press, New York, NY, p. 29-63 (1979).

McCann, S.B. (éd.), «The Coastline of Canada - Littoral Processes and Shore Morphology», *Procès-verbal : Conférence à Halifax, du 1er au 3 mai 1978*, Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, 439 p. (1980).

McCann, S.B., «Atlantic Canada», *The World's Coastline*, E.C.F. Bird and M.C. Schwartz (éd.), Van Nostrand Reinhold, New York, NY, p. 11-15 (1985).

McCann, S.B. et P. B. Hale, «Sediment Dispersal Patterns and Shore Morphology along the Georgia Strait Coastline of Vancouver Island», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 151-163 (1980).

McCann, S.B. et R.B. Taylor, «Beach Freeze-up Sequence at Radstock Bay, Devon Island, Arctic Canada», *Arct. Alp. Res.*, *7*(4), p. 379-386 (1975).

McCann, S.B., G.E. Reinson et J.W. Armon, «Tidal Inlets of the Southern Gulf of St. Lawrence, Canada», *Coastal Sediments '77*, American Society of Civil Engineers, New York, NY, p. 504-519 (1977).

McCann, S.B., J.E. Dale et P.B. Hale, «Subarctic Tidal Flats in Areas of Large Tidal Range, Southern Baffin Island, Eastern Canada», *Géographie physique et quaternaire, 35*(2), p. 183-204 (1981).

McLaren, P., «The Coastal Morphology and Sedimentology of Labrador - A Study of Shoreline Sensitivity to Potential Oil Spill», Commission géologique du Canada, communication nº 79-28, Ottawa, Ontario, 41 p. (1980).

McLaren, P., «The Coastal Geomorphology, Sedimentology and Processes of Eastern Melville and Western Byam Martin Islands, Canadian Arctic Archipelago», Commission géologique du Canada, bulletin 333, Ottawa, Ontario, 39 p. (1982).

McLaren, P., «The Behaviour of Diesel Fuel on a High Energy Beach», *Mar. Pollut. Bull., 16*(5), p. 191-196 (1985).

McLaren, P., W.B. Barrie, J.-M. Semples, R.A. Sieffer, R.B. Taylor et D. Thomson, «Coastal Environmental Data from Eastern Lancaster Sound and Northeastern Baffin Island, N.W.T.», Bedford Institute of Oceanography, Data Series BI-D-81-1,Dartmouth, Nouvelle-Écosse, 283 p. (1981).

McMinn, T.J. et P. Golden, «Behavioural Characteristics and Cleanup Techniques of North Slope Crude Oil in an Arctic Winter Environment»,

Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, API, Washington, DC, p. 263-275 (1973).

Medley, E. et J.L. Luternauer, «Use of Aerial Photographs to Map Sediment Distribution and to Identify Historical Changes on a Tidal Flat», Commission géologique du Canada, communication nº 76-1C, Ottawa, Ontario, p. 293-304 (1976).

Michel, J., M.O. Hayes et P.J. Brown, «Application of an Oil Spill Vulnerability Index to the Shoreline of Lower Cook Inlet, Alaska», Environ. Geol., 2(2), p. 107-117 (1978).

Middleton, G.V. «Physical Processes; in Sedimentary Processes and Animal-sediment Relationships in Tidal Environments», Short Course Notes, vol. 1, Association géologique du Canada, S.B. McCann (éd.), (1980).

Miller, J.A., «Beach Agitation for Crude Oil Removal from Intertidal Beach Sediments», Proceedings of the 1987 Oil Spill Conference, April 6-9, *Baltimore*, American Petroleum Institute, Publication No. 4452, Washington, DC, p. 85-90 (1987).

Miller, G.H., W.W. Locke III et C.W. Locke, «Physical Characteristics of the Southeastern Baffin Island Coastal Zone», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 251-265 (1980).

Mobley, C.M., J.C. Haggarty, C.J. Utermohle, J. Eldridge, R.E. Reanier, A. Crowell, B.A. Ream, D.R. Yesner, J.M. Erlandson et P.E. Buck, «The 1989 *Exxon Valdez* Cultural Resource Program», Exxon Shipping Co. and Exxon Co. USA, Anchorage, Alaska, 300 p. (1990).

Moulton, R.J. et D.R. Cuthbert, «Great Lakes Water Levels: Man and Nature in the Shore Zone», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1987*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 19-30 (1987).

Munroe, H.D., «Regional Variability, Physical Shoreline Types and Morphodynamic Units of the Atlantic Coast of Mainland Nova Scotia», Commission géologique du Canada, dossier public 725, R.B. Taylor, D.J.W. Piper and C.F.M. Lewis (éd.), Ottawa, Ontario, 25 p. (1982).

Murray, S.P., «The Effects and Weather Systems, Currents, and Coastal Processes on Major Oil Spills at Sea», *Pollutant Transfer and Transport in the Sea*, G. Kullenberg (éd.), CRC Press Inc., Boca Raton, FL., p. 169-227 (1982).

Murray, S.P. et E.H. Owens, «The Role of Oceanic Fronts in Oil Spill Dispersion and for Oil Spill Response Planning in the Coastal Zone», *Compte rendu : Onzième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 1-8 (1988).

Murty, T.S., «Storm Surges and Tsunamis on the Coastlines of Canada», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1983*, Conseil national

de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 135-148 (1983).

National Academy of Sciences, «Oil in the Sea - Inputs, Fates and Effects», National Academy Press, Washington, DC, 601 p. (1985).

Nauman, S.A., «Shoreline Cleanup - Equipment and Operations», *Proceedings of the International Oil Spill Conference, San Diego, CA*, American Petroleum Institute, Publication No. 4529, Washington, DC, p. 141-147 (1991).

Neff, J.M., E.H. Owens, S.W. Stoker et D.M. McCormick, «Condition of Shorelines in Prince William Sound Following the *Exxon Valdez* Oil Spill, Part 1: Shoreline Oiling», *Third Symposium on Environmental Toxicology and Risk Assessment: Aquatic, Plant and Terrestrial,* ASTM STP(D)1, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1993).

New, H.A., «Wave Climate of the Canadian Atlantic Coast and Continental Shelf - 1970», AOL Report 1971-10, Bedford Institute, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, 172 p. (1971).

Neu, H.A., «Extreme Wave Height Distribution along the Canadian Atlantic Coast», *Ocean Industry, 7*, p. 45-49 (1972).

Nichols, J.A. et I.C. White, «Aerial Application of Dispersants in Bantry Bay Following the Betelgeuse Incident», *Mar. Pollut. Bull., 10*(7), p. 193-197 (1979).

Nicol, C.W., «The Mizushima Oil Spill - A Tragedy for Japan and a Lesson for Canada», Environnement Canada, Service de la protection de l'environnement, rapport n° EPS-8-EC-76-2, Vancouver, Colombie-Britannique, 25 p. (1976).

Norrman, J.O., «Trends in Postvolcanic Development of Surtsey Island», *Meddelanden Fran Uppsala Geografiska Institutionen*, Series A(246), p. 1-18 (1970).

Nummedal, D., «Persistence of Spilled Oil on the Beaufort Sea Coast», Final Report, N.O.A.A.-OCSEAP Contract 03-5022-82, Research Unit 540, 48 p. (1979).

OMI (Organisation maritime internationale), *Manual on Oil Pollution - Section II: Contingency Planning*, Publication No. OMI-560, Londres, 48 p. (1988a).

OMI (Organisation maritime internationale), *Manual on Oil Pollution - Section IV: Combating Oil Spills,* Publication No. 569 88.11.E, Londres, 216 p. (1988b).

O'Sullivan, A.J., «The Amoco Cadiz Oil Spill», *Mar. Pollut. Bull., 9*(5), p. 123-128 (1978).

Owens, E.H., *A Reconnaissance of the Coastline of Chedabucto Bay, Nova Scotia*, Sciences de la mer, communication n° 4, ministère de l'Environnement, Direction des sciences de la mer, Ottawa, Ontario, 24 p. et carte (1971).

Owens, E.H., «The Cleaning of Gravel Beaches Polluted by Oil», *Proceedigns of the 13th Coastal Engineering Conference, Vancouver, British Columbia*, American Society of Civil

Engineers, New York, NY, p. 2549-2556 (1973).

Owens, E.H., «A Framework for the Definition of Coastal Environments in the Southern Gulf of St. Lawrence», Offshore Geology of Eastern Canada - Vol. 1: Concepts and Applications of Environmental Marine Geology, B.R. Pelletier (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 74-30, Ottawa, Ontario, p. 47-76 (1974).

Owens, E.H., «Barrier Beaches and Sediment Transport in the Southern Gulf of St. Lawrence, Canada», *Proceedings of the 14th Coastal Engineering Conference, Copenhagen,* American Society of Civil Engineers, New York, NY, vol. II, p. 1177-1193 (1975).

Owens, E.H., «The Effects of Ice in the Littoral Zone, Richibucto Head, Eastern New Brunswick», La Revue de géographie de Montréal, *30*(1-2), p. 95-104 (1976).

Owens, E.H., *Les littoraux canadiens et les déversements d'hydrocarbures*, analyse économique et technique, rapport SPE 3-EC-77-13F, Pêches et Environnement Canada, Direction générale du contrôle des incidences environnementales, Ottawa (Ontario), 413 p. (1977a).

Owens, E.H., «Coastal Environments, Oil Spills and Cleanup Programmes in Bay of Fundy», Pêches et Environnement Canada, Direction générale de la lutte contre les dangers pour le milieu, rapport EPS-3-EC-77-9, Ottawa, Ontario, 175 p. (1977b).

Owens, E.H., «Process and Morphology Characteristics of Two Barrier Beaches in the Magdalen Islands, Gulf of St. Lawrence, Canada», *Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, Honolulu,* American Society of Civil Engineers, New York, NY, v. II, p. 1975-1991 (1977c).

Owens, E.H., «Temporal Variations in Beach and Nearshore Dynamics», *J. Sediment. Petrol., 74*(1), p. 168-190 (1977d).

Owens, E.H., «Contingency Planning for the Impact of Oil Spills in Different Coastal Environments of Canada», *Proceedings of the 1977 Oil Spill Conference, New Orleans*, American Petroleum Institute,Washington, DC, p. 115-122 (1977e).

Owens, E.H., «Mechanical Dispersal of Oil Stranded in the Littoral Zone», *J. Off. Rech. Pêch. Can., 35*(5) : 563-572 (1978).

Owens, E.H., «The Canadian Great Lakes: Coastal Environments and the Cleanup of Oil Spills», Environnement Canada, rapport EPS-3-EC-79-2, Ottawa, Ontario, 252 p. (1979a).

Owens, E.H., «Prince Edward Island: Coastal Environments and the Cleanup of Oil Spills», Environnement Canada, Service de la protection de l'environnement, rapport EPS-3-EC-79-5, Ottawa, Ontario, 167 p. (1979b).

Owens, E.H., «Shoreline Analysis of Alaska and Arctic Canada for the Beaufort Sea Preliminary Environmental Assessment Cycle», Unpublished Report to Arctic

Sciences Ltd., Sidney, British Columbia for Dome Petroleum Ltd., Calgary, Alberta, 72 p. et cartes (1979c).

Owens, E.H., «Sediment Removal from the Beaches of Prince Edward Island», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 367-379 (1980a).

Owens, E.H., «Physical Shore-zone Analysis, Saltspring Island, B.C.», rapport inédit pour la Direction générale des terres, région du Pacifique et du Yukon, Environnement Canada par Woodward-Clyde Consultants, Vancouver, Colombie-Britannique, 155 p. (1980b).

Owens, E.H., «Pacific Coast Spill Response Manual - Pilot Study, Esquimalt to Bamfield», rapport inédit pour le Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, North Vancouver, par Woodward-Clyde Consultants, 410 p. (1981) [voir également Beech, F., «Manual for Preparation of Shoreline Protection and Cleanup Plans», programme régional, rapport 81-17, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, Vancouver, Colombie-Britannique, 145 p (1981)].

Owens, E.H., «Factors Affecting the Persistence of Stranded Oil on Low-energy Coasts», *Proceedings of the 1985 International Oil Spill Conference*, Publication No. 4385, American Petroleum Institute, Washington, DC, p. 359-365 (1985).

Owens, E.H., «Suggested Improvements to Oil Spill Response Planning Following the *Nestucca* and *Exxon Valdez* Incidents», *Compte rendu : Treizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 439-450 (1990).

Owens, E.H., *Changes in Shoreline Conditions 1½* Years after the 1989 Prince William Sound Spill, rapport inédit préparé par Woodward-Clyde Consultants, Seattle, WA, 52 p. et annexes (1991a).

Owens, E.H., «Shoreline Conditions Following the Exxon Valdez Oil Spill as of Fall 1990», *Compte rendu : Quatorzième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 579-606 (1991b) (accompanying report published by Woodward-Clyde, Seattle, WA, 49 p.) (1991b).

Owens, E.H. et A.J. Bowen, «Coastal Environments of the Maritime Provinces», *Marit. Sediments*, *13*(1), p. 1-31 (1977).

Owens, E.H. et G. Drapeau, «Changes in Beach Profiles at Chedabucto Bay, Nova Scotia, Following Large-scale Removal of Sediments», *Rev. can. sci. sol*, *10*(8), p. 1226-1232, (1973).

Owens, E.H. et D.H. Frobel, «Ridge and Runnel Systems in the Magdalen Islands, Quebec», J. Sediment. Petrol., *47*(1), p. 191-198 (1977).

Owens, E.H. et J.R. Harper, «Frost Table and Thaw Depth in the Littoral Zone Near Peard Bay, Alaska», *Arctic, 30*, p. 154-168 (1977).

Owens, E.H. et J.R. Harper, «Arctic Coastal Processes: A State-of-knowledge Review», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1983, Vancouver, Colombie-Britannique.*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 3-18 (1983).

Owens, E.H. et J.R. Harper, «British Columbia», *The World's Coastline*, E.C.F. Bird and M.C. Schwartz (éd.), Van Nostrand Reinhold, New York, NY, p. 11-15 (1985).

Owens, E.H. et B. Humphrey, «Long Term Fate and Persistence of Stranded Crude Oil from the BIOS project, N.W.T., Canada, and from the *Metula* Spill, Tierra del Fuego, Chile - 1987 Results», Direction des services techniques et du développement technologique, Environnement Canada, rapport de la série EE, Ottawa, Ontario (1988).

Owens, E.H. et S.B. McCann, «The Role of Ice in the Arctic Beach Environment, with Special Reference to Cape Ricketts, Southwest Devon Island, N.W.T., Canada», *Am. J. Sci., 268*(5), p. 397-414 (1970).

Owens, E.H. et S.B. McCann, «The Coastal Geomorphology of the Magdalen Islands, Quebec», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication no 80-10, Ottawa, Ontario, p. 51-72 (1980).

Owens, E.H. et M.A. Rashid, «Coastal Environments and Oil Spill Residues in Chedabucto Bay, Nova Scotia», *Rev. can. sci. sol, 13*(7), p. 980-988 (1976).

Owens, E.H. et G.A. Robilliard, «Shoreline Aerial Videotape Surveys for Spill Countermeasures», *Bulletin de la lutte contre les déversements, 5*(5), p. 126-130 (1980).

Owens, E.H. et G.A. Robilliard, «Spill Impacts and Shoreline Cleanup Operations on Arctic and Sub-arctic Coasts», *Proceedings of the 1981 Oil Spill Conference, Atlanta*, American Petroleum Institute, Communication No. 4334, Washington, DC, p. 305-309 (1981).

Owens, E.H. et W. Robson, «Field Observations of Stranded Oil in the Strait of Magellan, Chile, 12 1/2 Years after the Metula Spill», Environnement Canada, Division des technologies d'urgence environnementale, rapport EE-89, Ottawa, Ontario, (1987).

Owens, E.H. et E. Taylor, «A Proposed Standardization of Terms and Definitions for Shoreline Oiling Assessment», *Compte rendu : Seizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 1111-1135 (1993).

Owens, E.H. et A.R. Teal, «Shoreline Cleanup Following the "Exxon Valdez" Oil Spill - Field Data Collection Within the SCAT Program», *Compte rendu : Treizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans*

l'Arctique (AMOP), Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 411-421 (1990a).

Owens, E.H. et A.R. Teal, «A Brief Overview and Initial Results from the Winter Shoreline Monitoring Program Following the Exxon Valdez Incident», *Compte rendu : 13e Colloque technique du Programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures en mer et dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 451-470 (1990b).

Owens, E.H. et E.R. White, «Spill Response Manual for the Coast of Northeast Newfoundland», rapport inédit de Woodward-Clyde Consultants pour Petro-Canada Exploration Ltd., 2 vol., Calgary, Alberta (1982).

Owens, E.H., R.B. Taylor, M. Miles et D. Forbes, «Coastal Geology Mapping: An Example from the Sverdrup Lowland, District of Franklin», *Recherches en cours - partie B*, Commission géologique du Canada, communication nº 81-1B, Ottawa, Ontario, p. 39-48 (1981).

Owens, E.H., S. Penland, P.D. Reimer, B. Sawyer et E.R. White, «Spill Countermeasures for Coastal Communities of Central and Northern Labrador», rapport inédit de Woodward-Clyde Consultants pour Petro-Canada Exploration Inc., Calgary, Alberta, 257 p. (1982).

Owens, E.H., H.H. Roberts, S.P. Murray et C.R. Foget, «Containment Strategies for Marine Oil Spills in Nearshore Waters», *Proceedings of the 1985 Oil Spill Conference, Los Angeles, CA,* API, Communication No. 4385, Washington, DC, p. 113-120 (1985).

Owens, E.H., W. Robson et B. Humphrey, «Data on the Character of Asphalt Pavements», *Compte rendu : Neuvième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 1-17 (1986).

Owens, E.H., B. Humphrey et G.A. Sergy, «The Migration of Stranded Oil from a Sheltered Beach Into Adjacent Nearshore Subtidal Sediments», *Fate and Effects of Oil in Marine Ecosystems*, J. Kuipre and W.J. van den Brink (éd.), Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 231-241 (1987).

Owens, E.H., W. Robson et C.R. Foget, «A Field Evaluation of Selected Beach-cleaning Techniques», *Arctic, 40*, Suppl. 1, p. 244-257 (1987).

Owens, E.H., J.R. Harper, W. Robson et P.D. Boehm, «Fate and Persistence of Crude Oil Stranded on a Sheltered Beach», *Arctic, 40*, suppl. 1, p. 109-123. (1987a).

Owens, E.H., W. Robson, B. Humphrey, D. Hope et J. R. Harper, «The Fate of Stranded Oil Four Years after an Experimental Spill on a Sheltered Gravel Beach», *Proceedings of the 1987 Oil Spill Conference, Baltimore,* American Petroleum Institute, Communication No. 4452, Washington, DC, p. 473-478 (1987b).

Owens, E.H., A.R. Teal et P.R. Haase, «Berm Relocation During the 1990 Shoreline Cleanup Program Following

the *Exxon Valdez* Oil Spill», *Compte rendu : Quatorzième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 607-630 (1991).

Owens, E.H., Cramer, M.A. et D.E. Howes, «British Columbia Marine Oil Spill Shoreline Protection and Cleanup Manual», Colombie-Britannique, Ministry of Environment, Victoria, British Columbia, 104 p. et annexes (1992).

Owens, E.H., R.M. Marty et D.E. Howes, «British Columbia Oil Spill Waste Disposal Manual», *Compte rendu : Seizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 1169-1185 (1993a).

Owens, E.H., G.A. Sergy, B.E. McGuire et B. Humphrey, «The 1970 ARROW Oil Spill - What Remains on the Shoreline 22 Years Later?», *Compte rendul : Seizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 1149-1167 (1993b).

Parker, G.F. et R.M. Quigley, «Shoreline Embayment Growth Between Two Headlands at Port Stanley, Ontario», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 380-393 (1980).

Pasquet, R. et J. Denis, «New Developments in Beach Cleanup Techniques», *1983 Oil Spill Conference*, American Petroleum Institute, Communication No. 4356, Washington, DC, p. 279-282 (1983).

Peltier, W.R. et J. T. Andrews, «Glacial Geology and Glacial Isostasy of the Hudson Bay Region», *Shorelines and Isostasy*, D.E. Smith and A.G. Dawson (éd.), Institute of British Geographers Special Publication, No. 16, Academic Press, London, p. 285-319 (1983).

Pezzetta, J.M., «The St. Clair River Delta: Sedimentary Characteristics and Depositional Environments», *J. Sediment. Petrol. 43*(1), p. 168-187 (1973).

Phillips, B.A.M., «The Morphology and Processes of the Lake Superior North Shore», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 407-415 (1980).

Philpott, K.L., «Coastal Engineering Aspects of the Port Burwell Shore Erosion Damage Litigation», *Procès-verbal : Symposium on Non-cohesive Shores*, M. Skafel (éd.), Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 309-333 (1986).

Pincus, H.J. (éd.), *Great Lakes Basin*; American Association of Advancement of Science, Publication No. 71, Washington, DC, 308 p. (1962).

Piper, D.J.W., «Holocene Coastal Zone Sand Budget, South Shore, Nova Scotia», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du

Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 195-198 (1980).

Ploeg, J., Wave Climate Study, Great Lakes and Gulf of St. Lawrence, vol. 1, Conseil national de recherches Canada, rapport technique MH-107A, Ottawa, Ontario, 160 p. (1971).

Prest, V.K., «Quaternary Geology of Canada», *Geology and Economic Minerals of Canada*, 5e éd., R.J.W. Douglas (éd.), Commission géologique du Canada, Ottawa, Ontario, Econ. Geol. Rept. No. 1, p. 676-758 (1970).

Prior, D.B. et B.D. Bornhold, «Sediment Transport on Subaqueous Fan Delta Slopes, Britannia Beach, British Columbia», *Geo-Marine Letters*, *5*, p. 217-224 (1986).

Quigley, R.M. et L. R. DiNardo, «Cyclic Instability Modes of Eroding Clay Bluffs, Lake Erie North Shore Bluffs at Port Bruce, Ontario, Canada», Z. Geomorphol., Supp.-Band 34, p. 39-47 (1980).

Quigley, R.M., J.H.L. Palmer, A. Rowland et D. Bere, «Groyne Stabilization of Slope Movements and Toe Erosion, Lake Huron near Bayfield, Ontario», *Proceedings of the 17th Conference on Great Lakes Research*, p. 193-206 (1974).

Ragotzkie, R.A., «The Great Lakes Rediscovered», *Am. Sci.*, *62*(4), p. 454-464 (1974).

Rampton, V.N., «Quaternary Geology of the Tuktoyaktuk Coastlands», rapport the Terrain Analysis and Mapping Ltd., Carp, Ontario, pour la Commission géologique du Canada, Ottawa, Ontario (sous presse).

Rampton, V.N. et M. Bouchard, «Surficial Geology of Tuktoyaktuk, District of Mackenzie», Commission géologique du Canada, communication nº 74-53, Ottawa, Ontario, 17 p. (1975).

RCAC (Regional Citizens' Advisory Council), «Observers in Shetlands Surprised by Spill Differences», *The Observer*, Anchorage, Alaska, *3*(1), p. 1 (1993).

Reinders, F.J. et associés, «Littoral Cell Definition and Sediment Budget for Ontario's Great Lakes», pour la Direction des offices de protection de la nature et de la gestion des eaux, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Toronto, Ontario (1988).

Reinson, G.E., «Tidal-current Control of Submarine Morphology at the Mouth of the Miramichi Estuary, New Brunswick» *Can. J. Earth Sci.*, *14*(11), p. 2524-2532 (1977).

Reinson, G.E., «Assessment of the Nova Scotia Coastline for Potential Impingement of *Kurdistan* Oil», Commission géologique du Canada, dossier public, rapport 631, Ottawa, Ontario, 16 p. et cartes (1979).

Reinson, G.E., «Variations in Tidal- inlet Morphology and Stability, Northeast New Brunswick», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 23-39 (1980).

Reinson, G.E., D. Frobel et P.S. Rosen, «Physical Environments of the

Groswater Bay - Lake Melville Coastal Region», *Proceedings of the Symposium on Research in the Labrador Coastal and Offshore Region*, Memorial University, St. John's, 14 p. (1979).

«Resilient Sea», *Time Magazine*, by B. Hillenbrand, 25 January, p. 50-51 (1993).

Richards, T.L. et D.W. Phillips, «Synthesized Winds and Wave Heights for the Great Lakes», Transports Canada, Direction générale de la météorologie et des études climatologiques, nº 17, 53 p. (1970).

Ritchie, W., «The Short-term Impact of the *Braer* Oil Spill in Shetland and the Significance of Coastal Geomorphology», *Scott. Geogr. Mag., 109*(1), p. 50-56 (1993).

Robilliard, G.A., E.H. Owens, R.W. Castle et C.R. Foget, «Arctic Shoreline Protection and/or Cleanup - How to Decide What to Do, When, and Where», *Proceedings of the Third Arctic Marine Oilspill Program Technical Seminar (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 242-278 (1980).

Robilliard, G.A., E.H. Owens, J.R. Harper et T.P. Winfield, «Biological Sensitivity, Oil Residence and Human Use Indices for Coastal Environments Threatened by Oil Spills», *Proceedings of the Third Symposium of Coastal and Ocean Management* (Coastal Zone '83), American Society of Civil Engineers, New York, NY, p. 1374-1390 (1983).

Roland, R.G. et K.H. Cameron, «Adaptation of the Incident Command System to Oil Spill Response on the *American Trader* Spill», *Proceedings of the International Oil Spill Conference, San Diego, CA*, American Petroleum Institute, Communication No. 4529, Washington, DC, p. 267-272 (1991).

Rondy, D.R., «Great Lakes Ice Cover; in Great Lakes Basin Framework Study; Appendix 4 - Limnology of Lakes and Embayments», Great Lakes Basin Commission, Ann Arbor, Michigan, p. 105-117 (1976).

Rosen, P., «Boulder Barricades in Central Labrador», *J. Sediment. Petrol., 49*, p. 1113-1123 (1979).

Rosen, P., «Coastal Environments of the Makkovik Region, Labrador», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 267-280 (1980).

Rukavina, N.A., «Nearshore Sediment Survey of Western Lake Ontario - Methods and Preliminary Results», *Proceedings of the 12th Conference on Great Lakes Research*, p. 317-324 (1969).

Rukavina, N.A., «Lake Ontario Nearshore Sediments, Whitby to Wellington, Ontario», *Proceedings of the 13th Conference on Great Lakes Research*, p. 266-273 (1970).

Rukavina, N.A., «Seasonal and Progressive Changes in the Nearshore Sediments of Western Lake Ontario», Mem. Instit. Geol. Bassin Aquitaine, *7*, p. 119-123 (1974).

Rukavina, N.A., «Nearshore Sediments of Lakes Erie and Ontario», *Geoscience Canada 3*(3), p. 185-190 (1976).

Rukavina, N.A. et D.A. St. Jacques, «Lake Erie Nearshore Sediments - Fort Erie to Mohawk Point, Ontario», *Proceedings of the14th Conference on Great Lakes Research,* p. 387-393 (1971).

Rukavina, N.A. et D.A. St. Jacques, «Lake Ontario Nearshore Sediments - Wellington to Main Duck Island», *Proceedings of the 15th Conference on Great Lakes Research,* p. 394-400 (1972).

Sallenger, A.H., «Beach-cusp Formation», *Mar. Geol., 29*, p. 23-37 (1979).

Schwartz, M.L. (éd.), *The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments*; Hutchinson Ross Pub. Co., Stroudsburg, Penn., 940 p. (1982).

Scott, D.B., R. Boyd et F.S. Medioli, «Relative Sea-level Changes in Atlantic Canada: Observed Level and Sedimentological Changes vs. Theoretical Models», *Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution*, D. Nummedal, O. Pilkey, and J. Howard (éd.), SEPM Special Publication No. 41, Tulsa, Oklahoma, p. 87-96 (1987).

Semples, J.-M., «Coastlines of the Eastern Arctic», *Arctic, 35* (1), p. 170-179 (1982).

Sergy, G.A. et P.J. Blackall, «Design and Conclusions of the Baffin Island Oil Spill Project», *Arctic, 40*, suppl. 1, p. 1-9 (1987).

Sergy, G.A., B. Humphrey et E.H. Owens, «On Describing and Estimating the Fate of Standard Oil», *Proceedings of the 1991 International Oil Spill Conference,* American Petroleum Institute, Communication No. 4529,Washington, DC, p. 489-492 (1991).

Shaw, J. et D.L. Forbes, «Coastal Barrier and Beach-ridge Sedimentation in Newfoundland», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1987*, Québec, du 8 au 10 juillet, Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 437-454 (1987).

Shaw, J. et D.L. Forbes, «Relative Sea-level Change and Coastal Response, Northeast Newfoundland», *J. Coastal Res., 6*(3), p. 641-660 (1990a).

Shaw, J. et D.L. Forbes, «Long- and Short-term Trends of Relative Sea Level, Atlantic Canada», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1990,* Kingston, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 291-305 (1990b).

SHC (Service hydrographique canadien), «Pilot of Arctic Canada», vol. I, Service des pêches et de la mer, Environnement Canada, Ottawa, Ontario (1970).

SHC (Service hydrographique canadien), «Instructions nautiques : golfe et fleuve Saint-Laurent», Service des pêches et de la mer, Environnement Canada, Ottawa, Ontario (1973).

SHC (Service hydrographique canadien), «Instructions nautiques : côtes de la Colombie-Britannique», 2 vol., Service des pêches et de la mer, Environnement Canada, Ottawa, Ontario (1974a).

SHC (Service hydrographique canadien), «Instructions nautiques : Labrador et baie d'Hudson», Service des pêches et de la mer, Environnement Canada, Ottawa, Ontario (1974b).

SHC (Service hydrographique canadien), «Instructions nautiques : Terre-Neuve», Service des pêches et de la mer, Environnement Canada, Ottawa, Ontario (1974c).

SHC (Service hydrographique canadien), «Instructions nautiques : Grands Lacs», 2 vol., Service des pêches et de la mer, Environnement Canada, Ottawa, Ontario (1976).

SHC (Service hydrographique canadien), «Tide and Current Tables», vol. 5 et 6, Pêches et Océans, Ottawa, Ontario (1982).

SHC (Service hydrographique canadien), «Le niveau des Grands Lacs», Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada, Burlington, Ontario, 20 p. (1987).

SHC (Service hydrographique canadien), «Tide and Current Tables», vol. 1, 2 et 3, Service des pêches et de la mer, Environnement Canada, Ottawa, Ontario (1988).

Shepard, F.P., «Longshore Bars and Troughs», U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Technical Memorandum 15, 31 p. (1950).

Shilts, W.W. et A.N. Boydell, «Terrain Mapping of the Churchill - Chesterfield Inlet Corridor, District of Keewatin», Commission géologique du Canada, communication no 74-1A, p. 253-256 (1974).

Short, A.D., «Barrier Island Development along the Alaska-Yukon Coastal Plains», Geological Society of America Bulletin, Part II, *90*, p. 77-103 (1979a).

Short, A.D., «Three Dimensional Beach-stage Model», *J. Geol.*, *87*, p. 553-571 (1979b).

Simmons, M.D., «Have Catastrophic Storms Shaped P.E.I.'s North Shore?», *Procès-verbal : Atelier sur l'érosion et l'ensablement des rivages de l'Atlantique*, Halifax, 25 novembre, Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 23-36 (1982).

Skafel, M.G., «Longshore Sediment Transport: Colchester South and Gosfield Townships, Lake Erie», Centre canadien des eaux intérieures, Division des recherches hydrauliques, note technique 78-04, Burlington, Ontario, 8 p. (1978).

S.L. Ross Ltd., «An Engineering Study of Mechanical Cleanup Systems for Oil Spills in Canada», rapport idédit de S.L. Ross Environmental Research Ltd., Ottawa, Ontario, pour l'Association canadienne de recherche sur les déversements de pétrole en mer, Calgary, Alberta, 165 p. (1984).

S.L. Ross Ltd., «Catalogue des barrages flottants pour la retenue d'hydrocarbures», Environnement

Canada, Direction du développement technologique et des services techniques, rapport SPE 9/SP/1, Ottawa, Ontario, 207 p. (1986).

Snively, G., «Exploring the Seashore in B.C., Washington and Oregon: A Guide to Shorebirds and Intertidal Plants and Animals», Gordon Soules, Vancouver, British Columbia, 240 p. (1978).

Solsberg, L.B., «Un catalogue des écrémeurs d'hydrocarbures», Direction générale des programmes, Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, rapport SPE-3-EP-83-1, Ottawa, Ontario, 258 p. (1983).

Sonu, C.J., «Three-dimensional Beach Changes», *J. Geol., 81*, p. 42-46 (1973).

Spitzer, J.D., «An Incident Command System in Practice and Reality», *Compte rendu : Quinzième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 315-334 (1992).

Stevens, W.J., «A Reconnaissance Study of the Coastal Processes on Banks Island, District of Franklin», Commission géologique du Canada, communication nº 76-1A, p. 271-272 (1976).

Stewart, C.J. et P. Yee, «Interim Report on the 1987 High Water Levels of the Great Lakes, January to June, 1987», Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures et des terres, région de l'Ontario, 38 p. (1987).

St-Jacques, D.A. et N.A. Rukavina, «Lake Erie Nearshore Sediments - Mowhawk Point to Port Burwell, Ontario», *Proceedings of the 16th Conference on Great Lakes Research*, p. 454-467 (1973).

Stoker, S.W., J.M. Neff, T.R. Schroeder et D.M. McCormick, «Condition of Shorelines in Prince William Sound Following the *Exxon Valdez* Oil Spill: Part 2 - Shoreline Biota», *Third Symposium on Environmental Toxicology and Risk Assessment: Aquatic, Plant and Terrestrial*, ASTM STP(D)1, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (in preparation).

Strahler, A.N., «Tidal Cycle of Changes on an Equilibrium Beach», *J. Geol., 74*, p. 247-268 (1966).

Sunamura, T., «Coastal Cliff Erosion due to Waves - Field Investigations and Laboratory Experiments», *Journal of the Faculty of Engineering*, University of Tokyo, *32*(1), p. 86 (1973).

Sutherland-Brown, A., «Geology of the Queen Charlotte Islands, British Columbia», Department of Mines and Petroleum Resources, Bulletin No. 54, Victoria, Colombie-Britannique (1968).

Swift, D.J.P., «Coastal Sedimentation», *Marine Sediment Transport and Environmental Management*, D.J. Stanley and D.J.P. Swift (éd.), John Wiley and Sons, New York, NY, p. 255-310 (1976).

Swift, D.J.P., B.R. Pelletier, A.K. Lyall et J.A. Miller, «Quaternary Sedimentation in the Bay of Fundy», *Earth Science Symposium on Offshore Eastern*

Canada, P.J. Hood (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 71-23, Ottawa, Ontario, p. 113-151 (1973).

Swiss, J.J., D.J. Smrke et W.M. Pistruzak, «Unique Disposal Techniques for Arctic Oil Spill Response», *Proceedings of the 1985 Oil Spill Conference, Los Angeles*, American Petroleum Institute,Communication No. 4385, Washington, DC, p. 395-398 (1985).

Syvitski, J.P.M., «Estuaries, Deltas and Fjords of Eastern Canada», *Geoscience Canada*, *13*(2), p. 91-100 (1986).

Syvitski, J.P.M. et R.D. MacDonald, «Sediment Character and Provenance in a Complex Fjord: Howe Sound, British Columbia», *Can. J. Earth Sci.*, *19*, p. 1025-1044 (1982).

Taylor, R.B., «Coastal Environments and Processes in the Canadian Arctic Archipelago», Unpublished M.Sc. Thesis, McMaster University, 210 p. (1973).

Taylor, R.B., «Coastal Investigation of Northern Somerset Island and Barrow Strait, District of Franklin», Commission géologique du Canada, communication nº 74-1A, Ottawa, Ontario, p. 269-272 (1974).

Taylor, R.B., «Coastal Investigations of Northern Somerset Island and Barrow Strait, District of Franklin», Commission géologique du Canada, communication nº 75-1A, Ottawa, Ontario, p. 501-504 (1975).

Taylor, R.B., «Coastal Reconnaissance for Marine Terminal Planning in the High Arctic», Commission géologique du Canada, dossier public 633, Ottawa, Ontario, 2 vol. (1978a).

Taylor, R.B., «The Occurrence of Grounded Ice Ridges and Shore Ice Piling along the Northern Coast of Somerset Island, N.W.T.», *Arctic, 31*(2), p. 133-149 (1978b).

Taylor, R.B., «Beach Thaw Depth and the Effect of Ice-bonded Sediment on Beach Stability, Canadian Arctic Islands», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 103-121 (1980a).

Taylor, R.B., «Coastal Environments along the Northern Shore of Somerset Island, District of Franklin», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 239-250 (1980b).

Taylor, R.B., «Coastal Reconnaissance for Marine Terminal Planning in the Sverdrup Basin, N.W.T.», rapport préparé pour la Direction générale des études stratégiques, Transports Canada, par la Commission géologique du Canada, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, 2 vol. (1980c).

Taylor, R.B., «Observations of Storm Conditions in the Coastal Zone; Bylot Island, N.W.T.», *Procès-verbal : Atelier sur l'action des glaces sur les rivages*, J.-C. Dionne (éd.), Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 133-149 (1981).

Taylor, R.B. (éd.), «Terrain Management Activities, Sable Island 1982 to 1985», Commission géologique du Canada,

dossier public 1973, Ottawa, Ontario, 128 p. (1989).

Taylor, R.B. et D.L. Forbes, «Ice-dominated Shores of Lougheed Island: Type Examples for the Northwest Queen Elizabeth Islands, Arctic Canada», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1987,* Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 33-48 (1987).

Taylor, R.B. et D. Frobel, «Coastal Surveys, Jones Sound, District of Franklin», *Recherches en cours - partie B,* Commission géologique du Canada, communication nº 84-1B, Ottawa, Ontario, p. 25-32 (1984).

Taylor, R.B. et D. Frobel, «Coastline of Jones Sound, N.W.T.», Commission géologique du Canada, dossier public 1079, Ottawa, Ontario (1985a).

Taylor, R.B. et D. Frobel, «Beach Reconnaissance of S.E. Cape Breton Island in Support of Oilspill Cleanup Operations», *The* Kurdistan *Oil Spill of March 16-17, 1979: Activities and Observations of the Bedford Institute of Oceanography Response Team,* J.H. Vandermeulen and D.E. Buckley (éd.), Pêches et Océans Canada, Dartmouth, Nouvelle-Écosse, Canadian Technical Report of Hydrography and Ocean Sciences No. 35, p. 87-100 (1985b).

Taylor, R.B. et D. Frobel, «Aerial Coastal Video Surveys of Selected Central Arctic Islands, N.W.T.», Commission géologique du Canada, dossier public 1298, Ottawa, Ontario (1986).

Taylor, R.B. et S.B. McCann, «Depth of the 'Frost Table' on Beaches in the Canadian Arctic Archipelago», *J. Glaciol., 13*(68), p. 321-322 (1974).

Taylor, R.B. et S.B. McCann, «The Effects of Sea and Nearshore Ice on Coastal Processes in the Canadian Arctic Archipelago», *La Revue de géographie de Montréal, 30*(1-2), p. 123-132 (1976).

Taylor, R.B. et S.B. McCann, «Coastal Depositional Landforms in Northern Canada», *Shorelines and Isostasy,* D.E. Smith and A.G. Dawson (éds.), Institute of British Geographers Special Publication, No. 16, Academic Press, London, p. 53-75 (1983).

Taylor, R.B., S.L. Wittmann, M.J. Milne et S.M. Kober, «Beach Morphology and Coastal Changes at Selected Sites, Mainland Nova Scotia», Commission géologique du Canada, communication no 85-12, Ottawa, Ontario, 59 p. (1985).

Taylor, R.B., J.R. Harper et R. Gillie, «Coastlines; in Modern Sedimentary Processes», Chap. 11, *Geology of the Continental Margin of Eastern Canada,* M.J. Keen et G.L. Williams (éd.), Commission géologique du Canada, *Geologie du Canada,* nº 2, p. 631-642 (1990).

Teal, A.R., «Shoreline Cleanup Following the *Exxon Valdez* Oil Spill - The Decision Process for Cleanup Operations», *Compte rendu : Treizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP),* Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 423-429 (1990).

Teal, A.R., «Shoreline Cleanup - Reconnaissance, Evaluation, and Planning Following the *Exxon Valdez* Oil Spill», *Proceedings of the International Oil Spill Conference, San Diego, CA*, American Petroleum Institute, Publication No. 4529, Washington, DC, p. 149-152 (1991).

Thomas, M.L.H. «Intertidal Resources of the Bay of Fundy», *Fundy Tidal Power and the Environment*, G.R. Daborn (éd.), *Proceedings of the Workshop on the Environmental Implications of Fundy Tidal Power*, Wolfville, Nova Scotia, November 1975, Publication Acadia University Institute, p. 148-159 (1977).

Thomas, M.L.H., «Salt Marsh systems», *Systèmes littoraux et océaniques de la région de Quoddy, Nouveau-Brunswick*, M.L.H. Thomas (éd.), publication spéciale canadienne des sciences halieutiques et aquatiques n° 64, Pêches et Océans Canada, Ottawa, Ontario, p. 107-118 (1983).

Thomson, R.E., «Oceanography of the British Columbia Coast», Pêches et Océeans Canada, publication spéciale canadienne des sciences halieutiques et aquatiques no 56, Ottawa, Ontario, 291 p. (1981).

Thorsteinsson, R., «Carboniferous and Permian Stratigraphy of Axel Heiberg Island and Western Ellesmere Island, Canadian Arctic Archipelago», Commission géologique du Canada, bulletin 224, Ottawa, Ontario, 115 p. (1974).

Tiffin, D.L., *et al.*, «Tectonics and Depositional History of the Continental Margin off Vancouver Island, British Columbia», *Can. J. Earth Sci., 9*, p. 280-296 (1972).

Trenhaile, A.S., «The Shore Platforms of Gaspe, Quebec», *Annals American Association of Geographers, 68*(1), p. 95-114 (1978).

Trenhaile, A.S., «The Geomorphology of Rock Shores», Clarendon Press, Oxford, Oxford Research Studies in Geography, 384 p. (1987).

Troude, J.P. et J. B. Serodes, «Régime morpho-sédimentologique d'un estran à forte sédimentation dans l'estuaire du Saint-Laurent», *Proceedings of the 1985 Coasts of Canada Conference*, D.L. Forbes (éd.), p. 105-119 (1985).

Trudel, B.K. et S.L. Ross, «Method for Making Dispersant-use Decisions Based on Environmental Impact Considerations», *Proceedings of the 1987 Oil Spill Conference, Baltimore*, American Petroleum Institute, Communication No. 4452, Washington, DC, p. 211-216 (1987).

Tsouk, E., Amir, S. et V. Goldsmith, «Natural Self-cleaning of Oil-polluted Beaches by Waves», *Mar. Pollut. Bull., 16*(1), p. 11-19 (1985).

US Naval Oceanographic Office, «Sailing Directions for Labrador and Hudson Bay», Hydrographic Office Publication No. 15 (1965).

Vandermeulen, J.H., «The Chedabucto Bay Spill - *Arrow* 1970», *Oceanus, 20*(4), p. 31-39. (1977).

Vandermeulen, J.H. et J. Jotcham, «Long-term Persistence of Bunker C Fuel Oil and Revegetation of a

North-temperate Salt Marsh: Miguasha Marsh 1974-1985», *Compte rendu : Neuvième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 151-166 (1986).

Vandermeulen, J.H. et C.W. Ross, «Évaluation d'essais de nettoyage dans un marais salant souillé par des hydrocarbures, 1ère partie. Concentrations et composition d'hydrocarbures résiduels de Bunker C», Pêches et Environnement Canada, Service de la protection de l'environnement, rapport SPE-8-EC-77-1, Ottawa, Ontario, 31 p. (1977).

van Oudenhoven *et al.* «Disposal Techniques for Spilt Oil», CONCAWE, Report No. 9/80, Den Haag, 52 p. (1980).

Welsted, J.E., «Morphological Maps of the Fundy Coast», *Marit. Sediments*, *10*(2), p. 46-51 (1974).

Wheeler, R.B., «The Fate of Petroleum in the Marine Environment», Exxon Production Research Co., Special Report, Houston, 32 p. (1978).

Whitehead, H., «An A-Z of Offshore Oil and Gas», Gulf Publishing Co., Houston, 339 p. (1976).

Williams, A.T., «The Problem of Beach Cusp Development», *J. Sediment. Petrol.*, *43*, p. 857-866 (1973).

Wolfe, D.A., M.J. Hameedi, J.A. Galt, G. Watabayashi, J.W. Short, C.E. O'Clair, S. Rice, J. Michel, J.R. Payne, J.F. Braddock, S. Hanna et D.M. Sale, «Fate of Oil Spilled from the T/V *Exxon Valdez* in Prince William Sound, Alaska», *Proceedings of the* Exxon Valdez *Oil Spill Symposium*, The Oil Spill Public Information Center, Anchorage, Alaska, p. 6-9 (1993).

Wood, H.A., «Wave Transport of Beach Materials on Long Point, Lake Erie», *Can. Geogr.*, *16*, p. 27-35 (1960).

Woodward-Clyde Consultants, «Coastal Geology Maps, Central Sverdrup Basin, N.W.T.», Commission géologique du Canada, dossier public 549, Ottawa, Ontario (1980a).

Woodward-Clyde Consultants, «Beaufort Sea Videotape Survey - Tapes and Manual», Produced for Dome Petroleum Ltd., Calgary, Alberta (1980b).

Woodward-Clyde Consultants, «Northwest Passage Video Survey - 70 Edited Tapes and Manual», Produced for Dome Petroleum Ltd., Calgary, Alberta (1980c).

Woodward-Clyde Consultants, «Physical Shore-zone Analysis of the Labrador Coast», rapport inédit pour Petro-Canada, Calgary, Alberta, 69 p. (1980d).

Woodward-Clyde Consultants, «Labrador Coastal Survey: Field Videotape and Slide Manual», rapport inédit pour Petro-Canada Exploration Inc., 32 vidéocassettes, Calgary, Alberta (1981a).

Woodward-Clyde Consultants, «Northeast Newfoundland Coastal Survey: Field

Videotape and Slide Manual», rapport inédit pour Petro-Canada Exploration Inc., 53 vidéocassettes, Calgary, Alberta (1981b).

Woodward-Clyde Consultants, «South Vancouver Island Video-tape Survey: Esquimalt to Bamfield», rapport inédit pour le Service de la protection de l'environnement, Environnement Canada, 7 vidéocassettes éditées, North Vancouver, Colombie-Britannique (1981c).

Woodward-Clyde Consultants, «Coastal Analysis of Alaska and the Northwest Passage», Unpublished Report to Dome Petroleum Ltd., Calgary, Alberta (1981d).

Woodward-Clyde Consultants, «Oil Spill Countermeasures Manual for the Coasts of Southeast Newfoundland», Unpublished Report to Mobil Oil Canada Ltd., St. John's, Terre-Neuve, 138 p. et cartes (1981e).

Woodward-Clyde Consultants, «The Physical Environment of the Northern British Columbia Coast - Draft Initial Environmental Evaluation», Unpublished Report to Chevron Standard Ltd., Calgary, Alberta (1982a).

Woodward-Clyde Consultants, «Beaufort Sea Coast Videotape Manual», Unpublished Report to Dome Petroleum Ltd., 28 vidéocassettes éditées, Calgary, Alberta (1982b).

Woodward-Clyde Consultants, «Amundsen Gulf Videotape Manual», Unpublished Report to Dome Petroleum Ltd., 52 vidéocassettes éditées, Calgary, Alberta (1982c).

Wotherspoon, P.D. et J.J. Swiss, «The Use of Oil Spill Incinerators for the Disposal of Oil-based Drilling Muds», *Compte rendu : Neuvième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 337-373 (1986).

Wright, L.D., J. Chappell, B.G. Thom, M.P. Bradshaw et P. Cowell, «Morphodynamics of Reflective and Dissipative Beach and Inshore Systems: Southeastern Australia», *Mar. Geol., 32*, p. 105-140 (1979).

Yee, P. et D. Cuthbert, «A Report on the 1985 Record High Water Levels of the Great Lakes», Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région de l'Ontario, 33 p. (1985).

Yee, P. et D. Cuthbert, «A Report on the 1986 Record High Water Levels of the Great Lakes», Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région de l'Ontario, 44 p. (1986).

Zeman, A.J. et J.R. Thompson, «Investigation of Erosional Processes at Port Burwell Study Site, Central Lake Erie, Part 1- Historical Recession Rates and Recent Topographic Surveys», Unpublished Report, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington, Ontario, 35 p. (1982).

Bibliographie

Amos, C.L., «The Post-glacial Evolution of the Minas Basin, N.S. - A Sedimentological Interpretation», *J. Sediment. Petrol.*, *48*(3), p. 965-982 (1978).

Amos, C.L. «Physical Processes and Sedimentation in the Bay of Fundy; In Sedimentary Processes and Animal-sediment Relationships in Tidal Environments», S.B. McCann (éd.), Short Course Notes, Association géologique du Canada, vol. 1 (1980).

Barry, R.G., R.G. Krane, C.W. Locke, W.W. Locke, III et G.H. Miller, «The Coastal Environment of Southern Baffin Island and Northern Labrador - Ungava», Unpublished Final Report to the Arctic Petroleum Operators Association, APOA Project 138, University of Colorado, Calgary, Alberta, 166 p. (1977).

Bird, E.C.F., «Coasts», M.I.T. Press, London, 246 p. (1969).

Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Burlington, Ontario, du 22 au 24 avril, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, 460 p. (1980).

Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, *Procès-verbal : Atelier sur l'action des glaces sur les rivages*, Rimouski, Québec, les 5 et 6 mai, J.-C. Dionne (éd.), Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, 106 p. (1981).

Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, *Procès-verbal : Atelier sur l'érosion et l'ensablement des rivages de l'Atlantique*, Halifax, Nouvelle-Écosse, le 25 novembre, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, 116 p. (1982).

Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1983*, B. Holden (éd.), Vancouver, Colombie-Britannique, du 11 au 14 mai, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, 330 p. (1983).

Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1985*, D.L. Forbes (éd.), St. John's, Terre-Neuve, du 13 au 16 août, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, 605 p. (1985).

Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, *Procès-verbal : Symposium sur les littoraux cohésifs*, M.G. Skafel (éd.), Burlington, Ontario, du 5 au 7 mai, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario (1986).

Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales, *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1987*, Québec, Québec, du 8 au 10 juillet, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, 473 p. (1987).

Commission géologique du Canada, «Geology Map, Island of Newfoundland», Direction des levés et de la cartographie, carte 1231A, Ottawa, Ontario (1967).

Davidson-Arnott, R.G.D. et H.I. Keizer, «Shore Protection in the Town of Stoney Creek, Southwest Lake Ontario, 1934-1979 - Historical Changes and Durability of Structures», J. *Gt. Lakes Res.*, *8*, p. 635-647 (1982)

Davidson-Arnott, R.G.D. et W.H. Pollard, «Wave Climate and Potential Longshore Sediment Transport, Nottawasaga Bay, Ontario», *J. Gt. Lakes Res.*, *6*(1), p. 54-67 (1980).

Dick, T.M. et A.J. Zeman, «Coastal Processes on Soft Shores», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1983*, Conseil national de recheches Canada, Ottawa, Ontario, p. 19-35 (1983).

Dionne, J.-C., «Le glaciel en Jamesie et en Hudsonsie, Quebec subarctique», *Géographie physique et quaternaire*, v. XXXII (1), *370* (1978).

Forbes, D.L., «Sedimentary Processes and Sediments, Babbage River Delta, Yukon Coast: A Progress Report», Commission géologique du Canada, communication nº 76-1C, Ottawa, Ontario, p. 165-168 (1976).

Gillie, R.D., «Barred Nearshore Profiles on Great Lakes Beaches», *Procès-verbal : Conférence canadienne sur le littoral de 1980*, Conseil national de recherches Canada, Ottawa, Ontario, p. 123-135 (1980).

Goodman, R.H., R.J. Woznow et W.F. Mackay, «A New Approach to Emergency Incident Response», *Compte rendu : Huitième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP)*, Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 449-457 (1987).

Greenwood, B. et D.G. McGillivray, «Theoretical Model of the Littoral Drift System in the Toronto Waterfront, Lake Ontario», J. Gt. Lakes Res., 4, p. 84-102 (1978).

Greenwood, B. et D.G. McGillivray, «Modeling the Impact upon Littoral Transport of Large Structures in the Central Toronto Waterfront, Lake Ontario, Canada», Zeitschrift fur *Geomorphologie*, Supplement Board 34, p. 97-110 (1979).

Hale, P.B. et B. Greenwood, «Storm Wave Climatology: A Study of the Magnitude and Frequency of Geomorphic Processes», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 73-88 (1980).

Harper, J.R., «Practical Insights into Decision-making for Shoreline Clean-up of Oil Spills», *Fonds renouvelable pour l'étude de l'environnement*, rapport nº 033, Ottawa, Ontario, 45 p. (1986).

Hayes, M.O., P.J. Brown et J. Michel. «Coastal Morphology and Sedimentation, Lower Cook Inlet, Alaska, with Emphasis on Potential Oil Spill Impacts», University of South Carolina, Department of Geology,

Coastal Research Division, Technical Report 12-CRD, 107 p. (1976).

Humphrey, B. et J.H. Vandermeulen, «Characterization of Fifteen-year Old Stranded Oil», *Proceedings of the 9th Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP) Technical Seminar,* Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 29-38 (1986).

Ingle, J.C., «The Movement of Beach Sand», Elsevier, Amsterdam, 221 p. (1966).

James, N.P. et D.J. Stanley, «Sediment Transport on Sable Island, Nova Scotia», *Smithson. Misc. Collect., 152*(7), Publication 4723, 33 p. (1967).

Little, D.I., E.H. Owens, J.A. Buist et R. Marty, «Peat Shorelines: Potection, Cleanup and Disposal Guidelines», *Compte rendu : Quinzième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP),* Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 801-818 (1992).

Martini, I.M., «Wasaga Beach: A Quaternary Classic Landscape, its Geological History and Biological Carrying Capacity of the Sand Dunes», *Quaternary Environments,* Geographical Monograph 5, York University Series, University of Toronto Press, Toronto, Ontario, 61 p. (1974).

Meilke, J.E., «Oil in the Ocean - The Short- and Long-term Impacts of a Spill», The Library of Congress Research Service, CRS Report for Congress 90-356 SPR, Washington, DC, 34 p. (1989).

Owens, E.H., «The Application of Videotape Recording (VTR) Techniques for Coastal Studies», *Shore and Beach, 51*(1), p. 29-33 (1983).

Owens, E.H., «Stranded Oil Persistence in Cold Climates», *Compte rendu : Treizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP),* Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 401-410 (1990).

Owens, E.H., «Shoreline Evaluation Methods Developed During the *Nestucca* Response in British Columbia», *Proceedings of the International Oil Spill Conference, San Diego, CA,* American Petroleum Institute, Communication No. 4529, Washington, DC, p. 177-179 (1991).

Owens, E.H., «An A-B-C of Oiled Shorelines», *Compte rendu : Seizième Colloque technique du programme de lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP),* Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 1095-1110 (1993).

Owens, E.H. et P.D. Reimer, «Aerial Videotape Shoreline Surveys for Oil Spill Reconnaissance, Documentation, and Mapping», *Proceedings of the International Oil Spill Conference, San Diego, CA,* American Petroleum Institute, Communication No. 4529, Washington, DC, p. 601-605 (1991).

Owens, E.H., B. Humphrey et W. Robson, «Results of Beach Studies and Chemical Analyses from the BIOS Experimental Site and from the *Metula* Spill Site», *Compte rendu : Onzième Colloque technique du programme de*

lutte contre les déversements d'hydrocarbures dans l'Arctique (AMOP), Environnement Canada, Ottawa, Ontario, p. 171-183 (1988).

Pye, E.G., «Geology and Scenery, North Shore of Lake Superior», ministère de l'Ontario, *Geological Guide Book No. 2*, Toronto, Ontario, 144 p. (réimprimé en 1975) (1969).

Quigley, R.M. et A.J. Zeman, «Strategy for Hydraulic, Geologic and Geotechnical Assessment of Great Lakes Shoreline Bluffs», *The Coastline of Canada*, S.B. McCann (éd.), Commission géologique du Canada, communication nº 80-10, Ottawa, Ontario, p. 397-406 (1980).

Quigley, R.M., P.J. Gelinas, W.T. Bou et R.W. Packer, «Cyclic Erosion - Instability Relationships: Lake Erie North Shore Bluffs», *Can. Geotechnic. J., 14*, p. 310-323 (1977).

Robson, W., «Shoreline Cleanup Operations on Galveston Island Resulting from the Alvenus Spill», rapport inédit pour Petro-Canada, Calgary, Alberta, 18 p. (1984).

Schwartz, M.L., «Littoral Zone Tidal-cycle Sedimentation», *J. Sediment. Petrol., 37*(2), p. 677-683 (1967).

Taylor, R.B., «Beach Changes, Northern Somerset Island», *Proceedings of the Fourth POAC Conference,* St. John's, Newfoundland, vol. 2, p. 904-915 (1977).

Wardley Smith, J. (éd.), «The Control of Oil Pollution», Graham and Trotman, London, 251 p. (1976).

Weaver, R.K., «A Volumetric Analysis of Erosion Using Photogrammetric Contour Maps, Scarborough Bluffs, Lake Ontario», Pêches et Océans Canada, Sciences aquatiques et de la mer, région du Centre, fiche technique nº 79-4, Burlington, Ontario, 44 p. (1979).

Woodward-Clyde Consultants, «Nova Scotia Field Videotape Manual», rapport inédit préparé pour Petro-Canada Exploration Inc., 77 vidéocassettes, Calgary, Alberta (1982).

Yee, P. et J. Lloyd, «Le niveau des Grands Lacs», Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Burlington, Ontario (1989).