

IMPACTS ET ADAPTATION À LA VARIABILITÉ ET AU CHANGEMENT DU CLIMAT



AU QUÉBEC



Environnement Canada
Région du Québec

Environment Canada
Quebec Region

Association de climatologie du
Québec

Tome V
de l'Étude pan-canadienne : Impacts et adaptation au climat

La rédaction d'un tel rapport nécessite la collaboration de plusieurs personnes. Nous aimerions prendre le temps de souligner, par ordre alphabétique, leur contribution :

Michel Allard*	Stéphane Grenon	Jacques Prescott
André Bédard	Louis Guay	Claude Phaneuf
Jean-Pierre Blanchet	Christiane Hudon*	Daniel Racine
Hélène Bouchard	Ghislain Jacques	Gérald Renaud
Alain Bourque*	Pierre Lajoie	Sonia Ringuette
André Carpentier	Jacques Lavigne*	Michel Rompré
André Cotnoir	Claude Lavoie*	Bhawan Singh*
Gaétan Deaudelin	Yves Mailhot*	Michel Slivitzky*
Emmanuel Dentin	Marc Mingelbier*	Marie-France Sottile
Pierre Dumont*	Marc Morin	Sylvie Tremblay
Mustapha El-Maayar	Roch Ouimet*	Louis Varvalfy*
Denis Gilbert*	Allan Penn*	Alain Viau
Alain Gosselin	Raymond Perrier	Yvan Vigneault
Pierre Gosselin*	Catherine Potvin*	Claude Villeneuve*

* ont participé à la révision finale.

Données de catalogage avant publication (Canada)

Bergeron, Luc

Chapitre québécois de l'étude pan-canadienne sur les impacts
et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique :
Tome V

ISBN 0-662-82197-1

No de cat. En56-119/3-1997F

Comprend des références bibliographiques.

1. Climat -- Changements -- Québec (Province) -- Prévision.

I. Vigeant, Gérald.

II. Lacroix, Jacinthe, 1960- .

III. Canada. Environnement Canada.

IV. Titre.

QC981.8C5B47 1997

551.69715

97-980391-8

TOME V

CHAPITRE QUÉBÉCOIS

DE

**L'ÉTUDE PAN-CANADIENNE SUR LES
IMPACTS ET L'ADAPTATION À LA
VARIABILITÉ ET AU CHANGEMENT
DU CLIMAT**

par

Luc Bergeron, Consultant en Environnement
Gérald Vigeant, Environnement Canada, Région du Québec
Jacinthe Lacroix, Présidente de l'Association de Climatologie du Québec

Octobre 1997

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	vi
Sommaire exécutif	viii
Executive summary	xxvi
1. PRÉAMBULE À L'ÉTUDE PAN-CANADIENNE	1
1.1. L'objectif	1
1.2. L'approche	1
1.3. La variabilité et le changement du climat	2
1.4. Le contexte international	3
1.5. Les modèles climatiques et leurs scénarios	3
1.6. Les répercussions et l'adaptation climatiques	4
2. INTRODUCTION	6
3. CONTEXTE RÉGIONAL	9
3.1. La démographie	9
3.2. L'économie	10
3.3. Les ressources	10
4. LE CLIMAT AU QUÉBEC	12
4.1. Les influences climatiques	12
4.2. Les caractéristiques climatiques	12
4.3. Un retour vers le climat passé	13
4.4. Le climat futur vu par les outils de simulation disponibles	20
4.4.1. Utilisation des scénarios de changement climatique	21
4.4.2. Caractéristiques des MCG	24
4.4.3. Contraintes associées aux MCG	28
4.4.4. Application des scénarios de changement climatique	29
4.5. Que représente un changement futur du climat pour le Québec ?	30
5. IMPORTANCE DES ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTRÊMES	37
5.1. Inondations	40
5.2. Sécheresse	50
5.3. Vagues de chaleur et de froid intense	56
5.3.1. Vagues de chaleur	56
5.3.2. Vagues de froid intense	60
5.4. Tempêtes hivernales	64
5.5. Temps violent estival de nature convective : les tornades et la grêle	67
5.5.1. Les tornades	69
5.5.2. La grêle	71
6. SENSIBILITÉ DU QUÉBEC AUX CONDITIONS PASSÉES, PRÉSENTES ET FUTURES DU CLIMAT	74
6.1. Ressource en eau	74
6.1.1. La sensibilité au climat de la ressource eau	75
6.1.2. Les ressources en eau sous un environnement 2xCO ₂	79
6.2. Santé humaine et aspects sociaux	87
6.2.1. La sensibilité climatique de la santé et des aspects sociaux	88
6.2.2. La santé et les aspects sociaux sous un climat 2xCO ₂	91

6.3. Agriculture	93
6.3.1. Les cultures et la sensibilité au climat	94
6.3.2. L'agriculture sous un environnement 2xCO ₂	97
6.4. Écosystèmes / milieux humides	102
6.4.1. La sensibilité au climat des écosystèmes et des milieux humides	103
6.4.2. Les écosystèmes et les milieux humides sous un environnement 2xCO ₂	108
6.5. Les pêcheries	111
6.5.1. La sensibilité au climat des pêcheries	117
6.5.2. Les pêches au Québec sous un environnement 2xCO ₂	128
6.6. Énergie	131
6.6.1. La sensibilité du climat présent et futur sur la production hydroélectrique	132
6.6.2. La sensibilité du climat présent et futur sur la demande électrique	135
6.7. Foresterie	137
6.7.1. La sensibilité au climat des forêts du Québec	138
6.7.2. Les forêts du Québec sous un environnement 2xCO ₂	154
6.8. Infrastructures et pergélisol	162
6.8.1. La sensibilité des infrastructures et du pergélisol au climat	162
6.8.2. Le pergélisol et les infrastructures sous un environnement 2xCO ₂	165
6.9. Transport	168
6.9.1. La sensibilité au climat du transport au Québec	168
6.9.2. Le transport au Québec sous un environnement 2xCO ₂	175
6.10. Tourisme et loisirs	177
6.10.1. La sensibilité des loisirs et du tourisme au climat	178
6.10.2. Les loisirs et le tourisme au Québec sous un climat 2xCO ₂	187
6.11. Autres enjeux	190
7. LACUNES ACTUELLES ET RECOMMANDATIONS	193
8. CONCLUSION	211
9. BIBLIOGRAPHIE	212
<u>Annexe A</u> - Liste des inondations importantes au Québec	246
<u>Annexe B</u> - Liste des tempêtes hivernales importantes au Québec	256
<u>Annexe C</u> - Liste des tornades et des tempêtes importantes de grêle au Québec	261

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1 - Tendances régionales de la température annuelle moyenne au Canada entre 1895 et 1992	16
Figure 4.2 - Tendances de la température annuelle de surface à l'échelle hémisphérique entre 1961 et 1990	18
Figure 4.3 - Tendances dans les températures maximale et minimale au Canada entre 1865 et 1992	19
Figure 4.4 - Évolution des concentrations de CO ₂ atmosphérique à la station d'observation de Mauna Loa (Hawaï) et d'Alert (Territoires du Nord-Ouest) de 1958 à 1995*	21
Figure 4.5 - Flux d'énergie dans le système climatique terrestre	22
Figure 4.6 - Distance entre les points de grille du modèle de circulation générale canadien - CCC MCGII (1992) ayant une résolution de 3,75° longitude par 3,7° latitude	26
Figure 4.7 - Variation de la température moyenne en été (°C)	32
Figure 4.8 - Variation de la température moyenne en hiver (°C)	33
Figure 4.9 - Variation de la précipitation totale en été (en pourcentage)	35
Figure 4.10- Variation de la précipitation totale en hiver (en pourcentage)	36
Figure 5.1 - Régions cartographiées et ayant des zones inondables désignées (Haut Saint-Laurent) ainsi que les municipalités affectées par les inondations au Québec	45
Figure 5.2 - Accumulation des chutes de pluie (mm) pour une période de 72 heures, de 08 :00 HAE le 18 juillet à 08 :00 HAE le 21 juillet, 1996	50
Figure 5.3 - Variations des débits moyens annuels du Saint-Laurent à Cornwall (1861-1995)	52
Figure 5.4 - Fluctuations des débits d'eau au Port de Montréal depuis le XXième siècle	53
Figure 5.5 - Déviation par rapport à la moyenne 1948-1995 de la température du coeur de la couche froide intermédiaire du golfe du Saint-Laurent	63
Figure 6.1 - Températures maximales versus le nombre de décès à Montréal (1958 - 1988)	89
Figure 6.2 - Poids moyen de biomasse Brassica juncea pour sept générations (a) et la divergence entre la biomasse estimée et obtenue sous des conditions (b) artificielles	102
Figure 6.3 - Pourcentage du couvert occupé par les plantes émergentes à Baie du Febvre en fonction des niveaux d'eau (avril - septembre)	107
Figure 6.4 - Force de classe d'âge du Poulamon atlantique en fonction des températures, rivière Malbaie (A) et des débits (m ³ /s) moyens en décembre de la rivière Sainte-Anne (B)	120
Figure 6.5 - Relation entre l'indice de force de classe d'âge, la température de l'eau et le débit (m ³ /s) pour l'Esturgeon jaune	121
Figure 6.6 - Les captures commerciales du flétan en fonction des débits d'eau douce dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent	125
Figure 6.7 - Bilan énergétique du Québec, 1992	131
Figure 6.8 - Série temporelle de l'écoulement dans la baie d'Hudson (m ³ /s)	134
Figure 6.9 - Indice numérique de suppression (a), de stress de sécheresse (b) et de stress de gel (c) entre 1910 et 1990	146
Figure 6.10- L'indice GTSO pour la période de 1910 à 1990	147
Figure 6.11- Formes de croissance de l'épinette noire et blanche	149
Figure 6.12- Courbe dendrochronologique établie à partir d'échantillons prélevés dans le krummholz étudié (1490-1982) et la courbe établie par Payette & al. (1985) à partir d'échantillons forestiers (1398-1982)	150
Figure 6.13 -Séries dendrochronologiques indicées (a) de la pruche de l'Est, (b) de la Gaspésie et (c) de l'Abitibi	152
Figure 6.14 -Séries dendrochronologiques (a) du lac Bush (valeurs brutes), (b) du lac Bush (valeurs indicées) et (c) de la rivière Boniface (valeurs brutes)	153
Figure 6.15 -Modèle de Rizzo & Wiken(1992) créant les biomes du Québec-Labrador sous des conditions de 2xCO ₂ à partir du modèle climat-végétation d'Holdridge (1947)	157

Figure 6.16 - Changement dans la hauteur des plantes de croissance en réponse à interaction entre le climat et la fertilisation en azote au cours de la saison _____	159
Figure 6.17 - Température moyenne de l'air à Kuujuaq et Iqaluit depuis (a) 1947 et (b) 1980 ____	164
Figure 6.18 - Variation par décade du pourcentage de jours très satisfaisants et de satisfaction moyenne à forte pour la pratique du golf au Québec (1976-1985) _____	184
Figure 6.19 - Nombre d'incidents nautiques de plaisance par catégories sur le Saint-Laurent (1987-1994) _____	186

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 3.1</i> - La population du Québec en 1994	9
<i>Tableau 3.2</i> - Estimation de la superficie occupée par classe d'utilisation du sol selon les secteurs en bordure du fleuve Saint-Laurent	11
<i>Tableau 4.1</i> - Évolution du climat au cours du dernier millénaire à partir de données géomorphologiques, écologiques et dendrochronologiques	15
<i>Tableau 4.2</i> - Évolution de la température au Québec depuis le début du siècle	17
<i>Tableau 4.3</i> - Potentiel de réchauffement planétaire des gaz à effet de serre	23
<i>Tableau 4.4</i> - Comparaison de 3 modèles de circulation générale	27
<i>Tableau 4.5</i> - Changement de la température moyenne saisonnière selon 3 modèles de circulation générale	31
<i>Tableau 4.6</i> - Changement de la précipitation saisonnière selon 3 modèles de circulation générale (MCG)	34
<i>Tableau 5.1</i> - Liste préliminaire des inondations majeures au Québec des 125 dernières années et leurs répercussions	43
<i>Tableau 5.2</i> - Répartition de l'assistance financière aux municipalités riveraines du lac Saint-Louis suite aux inondations de 1974	46
<i>Tableau 5.3</i> - Indemnités versées aux municipalités touchées par les inondations entre 1974 et 1991	46
<i>Tableau 5.4</i> - Indemnités (en dollars) versées par le gouvernement provincial en fonction du type de sinistre (1981-1996)	47
<i>Tableau 5.5</i> - Évolution des feux de forêt au Québec entre 1922 et 1996	54
<i>Tableau 5.6</i> - Gravité moyenne des feux au Québec (1978-1991) établie à partir des indices forêt-météo	55
<i>Tableau 5.7</i> - Valeur du facteur humidex en fonction de température de l'air et de l'humidité relative	58
<i>Tableau 5.8</i> - Perception de froid ressentie en fonction du facteur de refroidissement éolien	61
<i>Tableau 5.9</i> - Catégories de tempêtes à Québec (1965-1975)	64
<i>Tableau 5.10</i> - Liste préliminaire des tempêtes hivernales majeures au Québec des 125 dernières années et leurs répercussions	66
<i>Tableau 5.11</i> - Liste des cas de temps violent au Québec entre 1981 et 1996	68
<i>Tableau 5.12</i> - Nombre total d'événements confirmés et probables* de temps violent estival au Québec par région pour la période 1981-1996	69
<i>Tableau 5.13</i> - Liste préliminaire des tornades au Québec depuis les 125 dernières années et leurs répercussions	71
<i>Tableau 6.1</i> - Résumé des ouvrages et des activités de régularisation sur le fleuve Saint-Laurent	76
<i>Tableau 6.2</i> - Le Saint-Laurent et les grands fleuves du monde	78
<i>Tableau 6.3</i> - Quantités d'eau requises pour l'arrosage des pelouses selon les conditions actuelles et futures (scénarios A et B) pour Québec, 1975-1984	83
<i>Tableau 6.4</i> - Quantités d'eau requises pour l'arrosage des pelouses selon les conditions actuelles et futures (scénarios A et B) pour Montréal, 1975-1984	84
<i>Tableau 6.5</i> - Évaluation des coûts d'arrosage par terrain de 420 mètres carrés (15 avril au 15 octobre) pour les conditions actuelles et futures	85
<i>Tableau 6.6</i> - Nombre d'accidents automobile en 1995 en fonction des conditions météorologiques	90
<i>Tableau 6.7</i> - Superficies (ha) des grandes cultures au Québec en 1991	93
<i>Tableau 6.8</i> - Corrélation entre les températures et les années de dégâts	95
<i>Tableau 6.9</i> - Corrélation entre les degrés-froids et les années de dégâts	96
<i>Tableau 6.10</i> - Années de fortes probabilités de mortalité du pommier	97
<i>Tableau 6.11</i> - Production actuelle et future de pommes et de raisin pour les régions agricoles au Québec	100
<i>Tableau 6.12</i> - Estimation du nombre d'espèces de poissons par grand fleuve	111

<i>Tableau 6.13</i> - Pêche commerciale dans le Saint-Laurent en comparaison avec les grands fleuves du monde	113
<i>Tableau 6.14</i> - Valeurs des débarquements par secteur de pêche commerciale en eau douce, 1992	114
<i>Tableau 6.15</i> - Caractéristiques économiques de la pêche commerciale maritime en 1994	115
<i>Tableau 6.16</i> - Corrélations entre l'IFCA des Perchaudes du lac Saint-Louis et de la rivière aux Pins et différents paramètres biotiques et abiotiques	123
<i>Tableau 6.17</i> - Corrélation entre les températures moyennes annuelles de l'air et divers traits vitaux du Meunier noir	124
<i>Tableau 6.18</i> - Apport net en eau pour trois bassins versants et la capacité de production des centrales hydroélectriques	135
<i>Tableau 6.19</i> - Changement de la consommation d'électricité en chauffage et en climatisation (en %) pour les villes de Montréal, Québec et Trois-Rivières	136
<i>Tableau 6.20</i> - Zones bioclimatiques du Québec	137
<i>Tableau 6.21</i> - Contenu en carbone des diverses composantes constituant les arbres et les sols forestiers	140
<i>Tableau 6.22</i> - Quantités de carbone séquestré annuellement dans les diverses parties des arbres	141
<i>Tableau 6.23</i> - Répartition du nombre de kilomètres de routes au Québec par juridiction gouvernementale	168
<i>Tableau 6.24</i> - Volume de marchandises transitées dans le secteur du Saint-Laurent	171
<i>Tableau 6.25</i> - Sensibilité du secteur transport à la variabilité climatique	174
<i>Tableau 6.26</i> - Statistiques sur l'industrie des croisières et excursions pour Montréal et Québec	178
<i>Tableau 6.27</i> - Caractéristiques de la saison de ski et du nombre de jours skiabiles (1 novembre au 30 avril)	180
<i>Tableau 6.28</i> - Quantités hivernales de pluie et de neige à Sainte-Agathe-des-Monts, Sherbrooke et Québec entre 1975 et 1985	182
<i>Tableau 6.29</i> - Dates médianes de début, fin et durée de la saison de golf (1976-1985)	183
<i>Tableau 6.30</i> - Recensement de petits bâtiments de navigation de plaisance en 1988	185
<i>Tableau 6.31</i> - Nombre moyen annuel de jours skiabiles actuels et selon le scénario B (modèle GFLD) par seuil d'enneigement aux stations synoptiques	188
<i>Tableau 6.32</i> - Impacts économiques des conditions de 2xCO ₂ sur l'économie	191

L'ÉTUDE PAN-CANADIENNE SUR LES IMPACTS ET L'ADAPTATION À LA VARIABILITÉ ET AU CHANGEMENT DU CLIMAT : le chapitre québécois - sommaire exécutif

Le Québec est caractérisé par un climat variable. Les exemples sont très nombreux démontrant l'ampleur des répercussions que les fluctuations climatiques peuvent avoir sur notre vie de tous les jours. L'augmentation des gaz à effet de serre, observée au niveau mondial, met une pression additionnelle sur le système climatique terrestre. Les mécanismes d'ajustement du climat face à ces nouveaux facteurs anthropiques sont très mal connus et le niveau des connaissances actuelles ne nous permet pas de savoir avec exactitude comment les océans, les régions polaires et les écosystèmes, entre autres, contribuent directement ou indirectement à ces mécanismes.

Le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du climat (GIEC) qui regroupe 135 pays et plus de 350 scientifiques reconnus a, pour la première fois dans son 2^e rapport d'évaluation déposé en 1995, énoncé que « l'homme a une influence perceptible sur le climat global ». Par contre, aux échelles régionale et locale, l'ampleur, la vitesse et les caractéristiques des changements du climat font et feront encore l'objet de discussions, d'argumentations et de controverses scientifiques pour les années à venir. Sur ces aspects, les défis pour la communauté scientifique demeurent considérables.

Afin d'assurer une adaptation harmonieuse et adéquate de la société québécoise à une modification potentielle du climat, nous nous devons de connaître beaucoup mieux les éléments importants du climat québécois, ainsi que les répercussions positives et négatives que les fluctuations climatiques parfois extrêmes ont sur l'ensemble des ressources, des usages et des activités. En documentant mieux la relation climat-nature-société, la capacité de s'ajuster et de s'adapter à une variation même faible de la gamme des conditions climatiques futures n'en sera que rehaussée. C'est dans ce contexte que l'Étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique vient à point.

L'Étude pan-canadienne est divisé en deux (2) étapes. La phase I débuta à l'été 1996 et se terminera à l'automne 1997. Cette étape présente une revue et une évaluation la plus exhaustive possible de la littérature existante traitant des répercussions et de l'adaptation à la variabilité et au changement climatique au Canada. Les lacunes actuelles seront identifiées et des recommandations traitant des avenues de recherche future pour combler ces lacunes seront proposées pour une phase II éventuelle qui est prévue débuter à la fin de 1997 et s'étendre sur une période de 5 ans.

Dans la phase I, des résumés-synthèse seront publiés, soit: un résumé national dédié aux responsables des politiques, un résumé national d'intérêt général et 6 résumés régionaux d'intérêt général. Les résumés seront élaborés à partir des informations contenues dans 25 rapports/articles publiés dans 8 tomes:

- Tome I - La Colombie-Britannique et le Yukon
- Tome II - L'Arctique
- Tome III - Les Prairies
- Tome IV - L'Ontario
- **Tome V - Le Québec**
- Tome VI - Les Maritimes
- Tome VII - Les changements climatiques vus à travers une douzaine de secteurs stratégiques d'intérêt national tels l'agriculture, les infrastructures, l'énergie, la foresterie, les pêcheries, la santé humaine, les loisirs et tourisme, le transport, les écosystèmes et les milieux humides, les ressources en eau, etc..
- Tome VIII - Les changements climatiques vus à travers sept enjeux intégrateurs d'intérêt national. Ces enjeux sont: les aménagements du territoire en évolution, le commerce intérieur, les influences transfrontalières, les événements extrêmes, les enjeux atmosphériques, le développement durable et les deux économies.

Environnement Canada et *l'Association de climatologie du Québec* sont très heureux de vous offrir le *chapitre québécois de l'Étude pan-canadienne - tome V*. Tout au long de ce document, un effort particulier a été consacré à bien positionner la problématique du changement climatique dans un contexte québécois en faisant toujours référence à des événements climatiques passés et présents, déjà observés et parfois documentés, afin de nous faire réaliser l'ampleur, le spectre et l'importance de leurs répercussions au Québec.

L'approche utilisée dans l'élaboration et la préparation de la composante québécoise de l'Étude pan-canadienne peut se diviser en 3 étapes :

- 1) un inventaire exhaustif et rigoureux des articles, des études, des rapports et des initiatives afin, d'une part, de quantifier le lien existant entre les fluctuations climatiques passées et présentes au Québec et 10 secteurs stratégiques et, d'autre part, de faire la synthèse des connaissances des répercussions d'un changement climatique induit par l'augmentation des gaz à effet de serre ;
- 2) la tenue de deux (2) forums à Montréal et Québec en avril 1997. Ces deux ateliers ont regroupé des spécialistes dans les divers secteurs et avaient comme objectifs de sensibiliser les participants, de valider les informations recueillies jusqu'à ce jour sur notre niveau de connaissances et finalement de réfléchir collectivement sur les moyens et les étapes à prendre pour assurer le développement de mesures efficaces d'adaptation au changement climatique ;
- 3) la rédaction et la révision du présent document.

Sans la contribution et la collaboration active de la centaine de spécialistes et experts de divers milieux contactés au cours de cette étude, il aurait été difficile de compléter ce rapport qui se veut une étape initiale à une meilleure adaptation à une variabilité climatique modifiée.

CONTEXTE RÉGIONAL

Le Québec s'étend sur plus de 1 950 km du nord au sud et, sous certaines latitudes, sur plus de 1 500 km d'est en ouest. La province compte un peu moins de 1,5 million de km² de terres, dont 940 000 km² occupés par la forêt et 184 000 km² par l'eau douce. Sa population, estimée à 7,2 millions en 1994, représente 25,1% de la population canadienne.

Le Saint-Laurent constitue la pièce maîtresse du paysage québécois et se classe au 17^e rang mondial pour sa longueur, au 13^e quant à la superficie de son bassin versant et au 15^e pour le plus grand débit d'eau. Il est alimenté par quelques 350 affluents et plus de 1 250 îles le parsèment. On évalue que 97 % des Québécois et des Québécoises vivent à l'intérieur des limites du bassin versant du Saint-Laurent et que les 2/3 de sa population (69,5 %) résident sur une bordure riveraine de 10 km de chaque côté du fleuve.

L'économie du Québec est principalement basée sur un fort secteur économique tertiaire, avec ses 96,9 milliards de dollars (1991) qui représentent 71,8% du produit intérieur brut (PIB). Le secteur secondaire (industries manufacturières, construction), avec des revenus de 33,6 milliards de dollars contribue pour sa part à 24,9% du PIB. Finalement, le Québec voit également une bonne partie de ses activités économiques fondées sur l'utilisation des ressources (agriculture, foresterie, mines) avec 3,2% du PIB.

LE CLIMAT DU QUÉBEC

Le Québec a connu des fluctuations climatiques importantes depuis la fin de la dernière époque glaciaire. On estime qu'il y a 6 000 ans, la température moyenne était d'environ 1 °C supérieure à celle que l'on connaît aujourd'hui.

La prise systématique d'observations météorologiques au Québec ne date que d'environ 125 ans ce qui ne nous permet pas de remonter loin dans l'histoire climatique de la province. Cependant, des études en géomorphologie (fossiles), en écologie (pollen) et en dendrochronologie (cernes des arbres) font en sorte que l'on peut avoir des indications du régime thermique et parfois des conditions d'humidité qui ont prévalu au cours du dernier millénaire. Le tableau ci-dessous tente, avec toute la prudence qui s'y prête, de dresser un portrait synthèse du climat récent du Québec.

Histoire climatique du Québec au cours du dernier millénaire

Période considérée	De 900 à 1200	De 1200 à 1400	De 1400 à 1570	De 1570 à 1880	De 1880 à 1900	De 1900 à 1930	De 1930 à 1960	De 1960 à nos jours
Tendance du climat	Chaud et humide	Froid et sec	Doux et humide	Étés frais et humides Hivers froids et venteux	Réchauffement marqué	Froid ou frais	Doux	Près ou légèrement sous la normale
Source des données¹ et Zone du Québec considérée	Géo Éco Dendro pour le Québec subarctique	Éco Dendro pour le Québec subarctique	Géo Éco Dendro pour le Québec subarctique	Éco Dendro pour le Québec subarctique	Météo pour le sud du Québec Dendro pour le Québec subarctique	Météo pour le sud du Québec	Météo pour tout le Québec	Météo pour tout le Québec
<p><u>Période de référence pour déterminer la normale : 1951-1980</u></p> <p><i>chaud</i> : plus de 0,5 °C au-dessus de la normale</p> <p><i>doux</i> : de 0,25 à 0,5 °C au-dessus de la normale</p> <p><i>frais</i> : de 0,25 à 0,5 °C sous la normale</p> <p><i>froid</i> : plus de 0,5 °C sous la normale</p>								
<p>Note 1 : Spécifie les types de données utilisées pour déterminer la tendance climatique soient</p> <p>Géo : données géomorphologiques (e.g. fossiles)</p> <p>Éco : données écologiques (e.g. pollen)</p> <p>Dendro : données dendrochronologiques (analyse des cernes des arbres)</p> <p>Météo : données tirées des réseaux météorologiques ou climatologiques</p>								

LE CLIMAT FUTUR TEL QUE PERÇU PAR LES SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE (2xCO₂)

L'augmentation du gaz carbonique et des gaz à effet de serre ne fait plus aucun doute auprès de la communauté scientifique, alors qu'on évalue que la concentration du CO₂ atmosphérique est passé de 280 ppm au début de l'ère pré-industrielle à plus de 360 ppm en 1996. Or, depuis les 15 dernières années, l'utilisation des modèles de circulation générale (MCG), outils voulant simuler le bilan énergétique de l'atmosphère terrestre, est mondialement acceptée comme étant une façon d'anticiper et de prévoir les effets possibles qu'aurait une tendance à la hausse des gaz à effet de serre. Les résultats des modèles de circulation générale sont appelés des « *scénarios de changement climatique ou scénarios 2xCO₂* ».

Les modèles de circulation générale (MCG) consistent en des représentations mathématiques de lois physiques voulant simuler, de la façon la plus complète possible et en 3 dimensions, le système climatique global. Ils incluent de l'information sur les concentrations présentes et futures des gaz à effet de serre et les plus récentes versions commencent à inclure les aérosols atmosphériques particulièrement depuis l'éruption volcanique du Pinatubo en 1991. Une dizaine de MCG existent à travers le monde dont un est canadien (CCC MCG II - 1992).

Tous les MCG actuellement disponibles ont la capacité de faire et de comparer des simulations entre des conditions de référence (concentrations de $1\times\text{CO}_2$ se situant entre 300 et 330 ppm) et des situations où les concentrations sont doublés ($2\times\text{CO}_2$ i.e. entre 600-660 ppm). Un MCG va d'abord diviser la planète en un nombre très grand de « points de grille », puis fera des estimés des conditions climatiques actuelles qui caractérisent chaque point de grille. Ainsi, l'utilisation du sol, la présence ou non de plans d'eau importants, la topographie, les océans et les zones glaciaires constituent un ensemble de paramètres individualisant chacun des points de grille et jouant ainsi un rôle certain dans le bilan énergétique de la Terre, que ce soit sous des conditions récentes (scénario de $1\times\text{CO}_2$) ou futures (scénario de $2\times\text{CO}_2$).

Chaque MCG effectue ces simulations en utilisant une formulation mathématique et physique pouvant être différente. La résolution spatiale entre les points de grille des MCG varie selon les modèles se situant présentement entre 200 et 300 km. Bien que le modèle de circulation générale canadien possède une résolution plus forte (distance entre les points de grille plus faible) que plusieurs de ses compétiteurs, on doit tout de même admettre que tous les MCG, par leurs caractéristiques intrinsèques et le coût élevé à effectuer ces simulations, ne constitue qu'une représentation limitée des conditions environnementales réelles.

Il peut être hasardeux de comparer aveuglement les scénarios des divers MCG ayant des formulations mathématiques et physiques différentes. On peut énumérer rapidement une série d'arguments appuyant la nécessité d'être prudents dans l'utilisation des MCG. Mais on ne peut laisser de côté ou limiter l'utilité des MCG à donner des tendances et des pistes sur ce que sera le climat futur sous un doublement des concentrations de CO_2 .

Bien que les MCG peuvent être utilisés pour indiquer l'ampleur de la réponse climatique à une augmentation importante des gaz à effet de serre à une échelle planétaire, le degré d'incertitude dans l'application des MCG à une échelle régionale demeure très élevé. Les différences dans la distribution régionale des températures et des précipitations, selon le MCG utilisé, nous incitent à la prudence et à ne pas les utiliser aveuglement. C'est pour cette raison que le développement associé aux modèles régionaux du climat doit être suivi avec grand intérêt. Fonctionnant à des résolutions suffisamment fines pour permettre une meilleure représentation des champs physiques de l'air, de l'eau et du sol, les modèles régionaux deviennent alors des outils d'interface entre les MCG et les outils de prise de décision dans les divers secteurs affectés par une variabilité climatique accrue.

Que représente un changement futur du climat pour le Québec ?

Un examen comparatif des divers scénarios de changement climatique tirés des MCG et applicables au Québec, permet de faire les observations suivantes sur les régimes de températures et de précipitations qui pourraient prévaloir dans un environnement où la concentration du CO₂ atmosphérique est doublée:

- a) *une tendance générale au réchauffement de +1 à +4 °C partout sur le sud du Québec et de + 6 °C dans la partie septentrionale de la province. Ce réchauffement sera plus accentué de la saison hivernale et plus important et intense dans le Nord du Québec;*
- b) *le sud du Québec recevrait, sous des conditions de doublement de CO₂ atmosphérique, quantités de précipitation près ou légèrement au-dessus des normales saisonnières (de 0 +10%). Les régions plus nordiques du Québec, pour leur part, recevraient entre 10 et 20% , de précipitations que les valeurs actuellement observées. Les divergences spatiales (selon régions de la province) et temporelles (selon les saisons) sont cependant plus importantes que les scénarios de précipitations des MCG que pour le champ de température anticipé sous conditions de 2xCO₂.*

Aucune indication n'est cependant donnée, à partir des scénarios de changement climatique, sur la fréquence, la durée et l'intensité prévue des événements climatiques extrêmes (sécheresse, inondations, vagues de froid et de chaleur, tempêtes hivernales, etc.), ni sur les modifications à la trajectoire moyenne des systèmes météorologiques affectant le Québec.

Variation de la température moyenne et des précipitations saisonnières à partir des divers scénarios de changement climatique faisant l'hypothèse d'un doublement de CO₂

	<u>Sud du Québec</u>	<u>Nord du Québec</u>
Printemps (mars à mai)	Réchauffement de 1 à 4 °C De 0 à 20% plus de précipitations	Réchauffement de 2 à 4 °C De 0 à 20% plus de précipitations
Été (juin à août)	Réchauffement de 1 à 4 °C Précipitations à plus ou moins 10% des valeurs actuelles	Réchauffement de 2 à 4 °C De 0 à 20% plus de précipitations
Automne (sept à nov)	Réchauffement de 1 à 3 °C Les MCG sont en désaccord sur les précipitations pouvant aller de +10% à -30% des valeurs actuelles	Réchauffement de 2 à 5 °C De 0 à 20% plus de précipitations
Hiver (déc à fév)	Réchauffement de 2 à 6 °C De 5 à 20% plus de précipitations	Réchauffement de 2 à 9 °C De 0 à 20% plus de précipitations

IMPORTANCE DES ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTRÊMES

Le climat peut être traité comme une distribution statistique représentant l'ensemble des situations météorologiques affectant une région donnée. La fréquence, l'amplitude, la durée et la séquence de ces situations météorologiques peuvent résulter en des épisodes climatiques extrêmes causant parfois des dommages d'une intensité inouïe à la société québécoise et aux écosystèmes qui l'entoure.

L'histoire du Québec est parsemé de tels événements climatiques dramatiques d'origine naturelle et qui font partie du paysage climatique québécois. Comment passer sous silence l'« année sans été » ou « l'été noir » de 1816 qui occupe, sans contredit, une place privilégiée dans les annales météorologiques de l'Amérique du Nord. On le soupçonne d'être directement lié à l'intense éruption volcanique de Tambora, près de Java en Indonésie en avril 1815, qui a éjecté, selon les estimations, 150 millions de tonnes de poussières volcaniques dans l'atmosphère. Les répercussions de l'été 1816 ont été renversantes pour le Québec.

Des anomalies climatiques se sont déjà produites dans le passé. Elles font partie des caractéristiques intrinsèques du climat passé et présent. Mais qu'en serait-il du climat futur sachant que les activités humaines y jouent un rôle de plus en plus important? Aurons-nous davantage ou moins de vagues de froid, de tornades, de crues subites et de périodes de sécheresse sous des conditions futures de concentrations rehaussées des gaz à effet de serre? La réponse à ces questions suscite une grande controverse au sein de la communauté scientifique qui tente, depuis les 20 dernières années, de mieux comprendre et anticiper la réaction du système climatique terrestre face à une augmentation des gaz à effet de serre et ainsi évaluer les impacts de cette réaction sur la fréquence, la durée et l'intensité des événements climatiques extrêmes ainsi que sur la trajectoire des systèmes météorologiques qui affectent quotidiennement nos régions.

On ne saurait trop insister sur l'importance de bien connaître la distribution spatiale et temporelle des événements climatiques anormalement intenses en plus d'avoir une connaissance quantitative la plus précise et exacte possible de la fourchette de répercussions qu'ils apportent avec eux. Si l'augmentation des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale se traduit effectivement par un changement dans la fréquence, la durée et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes, il est primordial d'être en mesure de le détecter rapidement et d'en évaluer l'ensemble des impacts.

Cinq catégories d'événements climatiques extrêmes ont été examinées dans le chapitre québécois : elles sont considérées comme les plus dommageables et les plus typiques du climat québécois. Ce sont :

- les inondations ;*
- les périodes de sécheresse ;*
- les tempêtes hivernales ;*
- les vagues de froid intense et de chaleur accablante ;*
- le temps violent estival de nature convective (venant d'orages) plus particulièrement les tornades et les chutes de grêle.*

CE QUI CARACTÉRISE LES PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES EXTRÊMES AU QUÉBEC

INONDATIONS

- présentent diverses formes: fonte printanière, par embâcle, crue subite
- au moins une inondation majeure par année
- toutes les régions du Québec, sont affectées, surtout au sud du 50° parallèle
- une augmentation appréciable des risques et des dommages lors d'hiver/printemps présentant de grandes fluctuations de température (gel/dégel)
- une problématique grandissante de crues associées aux pluies abondantes
- des impacts majeurs sur les populations riveraines, les bâtiments et les infrastructures liées au transport (routes, ponts, ponceaux)
- des dommages moyens annuels estimés à 10 - 15 millions de dollars

SÉCHERESSE

- un phénomène insidieux et rarement prévisible affectant surtout le sud-ouest du Québec au moins une fois par été
- les premiers impacts se font sentir en agriculture (rendement des cultures, irrigation), augmentent les risques de feux de forêt, réduisent la qualité et la quantité d'eau et perturbent l'approvisionnement en eau potable
- une sécheresse prolongée (déficience hydrique sur plusieurs semaines) peut affecter les nappes phréatiques, les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent (impacts sur la navigation commerciale et de plaisance), les niveaux des réservoirs hydro-électriques (impact sur la production) et les écosystèmes des milieux humides (assèchement des marais)

VAGUES DE CHALEUR

- elles se produisent au moins une fois par année, surtout en juillet
- elles affectent principalement le sud et sud-ouest du Québec avec exacerbation du phénomène dans les grands îlots urbains
- les impacts potentiels portent sur le bien-être des populations des enfants, de personnes âgées et sur la santé de personnes avec des problèmes cardio-respiratoires
- une vague de chaleur hivernale (température > 0 °C) a des impacts majeurs sur: les risques d'inondation par embâcle, la mortalité des pommiers, la production de sève des érables

TEMPÊTES HIVERNALES

- elles se produisent, sous diverses formes (tempête de neige, blizzard, verglas) plusieurs fois par année
- elles affectent principalement l'axe du Saint-Laurent (où se retrouve plus du 2/3 de la population) et augmentent d'intensité d'ouest en est
- ont un impact négatif marqué sur le transport terrestre (pertes de vie et blessures, dommages matériels, mobilité des utilisateurs, coûts d'entretien des réseaux)
- les tempêtes avec verglas entraînent les impacts les plus lourds: pannes électriques et ses conséquences diverses, destruction de végétation sylvestre et arbustive, paralysie des transports, etc.

TEMPS VIOLENT ESTIVAL

- des phénomènes variables dans le temps et l'espace - prévision et suivi difficiles
- concentré sur le sud du Québec
- une moyenne de plus de 100 événements confirmés par année
- un impact négatif marqué sur plusieurs secteurs économiques (agriculture, infrastructures et bâtiments, loisirs, sécurité des personnes et des biens)
- les coûts liés à ces phénomènes sont énormes mais non comptabilisés globalement

VAGUES DE FROID

- se produisent au moins une fois par année, surtout en janvier et février
- elles affectent surtout les zones au nord du 48° parallèle
- une bonne adaptation des québécois (meilleurs vêtements, déplacements et sorties réduits), mais problème potentiel chez les sans-abris
- un impact sur le milieu hydrique (baisse des températures, production de frasil dans les rivières) qui affecte la santé des espèces aquatiques

Enfin, il nous apparaît important de le répéter. Bien qu'il y ait de plus en plus de travaux de recherche faits sur l'impact d'un changement climatique sur les extrêmes climatiques, on ne peut trouver, à partir des scénarios de 2xCO₂ actuels, d'indications sur la fréquence, la durée et l'intensité prévue des extrêmes climatiques, ni sur les modifications apportées à la trajectoire moyenne des systèmes météorologiques affectant le Québec. Cependant, des premières ébauches de recherche, particulièrement aux États-Unis, dénotent que les phénomènes climatiques violents pourraient augmenter dans un climat plus chaud.

UN PORTRAIT GLOBAL DE LA SITUATION

Le chapitre Québécois de l'Étude pan-canadienne nous a permis, notamment, d'examiner systématiquement le niveau de connaissances actuelles sur le lien existant entre les fluctuations climatiques passées, présentes et futures et une dizaine de secteurs stratégiques pour le Québec. Cet examen nous a démontré clairement à quel point plusieurs de ces secteurs d'activités sont sensibles à des événements climatiques extrêmes.

La somme d'informations, de connaissances, de lacunes, de pistes de solutions et d'avenues de recherche recueillies dans l'élaboration du chapitre québécois de l'Étude pan-canadienne sur les répercussions et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique est tout simplement phénoménale. Cependant, alors que certains secteurs sont bien documentés, d'autres n'en sont qu'à leurs balbutiements en ce qui concerne la connaissance du lien climat-secteur. Le défi ici était d'établir une liste de lacunes qui soit la plus objective et réaliste possible, tout en tenant compte de ce déséquilibre dans la compréhension que nous pouvons avoir, au Québec, des répercussions de la variabilité climatique sur nos ressources, nos usages et nos activités.

Pour chaque secteur retenu, un tableau synthèse a été élaboré visant à:

- résumer le niveau de connaissance actuel du lien entre le climat et le secteur selon 5 catégories (très faible, faible, moyen, bon, très bon);
- résumer le niveau de connaissances actuelles sur l'ampleur et l'intensité des répercussions d'un changement climatique sur ce secteur selon 5 catégories (très faible, faible, moyen, bon, très bon);
- l'identification, par ordre de priorité, des lacunes actuelles caractérisant ce secteur;
- pour chaque lacune, des pistes de solutions et des recommandations spécifiques voulant combler, à court et à moyen terme, ces lacunes.

<i>RESSOURCES EN EAU</i>		
ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (6)	RECOMMANDATIONS (7)
<p><i>la sensibilité au climat</i> : <u>BON</u></p> <p>Des études spécifiques et ponctuelles, principalement sur le Saint-Laurent, liant les variations des niveaux d'eau aux usages, à l'évolution des écosystèmes riverains et aux cycles vitaux de la faune aquatique</p> <p><i>les répercussions d'un changement climatique</i> : <u>MOYEN</u></p> <p>Une estimation quantitative a été faite seulement pour les besoins futurs en eau sur le sud de la province, les variations sur les niveaux et débits d'eau dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent ainsi que l'apport net en eau par bassin dans le nord du Québec</p>	<p><u>L.1</u> La documentation systématique et globale des niveaux d'eau extrêmes historiques (hauts et bas) et de leurs répercussions sur l'ensemble du Saint-Laurent (fleuve, estuaire et golfe) est déficiente et urgente à combler.</p>	<p><u>R.1</u> Rassembler, documenter et énumérer l'ensemble des impacts des niveaux d'eau extrêmes historiques du Saint-Laurent sur le transport des particules, la qualité de l'eau, le front salin, la circulation marine et la stratification verticale.</p>
	<p><u>L.2</u> Il y a un manque évident d'indicateurs adéquats visant à évaluer quantitativement la quantité/qualité de l'eau face aux fluctuations climatiques anormales et significatives.</p>	<p><u>R.2</u> Développer, valider et rendre accessibles rapidement des indicateurs climatiques représentatifs des fluctuations anormales du climat pouvant agir sur les usages et ressources en eau au Québec.</p>
	<p><u>L.3</u> Le lien entre les cycles hydrologiques décennaux et les systèmes climatiques ne sont pas bien compris, particulièrement dans le nord du Québec.</p>	<p><u>R.3a</u> Sélectionner 1 ou 2 sous-bassins du Québec où une analyse intégrée et globale du cycle hydrologique en tenant compte des contraintes spatiales et temporelles des données climatologiques et hydrologiques disponibles.</p> <p><u>R.3b</u> Analyse et suivi minutieux des inondations extrêmes (e.g. Saguenay en 1996)</p>
	<p><u>L.4</u> Un examen plus accentué de la qualité et de l'approvisionnement en eau face aux fluctuations extrêmes du climat est requis pour mieux aborder les besoins futurs en eau potable.</p>	<p><u>R.4</u> Colliger les statistiques sur les usages d'eau potable dans les agglomérations urbaines importantes du Québec et quantifier leur sensibilité aux fluctuations climatiques extrêmes et au changement climatique prévu</p>
	<p><u>L.5</u> Les mécanismes liant l'érosion des berges et l'intensité/trajectoire des systèmes météorologiques doivent être mieux compris et quantifiés.</p>	<p><u>R.5</u> Documenter et analyser la fréquence, l'amplitude, la trajectoire et la durée des systèmes météorologiques traversant le Québec en mettant l'emphase sur les précipitations et les vents</p>
	<p><u>L.6</u> La capacité du Québec à exporter de l'eau douce dans le contexte d'une variabilité climatique accrue est mal connue.</p>	<p><u>R.6</u> Établir les avantages comparatifs, par rapport aux régions limitrophes, de la disponibilité en eau au Québec sous un scénario de changement climatique</p>

SANTÉ ET ASPECTS SOCIAUX

ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (3)	RECOMMANDATIONS (7)
<p><u>la sensibilité au climat</u> : <u>FAIBLE</u></p> <p>Très peu d'études sont disponibles liant les répercussions des fluctuations climatiques extrêmes sur la santé humaine et les comportements sociaux au Québec, sauf dans des cas indirectement associés au climat ou à des contaminants spécifiques</p>	<p>L.7 Quantification de la sensibilité directe et indirecte de la santé humaine et des comportements sociaux à des phénomènes climatiques extrêmes (inondations, vagues de froid et de chaleur, tempêtes hivernales, etc...)</p>	<p>R.7a Initier des études multi-disciplinaires visant à évaluer quantitativement les répercussions directes sur la morbidité et la mortalité humaine et sur le comportement social de la population en milieu urbain ou semi-urbain au Québec à des épisodes de chaleur accablante, des inondations, des vagues de froid intense et des tempêtes hivernales</p> <p>R.7b Aborder les relations indirectes existant entre la variabilité climatique, la qualité de l'air/eau et la santé et faire un suivi des maladies transportées par l'eau</p> <p>R.7c Suivre de près les maladies infectieuses émergentes et celles associées aux cultures agricoles liées directement à l'alimentation</p>
<p><u>les répercussions d'un changement climatique</u> : <u>TRÈS FAIBLE</u></p> <p>À l'exception d'une étude estimant le nombre de décès causés par l'augmentation des vagues de chaleur accablante à Montréal, tout reste à faire</p>	<p>L.8 On doit mieux comprendre comment une variabilité climatique accentuée ici ou ailleurs à travers le monde peut influencer, au Québec, sur l'identité des communautés, la sécurité, l'intégration, la densité, la perte du lieu de résidence et la capacité des institutions sociales existantes à s'adapter.</p> <p>L.9 Le niveau de sensibilisation du milieu médical/social aux impacts d'un changement climatique sur la santé humaine et les comportements sociaux doit être prioritairement rehaussé.</p>	<p>R.8a En utilisant les scénarios 2xCO2 par tranches de 10 ans, afin de déterminer la tendance dans le nombre de phénomènes climatiques extrêmes (particulièrement, les vagues de froid intense et de chaleur accablante), estimer qualitativement les impacts de premier niveau sur la santé humaine et le comportement social de la population au Québec</p> <p>R.8b Sous l'afflux actuel ou futur de réfugiés-climatiques, dresser un tableau qualitatif des pressions d'un changement climatique sur le tissu social, les habitudes culturelles, alimentaires et sociales dans un nombre limité de régions du Québec</p> <p>R.9a Inscrire un programme santé-climat dans les cours de formation professionnelle en médecine et en sciences</p> <p>R.9b Appuyer et promouvoir la recherche interdisciplinaire liant la santé au climat ; actualiser les banques de données et en faciliter l'accès aux chercheurs, médecins et intervenants sociaux</p>

AGRICULTURE

ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (4)	RECOMMANDATIONS (7)
<p><u>la sensibilité au climat</u> : <u>MOYEN</u></p> <p>Les effets positifs et négatifs des fluctuations quotidiennes du climat sont connus du milieu agricole à un niveau local ou régional. Sa capacité d'adaptation à court terme est grande</p>	<p>L.10 On note une absence d'indicateurs permettant de suivre et d'identifier les fluctuations climatiques anormales responsables de répercussions positives ou négatives sur l'agriculture</p>	<p>R.10a Conserver prioritairement les stations climatiques ayant une longue série de données et permettant de cerner toute tendance au changement de la variabilité climatique au Québec</p> <p>R.10b Développer, valider et rendre accessible des indicateurs climatiques permettant d'identifier les saisons climatiques où les rendements ont atteint des niveaux records</p>
	<p>L.11 La documentation des dommages aux cultures causés par des événements climatiques extrêmes est insuffisante et non systématique</p> <p>L.12 Il existe un besoin pressant de formation des agriculteurs en vue d'une meilleure gestion de l'information climatique dans les opérations routinières</p> <p>L.13 Les modèles actuels liant les plantes aux paramètres climatiques sont trop généraux et empiriques en plus d'être souvent confrontés à des problèmes d'échelle (e.g. la ferme versus la résolution des MCG, les impacts à des événements ponctuels versus des répercussions cumulatives). L'avantage comparatif de l'agriculture québécoise à un niveau international doit être mieux cerné.</p>	<p>R.11 Pour l'ensemble des épisodes de sécheresse, grêle et gel/dégel hivernal des 20 dernières années, établir un lien quantitatif entre l'occurrence et l'intensité de ces événements et les dommages aux cultures</p> <p>R.12 D'une perspective de plans de ferme, examiner les facteurs climatiques susceptibles d'optimiser et de faciliter la gestion de l'eau, la prise de décision, le travail de sol, les traitements phytosanitaires et la construction de bâtiments.</p> <p>R.13a Réaliser des études liant la disponibilité en eau, la croissance végétale, la teneur en CO₂ et les conditions climatiques par l'utilisation de modèles adaptés à une échelle locale ou régionale</p> <p>R.13b Modéliser la variation dans les rendements des plantes sous divers stimuli climatiques probables dans un scénario 2xCO₂ au Québec (incluant le développement des insectes ravageurs, parasites, utilisation des fongicides et pesticides). Déterminer les cultures ayant un fort potentiel d'importation dans des pays climatiquement affectés</p> <p>R.13c Adapter le développement des hybrides à un spectre climatique plus large (e.g. : maïs-grain)</p>
<p><u>les répercussions d'un changement climatique</u> : <u>MOYEN</u></p> <p>Un bon nombre d'études quantitatives de qualité existent traitant des conséquences d'un doublement de CO₂ sur les rendements de plusieurs cultures au Québec et la réponse de quelques plantes</p>		

ÉCOSYSTÈMES ET MILIEUX HUMIDES

ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (5)	RECOMMANDATIONS (10)
<p><u>la sensibilité au climat :</u> <u>MOYEN</u></p> <p>Pour des événements spécifiques et ponctuelles de bas niveaux d'eau sur le Saint-Laurent, on connaît assez bien l'ampleur des impacts sur les écosystèmes et les milieux humides. Peu de choses ont été faites ailleurs au Québec (à l'exception de la faune avienne) et quasiment rien dans le Grand Nord Québécois</p>	<p><u>L.14</u> On doit mieux connaître le fonctionnement du Saint-Laurent et des interactions entre les écosystèmes et le climat actuel</p>	<p><u>R.14a</u> Étudier et interpréter l'historique du climat du Saint-Laurent et ses impacts sur les écosystèmes / milieux humides</p> <p><u>R.14b</u> Réaliser des études sur l'impact d'une augmentation de CO₂ sur la croissance des espèces végétales (riveraines et aquatiques)</p>
	<p><u>L.15</u> Il existe peu d'études sur l'adaptation à un changement climatique entre Cornwall et Québec</p>	<p><u>R.15</u> Entreprendre une étude multi-disciplinaire permettant de lier les variations de niveaux d'eau historiques et actuelles dans le Saint-Laurent. Le secteur du lac Saint-Pierre est privilégié.</p>
	<p><u>L.16</u> Les niveaux de tolérance des milieux humides et des espèces végétales à des événements climatiques extrêmes ne sont pas les mêmes et doivent être mieux compris principalement pour les écosystèmes en situation précaire ou aux limites de leur aire de distribution</p>	<p><u>R.16a</u> Développer, valider et rendre accessible des indicateurs climatiques caractérisant les situations climatiques extrêmes ayant le plus d'impacts sur les écosystèmes et les milieux humides au Québec</p> <p><u>R.16b</u> Mise en place d'un réseau de suivi ichtyologique permettant d'établir un portrait au moment « zéro » et mieux s'équiper pour pouvoir identifier un changement dans les écosystèmes et les milieux humides</p> <p><u>R.16c</u> Établir des sites de suivi à long terme des écosystèmes dans des régions témoins (e.g. lac Saint-Pierre)</p> <p><u>R.16d</u> Compléter l'établissement d'un nombre limité de stations d'observations multi-disciplinaires de longue durée (données climatiques et écologiques)</p>
	<p><u>L.17</u> Les facteurs responsables de la variabilité naturelle des populations animales doivent être mieux connus</p>	<p><u>R.17</u> Identifier les stades critiques dans le développement des espèces et déterminer les facteurs physiques et biologiques affectant la survie, la croissance et la fécondité des individus</p>
<p><u>les répercussions d'un changement climatique :</u> <u>FAIBLE</u></p> <p>On ne peut trouver que des évaluations qualitatives des impacts potentiels d'un changement climatique sur les écosystèmes et les milieux humides</p>	<p><u>L.18</u> Des dispositifs d'évaluation des changements écologiques selon les scénarios 2xCO₂ les plus probables doivent être mis sur pied</p>	<p><u>R.18a</u> Simuler et examiner les conséquences fauniques probables de divers scénarios 2xCO₂ en fonction des décisions sur la régularisation des eaux du lac Ontario et du Saint-Laurent</p> <p><u>R.18b</u> Amorcer et expérimenter des stratégies de gestion</p>

PÊCHERIES

ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (4)	RECOMMANDATIONS (7)
<p><u>la sensibilité au climat</u> : <u>MOYEN</u></p> <p>On connaît bien les facteurs climatiques qui influent sur les populations d'eau douce mais essentiellement sur le sud de la province . Ce n'est guère le cas en ce qui concerne l'ensemble des espèces en eau salée.</p> <p><u>les répercussions d'un changement climatique</u> : <u>FAIBLE</u></p> <p>L'évaluation des impacts sur les espèces d'eau douce est faite indirectement en utilisant les connaissances actuelles liées aux niveaux d'eau extrêmes. Aucune analyse quantitative sous un environnement 2xCO₂ n'est disponible, surtout pour les populations marines ou nordiques</p>	<p>L.19 L'occurrence, l'ampleur et la synchronisation d'une fluctuation des niveaux/débits d'eau en fonction des habitudes de vie différentes de plusieurs espèces de poissons doivent faire l'objet d'une meilleure connaissance. Il faut poursuivre ou amorcer l'identification des courbes de satisfaction et la mesure de force des cohortes de certaines espèces fragiles à des bas et hauts niveaux d'eau</p>	<p>R.19a Analyser systématiques des épisodes où le niveau d'eau du Saint-Laurent ont atteint des valeurs extrêmes (hauts, bas)</p> <p>R.19b Examiner les impacts de tels niveaux d'eau sur la force des cohortes d'espèces (perchaude, grand brochet, doré jaune, poulamon) dans des secteurs clés du Saint-Laurent par le biais de plan de pêche ou d'un réseau de suivi ichtyologique;</p> <p>R.19c Effectuer un suivi de la pêche sportive en des endroits stratégiques pour cette activité (taille, poids, captures, âge)</p>
	<p>L.20 On connaît très peu de choses sur le comportement des populations d'eau douce et salée dans les régions plus septentrionales du Québec</p>	<p>R.20 Identifier des zones où des études multi-partites pourront être entreprises pour faire les relevés sur les populations des espèces de poissons les plus importantes des plans d'eau du Nord Québécois</p>
	<p>L.21 L'influence de facteurs tels la température et la direction des vents (phénomène de résurgence) selon les saisons sur la présence, la vitalité, le recrutement et la mortalité de certaines espèces est peu étudiée et comprise.</p>	<p>R.21a Sous des conditions spécifiques de froid intense ou de chaleur, connaître les limites correspondantes de tolérance et de mortalité d'espèces sensibles à ce phénomène (e.g. sébaste);</p> <p>R.21b Comprendre la fréquence chronologique et les processus météorologiques, physiques, biologiques et hydrologiques expliquant les variations dans la présence ou le recrutement de certaines espèces</p>
	<p>L.22 Les modèles océaniques et climatiques doivent être couplés pour estimer les régimes thermiques et de circulation dans l'estuaire/golfe du Saint-Laurent et dans la baie d'Hudson afin de pouvoir dégager les répercussions sur les populations et la santé des espèces de poissons vivant dans ces eaux.</p>	<p>R.22 La température de l'eau, la vitesse et la direction du vent, les courants ainsi que les débits d'eau douce provenant du Saint-Laurent et des grandes rivières de la Côte-Nord du Québec devraient être considérées lors de l'élaboration des modèles prédictifs des débarquements sous un scénario 2xCO₂ et pour des espèces vivant en surface. Tout effort d'arrimer la modélisation océanique, climatique, hydrologique et de glaces à une échelle suffisamment fine devra être encouragé.</p>

FORESTERIE

ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (4)	RECOMMANDATIONS (6)	
<p><u>la sensibilité au climat</u> : <u>MOYEN</u></p> <p>Pour un nombre limité d'espèces forestières, les mécanismes liant l'écosystème forestier, l'atmosphère et le sol sont bien connus. Il devient cependant difficile de transposer ces connaissances sur une longue période ou pour l'ensemble de la province</p>	<p>L.25 Le réseau de monitoring actuel montre des signes d'instabilité quant au suivi de l'état de santé des populations forestières au Québec face à des stress climatiques accentués</p>	<p>R.25 Maintenir un réseau de monitoring ayant une résolution spatiale et temporelle suffisante pour faire un suivi au Québec:</p> <ul style="list-style-type: none"> • de la composition et l'évolution des populations; • des régions où les forêts sont particulièrement sensibles aux perturbations climatiques; • des interactions entre la croissance, la mortalité, le bilan hydrique, le contenu en carbone/azote et le climat 	
	<p>L.26 Le rôle des facteurs climatiques dans la distribution et le déplacement des populations forestières doit être mieux connu</p>	<p>R.26 Afin de prévoir les variations dans les types de peuplements, un couplage entre les modèles biologiques et climatiques est requis à court terme, intégrant le cycle du carbone et de l'azote dans l'écosystème forestier, le bilan hydrique, la faune et les habitats</p> <p>R.26b Favoriser des projets multi-disciplinaires applicables à court terme mettant en contact les gestionnaires forestiers et des spécialistes en climatologie, en biologie et en écologie</p>	
	<p><u>les répercussions d'un changement climatique</u> : <u>FAIBLE</u></p>	<p>L.27 Les perturbations naturelles extrêmes (feux de forêt, verglas, etc..) doivent être modélisées afin d'estimer, à moyen terme, les impacts sur les populations forestières touchées</p>	<p>R.27 Considérant qu'une fréquence plus élevée dans le nombre de perturbations « naturelles » pourrait être un signe précurseur d'un changement climatique, il devient urgent de mieux décrire les interactions biologiques et écologiques existant entre un événement extrême (feux de forêt, tempête de verglas, etc..) et les populations</p>
	<p>Plusieurs simulations climat-végétation ne tenant cependant pas compte des sols, des caractéristiques biologiques et de l'incidence des extrêmes climatiques ont été faites sur les principaux biomes forestiers du Québec. Un couplage des modèles biologiques et des modèles régionaux du climat a été amorcé</p>	<p>L.28 Suscité par la capacité des forêts boréale et tempérée à emmagasiner le carbone, il est important de parfaire notre compréhension des échanges existant entre l'écosystème forestier, l'atmosphère et le sol.</p>	<p>R.28a Si on désire que les travaux sylvicoles choisis optimisent à la fois la production forestière et la séquestration du carbone dans l'écosystème forestier, mener des études spécifiques sur le lien entre les conditions climatiques et l'allocation de carbone par diverses populations forestières</p> <p>R.28b Préciser les conséquences cumulatives sur les populations forestières sous divers scénarios 2xCO₂; connaître les impacts de l'augmentation du CO₂ et de la température sur la croissance des essences; adapter les techniques d'aménagement forestier</p>

<u>ÉNERGIE</u>		
ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (2)	RECOMMANDATIONS (2)
<p><u>la sensibilité au climat</u> : <u>BON</u></p> <p>Bien que l'on saisit très bien l'importance du climat sur l'offre et la demande énergétique, les indicateurs climatiques habituellement utilisés sont généraux et peu développés</p> <p><u>les répercussions d'un changement climatique</u> : <u>MOYEN</u></p> <p>Les études existantes se sont limitées à estimer les variations en apport d'eau dans les réservoirs hydro-électriques et les bassins versants les plus importants du Nord du Québec</p>	<p>L.23 Il n'existe pas de méthodes efficaces pour lier les fluctuations climatiques régionales aux besoins en chauffage et en climatisation, en apport net d'eau dans les réservoirs du Nord du Québec et à la capacité des centrales hydro-électriques le long du Saint-Laurent</p>	<p>R.23 En se basant sur les données des 30 dernières années au Québec, développer et valider des indicateurs climatiques ayant une résolution spatiale et temporelle suffisante pour corréler ces indicateurs aux données effectives d'utilisation d'énergie pour fins de chauffage et de climatisation en tenant compte des améliorations technologiques mises en place pour réduire la consommation d'énergie</p>
	<p>L.24 La répartition énergétique du Québec dans un environnement 2xCO₂ doit être évaluée afin de suffire aux besoins domestiques tout en estimant le potentiel d'exportation d'énergie vers les régions limitrophes au Québec</p>	<p>R.24 Par le biais des modèles régionaux du climat (résolution 30-40 km) et l'utilisation des indicateurs climatiques, indiquer le positionnement stratégique du secteur énergétique québécois dans un contexte nord-américain en comparant l'offre et la demande d'énergie sous un scénario 2xCO₂.</p>

<u>TRANSPORT</u>		
ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (2)	RECOMMANDATIONS (2)
<p><u>la sensibilité au climat</u> : <u>MOYEN</u></p> <p>Un bon nombre d'études techniques liant un type de transport et les conditions climatiques existent. On n'a cependant aucune vue d'ensemble de l'importance du climat sur le transport au Québec</p> <p><u>les répercussions d'un changement climatique</u> : <u>TRÈS FAIBLE</u></p> <p>Seul le domaine du transport maritime sur le Saint-Laurent a été indirectement considéré sous un scénario 2xCO₂</p>	<p>L.30 La quantification des répercussions des conditions hivernales actuelles et futures sur le transport routier devra être accentuée et adéquatement documentée</p>	<p>R.30 Le coût global des répercussions des tempêtes hivernales et des conditions de gel/dégel devrait être évalué et documenté en attendant que les modèles régionaux du climat puissent donner des indications fiables sur la trajectoire et l'intensité des dépressions météorologiques dans un environnement 2xCO₂</p>
	<p>L. 31 Des mesures d'adaptation devront être développées dans le milieu maritime pour minimiser les impacts des épisodes (durée et intensité) anormalement basses des niveaux d'eau dans le Saint-Laurent</p>	<p>R.31 Le couplage de modèles économétriques et hydrodynamiques permettant de prévoir les niveaux/débits d'eau sur le Saint-Laurent sont encouragés afin de déterminer les modifications à être apportées à la morphologie future des navires et aux types de cargo à favoriser pour assurer un positionnement stratégique avantageux aux ports maritimes du Québec</p>

INFRASTRUCTURES ET PERGÉLISOL

ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (1)	RECOMMANDATIONS (4)
<p><u>la sensibilité au climat :</u> <u>FAIBLE</u> On est en mesure de cerner l'importance relative du régime thermique dans le comportement du pergélisol du Nord du Québec. Mais les données disponibles ne nous permettent pas de quantifier ces processus sur une échelle spatiale et temporelle</p> <p><u>les répercussions d'un changement climatique</u> <u>TRÈS FAIBLE</u> Une seule étude spécifique au Québec. On doit utiliser et adapter les études faites ailleurs au pays (e.g. bassin du Mackenzie)</p>	<p><u>L.29</u> Un réchauffement climatique dans le Nord du Québec augmentera la profondeur de la couche active du pergélisol, en réduira la capacité portante et fera croître l'instabilité des versants et du relief. Tous ces aspects ont un impact direct sur les infrastructures routières, maritimes, hydro-électriques et gouvernementales.</p>	<p><u>R.29a</u> Les réseaux de mesures thermiques (air et sol) doivent être maintenus et automatisés afin de pouvoir suivre l'évolution du climat et du pergélisol dans le Nord du Québec</p> <p><u>R.29b</u> Dresser la carte des régions arctiques et subarctiques établies des sols sensibles et riches en glace permettant, sous un scénario 2xCO₂, de cerner les endroits où des changements écologiques majeurs sont vulnérables à la fonte de pergélisol</p> <p><u>R.29c</u> Déterminer, sous un environnement 2xCO₂, les facteurs de sécurité requis pour la conception de construction afin de prévenir les dégâts onéreux résultant de l'affaissement d'infrastructures sous un pergélisol en processus de fonte</p> <p><u>R.29d</u> Évaluer les coûts actuels des dommages aux infrastructures directement liés aux événements climatiques extrêmes</p>

LOISIRS ET TOURISME

ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (1)	RECOMMANDATIONS (2)
<p><u>la sensibilité au climat :</u> <u>FAIBLE</u> Seuls le ski alpin, le golf et indirectement la navigation de plaisance ont été examinés</p> <p><u>les répercussions d'un changement climatique :</u> <u>FAIBLE</u> Rien à part deux études sur le ski et le golf</p>	<p><u>L.32</u> Les seules études faites dans le domaine des loisirs et du tourisme ont traité du ski alpin et du golf en plus de toucher indirectement à la navigation de plaisance. Considérant l'importance de ce secteur au Québec, il est primordial que l'approche soit élargie à l'ensemble des activités récréatives et du potentiel touristique régional</p>	<p><u>R.32a</u> Identifier, en les documentant au maximum, les critères de satisfaction requis pour la tenue d'activités récréatives au Québec, incluant les alternatives disponibles à chacune de ces activités de loisirs</p> <p><u>R.32b</u> Évaluer les retombées économiques actuelles des loisirs au Québec et tenter de les lier à des indicateurs climatiques qui leur sont représentatifs</p>

PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES EXTRÊMES

ÉVALUATION SYNTHÈSE DU NIVEAU DE CONNAISSANCES SUR	LACUNES ACTUELLES (2)	RECOMMANDATIONS (3)
<p><u>la sensibilité au climat :</u> <u>FAIBLE</u></p> <p>Bien qu'il existe un nombre important de références, rapports, études sur des événements climatiques extrêmes, la majorité d'entre elles ont considéré les répercussions économiques des dommages matériels et en pertes de vie. Les aspects sociaux et biologiques ont été, sauf en de rares occasions, ignorés.</p>	<p><u>R.33</u> La liste des phénomènes climatiques extrêmes qui se sont produits dans le passé au Québec est incomplète, parfois contradictoire, mal documentée tout en ne contenant pas assez d'informations pour en évaluer la portée globale au niveau physique, social, économique et biologique.</p>	<p><u>R.33a</u> Que l'information concernant le coût et les conséquences physiques, biologiques et sociales des phénomènes climatiques extrêmes, plus particulièrement les inondations, les sécheresses, les vagues de froid et de chaleur ainsi que les épisodes de temps violent plus spécifiquement les tornades et la forte grêle et les tempêtes hivernales soit rassemblée et maintenue à la disposition des preneurs de décision;</p> <p><u>R.33b</u> Qu'une méthodologie d'analyse et d'évaluation des répercussions des phénomènes climatiques extrêmes à partir de données directes ou indirectes soit développée et appliquée systématiquement pour fins de planification</p>
<p><u>les répercussions d'un changement climatique :</u> <u>TRÈS FAIBLE</u></p> <p>Aucune étude n'est disponible au Québec sur les changements à la fréquence, à l'intensité et à la durée des événements extrêmes sous un scénario 2xCO₂</p>	<p><u>L.34</u> Les scénarios de changement climatique actuels ne sont pas en mesure d'indiquer si la fréquence, l'intensité ou la durée des phénomènes climatiques extrêmes varieront, de façon significative, dans un environnement de 2xCO₂.</p>	<p><u>R.34</u> En attendant que les scénarios de changement climatique puissent adéquatement fournir une indication valable des répercussions de l'augmentation des gaz à effet de serre sur les phénomènes climatiques extrêmes, il est recommandé de déterminer la sensibilité des divers secteurs et l'ampleur des impacts aux extrêmes climatiques en faisant varier, par un facteur déterminé, la fréquence, la durée et l'intensité de ces événements climatiques anormaux</p>

CONCLUSION

Le présent chapitre québécois de l'Étude pan-canadienne sur les répercussions et l'adaptation au changement climatique tire les conclusions suivantes :

- il existe une quantité impressionnante d'informations scientifiques portant sur le lien climat-secteurs au Québec, mais qui est très variable selon le secteur ;
- les ressources en eau, l'agriculture et la foresterie semblent être les secteurs où on a le plus d'informations, autant sur le lien actuel et passé avec le climat, mais également où on retrouve le plus grand nombre d'études ayant considéré les répercussions potentielles d'un scénario 2xCO₂ ;
- tout reste à faire dans les domaines de la santé humaine et des aspects sociaux, des pêcheries, du maintien et de la pérennité des infrastructures ainsi que pour les loisirs et le tourisme ;
- l'étude a clairement démontré notre grande sensibilité aux phénomènes climatiques extrêmes qui, malgré leurs impacts majeurs sur le Québec, doivent être beaucoup mieux documentés et analysés spatialement et temporellement.

Avec ses 34 lacunes de connaissances et ses 57 recommandations, le chapitre québécois (tome V) de l'Étude pan-canadienne vise d'être le tremplin pour le développement, l'élaboration et l'implantation de mesures d'adaptation judicieuses et concrètes à une modification de la variabilité climatique d'origine naturelle ou anthropique.

THE QUEBEC CHAPTER OF THE CANADA COUNTRY STUDY
: CLIMATE IMPACTS AND ADAPTATION
executive summary

Quebec has a varied climate. Many examples can be given of the considerable effects that climate fluctuations can have on the everyday lives of people living in the province. The increase in greenhouse gas concentrations, observed worldwide, is exerting additional pressure on the Earth's climate system. Very little is known about the mechanisms of climate response to recent anthropogenic factors of this type, and no precise data are available at present on the role that the oceans, polar regions, ecosystems and other components play, directly or indirectly, in this regard.

In its second assessment report, tabled in 1995, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), which is composed of 135 countries and over 350 well-known scientists, stated for the first time that: "The balance of evidence suggests a discernible human influence on global climate". However, at the regional and local scales, controversy still exists regarding the magnitude, speed and nature of climate changes, and these issues will continue to be discussed and debated over the coming years. Shedding light on all these aspects of climate change will remain a major challenge for the scientific community.

To ensure that Quebec society is able to adapt and make suitable adjustments in the event of climate change, we need to gain a much better understanding of the characteristics of the province's climate, together with the positive and negative impacts that climate fluctuations, in some cases extreme, will have on all our resources, use patterns and activities as a whole. By more fully documenting the relationship between climate, nature and society, we will enhance our ability to adjust and adapt to even a slight modification in the range of future climate conditions. Therefore, the Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation is just what is needed at this time.

The Canada Country Study is divided into two phases. Phase I began in summer 1996 and will end in fall 1997. It consists in conducting an exhaustive review and evaluation of the existing literature on climate impacts and adaptation in Canada. Present gaps in our knowledge will be identified and recommendations will be made on avenues of research that should be pursued to remedy these deficiencies during the course of a second phase, slated to begin in late 1997 and continue for five years.

In Phase I, summary reports will be published, specifically a national summary for policy makers, a plain language national summary and six plain language regional summaries. The summaries will be prepared on the basis of information contained in 25 reports and articles published in 8 volumes, as follows:

- Volume I - British Columbia and the Yukon
- Volume II - The Arctic
- Volume III - The Prairies
- Volume IV - Ontario
- *Volume V - Quebec*
- Volume VI - The Maritimes

- Volume VII - Climate change as examined from the perspective of a dozen or so strategic sectors of national interest, including agriculture, infrastructure, energy, forestry, fisheries, human health, recreation and tourism, transportation, ecosystems and wetlands and water resources.
- Volume VIII - Climate change examined with reference to seven crosscutting issues of national interest. The issues are changing land use patterns, internal trade, crossborder influences, extreme weather events, atmospheric issues, sustainable development and the two economies (north and south).

Environment Canada and *the Association de climatologie du Québec* are very pleased to present *the Quebec Chapter of the Canada Country Study - Volume V*. Throughout this document, a special effort has been made to carefully situate the problem of climate change in the Quebec context by referring to past and present climate events, some of which are documented, in order to highlight the magnitude and significance of the associated impacts in Quebec.

A three-stage approach was adopted in designing and preparing the Quebec component of the Canada Country Study:

- 1) an exhaustive and rigorous inventory of scientific articles, studies, reports and initiatives was conducted, to quantify the links between past and present climate fluctuations in Quebec and their effect on 10 strategic sectors, and to summarize current knowledge of the potential impacts of climate change induced by an increase in greenhouse gas concentrations;
- 2) two forums were held, in Montreal and Quebec City, in April 1997. The purpose of the two workshops, which brought together specialists from various disciplines, was to raise participants' awareness of the issues, validate the information collected to date on the current knowledge base, and initiate collective thinking on the steps to be taken to develop effective measures for adapting to climate change;
- 3) the third stage involved drafting and revising the present document.

Without the active contribution and collaboration of the 100 or so experts from various fields who were contacted during the study, it would have been difficult to complete this report, which is intended as a first step toward ensuring more effective adaptation to a modification in climate variability.

REGIONAL CONTEXT

Quebec stretches more than 1 950 km from north to south, and more than 1 500 km from east to west at certain latitudes. The province's total land area is just under 1.5 million km², of which 940 000 km² is covered by forests and 184 000 km² by fresh water. Quebec's population, estimated at 7.2 million in 1994, makes up 25.1% of Canada's total population.

The St Lawrence River is the jewel in the crown of the Quebec landscape. On a world scale, the river ranks 17th in length, 13th in watershed area, and 15th in discharge volume. It is fed by some 350 tributaries and contains more than 1250 islands. An estimated 97% of Quebecers live within its watershed, and two thirds of the population (69.5%) inhabits a 10-km strip of land on either side of the river.

Quebec's economy is based mainly on its strong tertiary sector, which generates \$96.9 billion (1991) and represents 71.8% of the gross domestic product (GDP). The secondary sector (manufacturing industries, construction), worth \$33.6 billion, accounts for 24.9% of the GDP. Finally, a large part of Quebec's economic activities centre on the use of natural resources (agriculture, forestry, mining), making up 3.2% of the GDP.

QUEBEC'S CLIMATE

Quebec has experienced significant climate fluctuations since the end of the last glacial epoch. It is estimated that 6 000 years ago, the mean temperature was about 1 oC higher than it is today.

Systematic recording of meteorological observations began only some 125 years ago, which means the province's climate history cannot be traced back very far. Nonetheless, geomorphological (fossils), ecological (pollen) and dendrochronological (tree rings) research has helped to shed light on the temperature regime and, in some cases, the humidity conditions that existed during the last millennium. The table below, although it must be interpreted with caution, is intended to give an overview of Quebec's recent climate history.

Climate history of Quebec over the past millennium

Period considered	900 to 1200	1200 to 1400	1400 to 1570	1570 to 1880	1880 to 1900	1900 to 1930	1930 to 1960	1960 to the present
Climate trend	Warm and humid	Cold and dry	Mild and humid	Cool, humid summers Cold, windy winters	Pronounced warming	Cold or cool	Mild	Near or slightly below normal
Source of data¹ and Area of Quebec considered	Geo Eco Dendro for subarctic Quebec	Eco Dendro for subarctic Quebec	Geo Eco Dendro for subarctic Quebec	Eco Dendro for subarctic Quebec	Meteo for southern Quebec Dendro for subarctic Quebec	Meteo for southern Quebec	Meteo for all of Quebec	Meteo for all of Quebec
<p><u>Reference period for normal conditions:</u> 1951-1980</p> <p><i>warm</i> : more than 0.5 °C above normal</p> <p><i>mild</i> : 0.25 to 0.5 °C above normal</p> <p><i>cool</i> : 0.25 to 0.5 °C below normal</p> <p><i>cold</i> : more than 0.5 °C below normal</p>								
<p>Note 1 : Indicates the type of data used to determine the climate trend :</p> <p>Geo : geomorphological data (e.g. fossils)</p> <p>Eco : ecological data (e.g. pollen)</p> <p>Dendro : dendrochronological data (tree ring analysis)</p> <p>Meteo : data from meteorological or climatological networks</p>								

FUTURE CLIMATE AS ENVISAGED IN CLIMATE CHANGE SCENARIOS(2xCO2)

The increase in concentrations of carbon dioxide and other greenhouse gases is now a recognized fact within the scientific community, in light of evidence that atmospheric CO₂ concentrations have risen from 280 ppmv in pre-industrial times to over 360 ppmv in 1996. Over the past 15 years, general circulation models (GCMs) have come into use as a tool for simulating the energy balance of Earth's atmosphere, and are now accepted around the world as a means of projecting the potential effects of increased greenhouse gas levels. The output from general circulation models is called « *climate change scenarios or 2xCO₂ scenarios* ».

General circulation models (GCMs) are mathematical representations of physical laws designed to simulate, as fully as possible and three-dimensionally, the global climate system. They include information on present and future concentrations of greenhouse gases, and the most recent versions have begun to incorporate atmospheric aerosols, particularly since the eruption of Mt. Pinatubo in 1991. About a dozen GCMs exist worldwide, including a Canadian model (CCC GCM II - 1992).

All the present GCMs have the ability to simulate and compare reference conditions (1xCO₂ concentrations, ranging from 300 to 330 ppmv) with an atmosphere in which the carbon dioxide concentration is doubled (2xCO₂, i.e. 600-660 ppmv). GCMs divide the Earth's surface into a grid containing a large number of spatial points, and calculate present climate conditions for all those points. Land use, bodies of water, topography, oceans and glaciers are examples of the variables included as parameters in the modelling, in view of the clear-cut role they play in the Earth's energy balance, both as part of recent (1xCO₂ scenario) and future (2xCO₂ scenario) conditions.

Simulations are performed using mathematical and physical formulas which may vary among the different GCMs. At present, for example, the spatial resolution of GCMs ranges from 200 to 300 km. Although the Canadian general circulation model has a higher spatial resolution (smaller distance between points) than many of the other existing models, it should be acknowledged that, intrinsically and given the high cost of performing simulations, GCMs as a whole can provide only a very crude representation of real environmental conditions.

It would not be wise to blindly compare scenarios generated by the different GCMs since they employ different mathematical formulas and representations of physical processes. There is a whole series of arguments that support a prudent approach in using GCMs; however, they do not negate or diminish the usefulness of this tool in identifying trends and indications on what the future climate would be like in the event of a doubling of CO₂ concentrations.

Although GCMs can be used to predict the magnitude of the climate's response to a substantial increase in greenhouse gas concentrations globally, a very high degree of uncertainty exists in applying the models on a regional scale. Differences in regional temperature and precipitation patterns explain why the models should not be used blindly. In view of this, advances in the development of regional climate models are being followed very closely. Once regional models have achieved a high enough resolution so they can more accurately represent the physical processes governing the air, water and soil, they will be able to interface with GCMs and support decision-making in the various sectors impacted by increased climate variability.

What does future climate change hold in store for Quebec?

From a comparative review of the different climate change scenarios that have been derived from GCMs and are applicable to Quebec, certain observations can be made about the temperature and precipitation regimes that might exist in a doubled-CO2 climate.

- a) a general warming trend of +1 to +4 °C throughout southern Quebec and +2 to +6 °C in the northern part of the province. The warming will be amplified during the winter and more widespread and intense in Northern Quebec;*
- b) with a doubling of atmospheric CO₂, southern Quebec should receive amounts of precipitation that are near or slightly above the seasonal average (0% to +10%). More northerly regions in Quebec would receive 10 to 20% more precipitation than at present. Note, however, that spatial (considering the different regions in the province) and temporal (seasonal) differences are greater for the precipitation scenarios derived from GCMs than for the projected 2xCO₂ temperature regime.*

No indications are provided in climate change scenarios on the frequency, duration and intensity of extreme climate events (drought, flooding, cold and heat waves, winter storms, etc.), nor on potential modifications in the mean track of weather systems that affect Quebec.

Variation in mean temperature and seasonal precipitation as projected by various climate change scenarios based on a doubling of CO₂

	<u>Southern Quebec</u> <i>Warming of 1 to 4 °C</i>	<u>Northern Quebec</u> <i>Warming of 2 to 4 °C</i>
<u>Spring</u> (March to May)	<i>0 to 20% more precipitation</i>	<i>0 to 20% more precipitation</i>
<u>Summer</u> (June to August)	<i>Warming of 1 to 4 °C</i> <i>Precipitation ranging within 10% of present values</i>	<i>Warming of 2 to 4 °C</i> <i>0 to 20% more precipitation</i>
<u>Fall</u> (Sept to Nov)	<i>Warming of 1 to 3 °C</i> <i>GCMs disagree on the variation in precipitation, with projections ranging from +10% to -30% relative to current values</i>	<i>Warming of 2 to 5 °C</i> <i>0 to 20% more precipitation</i>
<u>Winter</u> (Dec. to Feb.)	<i>Warming of 2 to 6 °C</i> <i>5 to 20% more precipitation</i>	<i>Warming of 2 to 9 °C</i> <i>0 to 20% more precipitation</i>

MAGNITUDE OF EXTREME CLIMATE EVENTS

Climate can be viewed as a statistical distribution representing all of the weather events affecting a given region. The frequency, magnitude, duration and sequence of these weather events can result in extreme climatic events that may in some cases be highly detrimental to Quebec society and to natural ecosystems.

The history of Quebec has been marked by naturally occurring climate events of drastic scope that are simply part of the province's climate regime. A striking example of this is the "year without a summer" or "the black summer" of 1816 which stands out in the climatology annals of North America. This event is believed to have been linked to the intense volcanic eruption of Tambora, near Java, Indonesia in April 1815, which ejected an estimated 150 million tonnes of volcanic dust into the atmosphere. The repercussions in summer 1816 were disastrous for Quebec.

Climate anomalies have occurred on other occasions in the past and are simply part of the intrinsic characteristics of past and present climate. But what will happen to the future climate given the ever-greater impact of human activities? Will there be more or fewer cold waves, tornadoes, floods and periods of drought in a future climate characterized by increased greenhouse gas concentrations? The answer to these questions is a matter of considerable controversy within the scientific community. Over the past 20 years, scientists have been trying to gain a better understanding of and predict the response of Earth's climate system to rising greenhouse gas levels, so as to evaluate the impacts on the frequency, duration and intensity of extreme climate events and on the track taken by weather systems that affect the province daily.

It is of paramount importance to have a clear understanding of the spatial and temporal distribution of abnormally intense climatic events, in addition to the most precise and accurate knowledge possible of the range of associated effects. If the global increase in greenhouse gas concentrations is bringing about changes in the frequency, duration and intensity of extreme climatic phenomena, it is imperative that we be able to detect this process rapidly and evaluate all of the consequences.

Five categories of extreme climate events are examined in the Quebec Chapter of the Canada Country Study: they are considered the most damaging and most typical of Quebec's climate. They are:

- P floods;*
- P drought;*
- P winter storms;*
- P intense cold waves and oppressive heat waves;*
- P severe convective summer weather systems (storms), specij and hailstorms.*

CHARACTERISTICS OF EXTREME CLIMATE EVENTS IN QUEBEC

FLOODS

- various causes: spring meltwater, ice jams, sudden cresting of rivers
- at least one major flood every year
- all regions of Quebec are affected, especially south of the 50th parallel
- appreciable increase in risks and damage during winters/springs with wide temperature fluctuations (freeze/thaw)
- growing problem of flooding associated with heavy rainfall
- major impacts on riverside populations, buildings and transportation infrastructure (highways, bridges, culverts)
- mean annual damage estimated at \$10-15 million

DROUGHT

- an insidious phenomenon that is rarely foreseeable and affects mainly southwestern Quebec, with at least one period of drought every summer
- the earliest impacts are observed in agriculture (crop yields, irrigation); increased risk of forest fires; reduction in the quality and quantity of water; interruptions in drinking water supply
- prolonged drought (water shortage lasting a number of weeks) can affect water tables, water levels in the St. Lawrence River (impacts on shipping and pleasure boating), levels in hydro-electric reservoirs (impact on production) and wetland ecosystems (drying up of marshes)

HEAT WAVES

- occur at least once a year, especially in July
- affect mainly southern and southwestern Quebec, with a more drastic effect in large urban centres (urban heat islands)
- potential impact on the well-being and health of children, the elderly and people with cardio-respiratory problems
- a winter heat wave (temperature > 0°C) raises the risk of ice jam flooding, apple tree mortality, and can reduce maple syrup production.

WINTER STORMS

- occur in various forms (snow storms, blizzards, freezing rain) many times a year
- primarily affect the St. Lawrence corridor (where more than 2/3 of the population lives), and show increasing intensity from west to east
- have a pronounced adverse impact on land-based transportation (loss of life and injuries, material damage, mobility of users, cost of maintaining transportation networks)
- storms with freezing rain have the most serious impacts: power failures and associated consequences, destruction of trees and shrubs, severe transportation problems, etc.

SEVERE SUMMER WEATHER

- these phenomena vary over time and space, making forecasting and monitoring difficult
- concentrated in southern Quebec
- over 100 confirmed events on average every year
- marked adverse impact on a number of economic sectors (agriculture, infrastructure and buildings, recreational activities, safety of people and property)
- the costs associated with these events are enormous but not computed globally

COLD WAVES

- occur at least once a year, above all in January and February
- affect mainly areas north of the 48th parallel
- Quebecers have adapted well to cold waves (warmer clothing, reduction in travel and outings), but they present a potential problem for the homeless
- hydrological impacts (decline in temperatures, production of frazil ice in rivers) influence the health of fish populations

It seems important to reiterate that, although more and more research is being done on the link between climate change and extreme climatic events, present 2xCO₂ scenarios do not provide any indication of the expected frequency, duration or intensity of such events, nor do they examine the impact on the mean track of weather systems that impinge on Quebec. However, some early studies done primarily in the United States show that severe climatic events might increase in a warmer climate.

OVERVIEW OF THE SITUATION

The Quebec Chapter of the Canada Country Study has provided the opportunity to systematically examine our knowledge of past, present and future climate fluctuations in relation to ten strategic sectors in Quebec. This review underscores the appreciable extent to which several of these spheres of activity are sensitive to extreme climate events.

Preparing the Quebec Chapter of the Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation has involved compiling a phenomenal amount of information, evaluating current knowledge and identifying potential solutions for information gaps and avenues for future research. Whereas some sectors are well-documented, only very sketchy information exists on other sectors and their links with climate. The challenge of this project consisted in identifying the existing gaps in knowledge in an objective and realistic manner, without losing sight of the possible imbalance in our current understanding of the effects of climate variability on Quebec resources, use patterns and activities.

For each sector examined, a summary table has been prepared in order to:

- evaluate present knowledge of the relationship between climate and the different sectors, based on 5 rating categories (sketchy, poor, average, good, very good);
- summarize current knowledge of the magnitude and intensity of the repercussions of climate change on the selected sectors, based on 5 rating categories (sketchy, poor, average, good, very good);
- identify, in order of priority, the existing knowledge gaps for the sectors;
- for each knowledge gap, suggest potential solutions and make specific recommendations aimed at remedying deficiencies in the short or medium term.

<u>WATER RESOURCES</u>		
OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (6)	RECOMMENDATIONS (7)
<p><u>sensitivity to climate:</u> <u>GOOD</u> Specific and single-purpose studies, mainly on the St Lawrence, showing the relationship between variations in water levels and use patterns, riparian ecosystems, and the different life stages of aquatic fauna</p> <p><u>effects of climate change:</u> <u>AVERAGE</u></p> <p>A quantitative estimate has been made solely of future water requirements in southern Quebec, flow levels in the fluvial stretch of the St Lawrence and the net water input from each watershed in northern Quebec</p>	<p><u>G.1</u> Systematic and comprehensive documentation of record high and low water levels and their effects on the St Lawrence as a whole (river, estuary and Gulf) is lacking and an urgent solution needs to be found.</p>	<p><u>R.1</u> Compile, document and list all the impacts of record high and low water levels in the St. Lawrence in terms of particle transport, water quality, the salinity front, circulation of marine water masses and vertical stratification.</p>
	<p><u>G.2</u> There is an obvious lack of suitable indicators for quantitatively assessing water quantity/quality in relation to abnormal and significant climate fluctuations.</p>	<p><u>R.2</u> Develop, validate and quickly make available climate indicators for evaluating abnormal climate fluctuations that can influence the water use patterns and resources in Quebec.</p>
	<p><u>G.3</u> The link between decadal hydrologic cycles and climate systems is not well understood, particularly for northern Quebec.</p>	<p><u>R.3a</u> Select 1 or 2 subbasins in Quebec where an integrated and comprehensive analysis of the hydrologic cycle can be conducted, taking into account the spatial and temporal constraints of the available climatological and hydrological data.</p> <p><u>R.3b</u> Detailed analysis and monitoring of extreme flooding events (e.g. Saguenay in 1996)</p>
	<p><u>G.4</u> A more in-depth examination of water quality and supply in relation to extreme climate fluctuations is required in order to better assess future drinking water needs.</p>	<p><u>R.4</u> Collate statistics on drinking water use patterns in the large urban agglomerations in Quebec and quantify the related sensitivity to extreme climate fluctuations and expected climate change</p>
	<p><u>G.5</u> The mechanisms linking shoreline erosion and the intensity/track of weather systems need to be better understood and quantified.</p>	<p><u>R.5</u> Document and analyse the frequency, magnitude, track and duration of the weather systems that traverse Quebec, with a focus on precipitation and winds</p>
	<p><u>G.6</u> Little is known about Quebec's ability to export fresh water in a context of increased climate variability.</p>	<p><u>R.6</u> Identify the comparative advantages of Quebec's water supply, versus that of adjacent regions, under a climate change scenario</p>

HEALTH AND SOCIAL ASPECTS

OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (3)	RECOMMENDATIONS (7)
<p><u><i>sensitivity to climate:</i></u> <u>POOR</u></p> <p>Very few studies are available that identify links between the effects of extreme climate events and human health and social behaviour in Quebec, except only indirectly associated with climate or specific contaminants</p>	<p>G.7 Quantification of the direct and indirect sensitivity of human health and social behaviour to extreme climate events (floods, cold and heat waves, winter storms, etc.)</p>	<p>R.7a Initiate multidisciplinary studies to quantitatively assess the direct impacts of oppressive heat waves, intense cold waves and winter storms on morbidity and human mortality and on the social behaviour of people living in urban and semi-urban environments in Quebec</p> <p>R.7b Examine the indirect relationships that exist between climate variability, air/water quality and health. Monitor water-borne diseases.</p> <p>R.7c Closely monitor emerging infectious diseases and those associated with crops and nutrition</p>
<p><u><i>effects of climate change:</i></u> <u>SKETCHY</u></p> <p>Aside from one study estimating the number of deaths caused by an increase in the number of oppressive heat waves in Montreal, no research has been done on this topic</p>	<p>G.8 We need to gain a better understanding of how increased climate variability here or elsewhere in the world can have an impact, in Quebec, on community identity, safety, integration, density, displacement of people, and the ability of existing social institutions to adapt.</p> <p>G.9 The awareness of the medical/social community of the impacts of climate change on human health and social behaviour must be enhanced on a priority basis</p>	<p>R.8a By using 2xCO₂ scenarios divided into 10-year periods in order to determine the trend in the number of extreme climate events (particularly intense cold waves and oppressive heat waves), provide a qualitative estimate of the first-order impacts on human health and social behaviour in Quebec</p> <p>R.8b Considering the present or future influx of climate change refugees, prepare a qualitative assessment of the pressure exerted by climate change on the social fabric and on cultural, food consumption and social habits, in a limited number of regions in Quebec</p> <p>R.9a Include a health-climate change program in medical and science curricula for professionals</p> <p>R.9b Support and promote interdisciplinary research on the links between health and climate; bring data banks up to date and make them more accessible to researchers, physicians and social service staff</p>

<u>AGRICULTURE</u>		
OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (4)	RECOMMENDATIONS (7)
<p><u>sensitivity to climate:</u> <u>AVERAGE</u></p> <p>The positive and negative effects of daily climate fluctuations on agriculture are known at the local or regional level. The sector has considerable ability to adapt in the short term</p>	<p><u>G.10</u> There is a lack of indicators that can be used to monitor and identify abnormal climate fluctuations that are responsible for positive or negative impacts on agriculture</p>	<p><u>R.10a</u> Give priority to the continued operation of stations that have a lengthy data series and can help to detect any trends indicating a change in climate variability in Quebec</p> <p><u>R.10b</u> Develop, validate and make accessible climate indicators that can be used to identify climatic seasons during which yields attain record levels</p>
	<p><u>L.11</u> Crop damage caused by extreme climate events has not been documented sufficiently or systematically</p>	<p><u>R.11</u> By studying all periods of drought, hail and winter freeze/thaw conditions over the past 20 years, identify the quantitative link between the intensity of these events and crop damage</p>
<p><u>effects of climate change:</u> <u>AVERAGE</u></p> <p>A large number of high-quality quantitative studies exist on the effects of doubled CO₂ on the yields of a number of Quebec crops and the response of some plants</p>	<p><u>L.12</u> There is a pressing need to train agricultural producers so they can more effectively manage climate information in their routine operations</p>	<p><u>R.12</u> From the standpoint of farm plans, examine the climatic factors that are likely to optimize and facilitate water management, decision making, tillage, pest control treatments and building construction.</p>
	<p><u>L.13</u> Current models simulating the links between plants and climate parameters are too general and empirical, in addition to presenting frequent problems of scale (e.g. individual farm versus the resolution of GCMs, impacts of one-time events versus cumulative effects). The comparative advantage of Quebec's agricultural sector on the international level needs to be studied further.</p>	<p><u>R.13a</u> Conduct studies to identify the relationships between water availability, plant growth, CO₂ levels and climate conditions by using models adapted to the local or regional scale</p> <p><u>R.13b</u> Model the variation in plant yields based on the different types of climate-induced stimulation likely to occur with a 2xCO₂ environment in Quebec (including the development of pest insects, parasites, and fungicide and pesticide use). Determine the crops that are most likely to be exported to countries hit by climate change</p> <p><u>R.13c</u> Adapt the development of hybrids to a broader climate spectrum (e.g: grain corn)</p>

ECOSYSTEMS AND WETLANDS

OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (5)	RECOMMENDATIONS (10)
<p><i>sensitivity to climate:</i> <u>AVERAGE</u></p> <p>For specific low water level events on the St Lawrence, the magnitude of the effects on ecosystems and wetlands is known fairly well. Little work has been done elsewhere in Quebec (except with regard to avian fauna) and almost none in Northern Quebec</p>	<p><u>G.14</u> We need a better understanding of the functioning of the St Lawrence and interactions between ecosystems and the present climate</p>	<p><u>R.14a</u> Study and interpret the climate history of the St Lawrence and the related impacts on ecosystems / wetlands</p> <p><u>R.14b</u> Conduct studies on the effect of an increase in CO₂ on the growth of plant species (riparian and aquatic)</p>
	<p><u>G.15</u> Few studies exist on adaptation to climate change for the area from Cornwall to Quebec City</p>	<p><u>R.15</u> Initiate a multidisciplinary study to identify the links between past and present variations in water levels in the St Lawrence. The focus should be on Lake Saint Pierre.</p>
	<p><u>G.16</u> Wetlands and plant species have differing levels of tolerance for extreme climate events; these need to be better understood, particularly in the case of ecosystems at risk or at the edge of their geographic range</p>	<p><u>R.16a</u> Develop, validate and make accessible climate indicators characterizing the extreme climate situations that have the greatest impacts on ecosystems and wetlands in Quebec</p> <p><u>R.16b</u> Establish an ichthyological monitoring network that can be used to develop a baseline assessment and provide a better foundation for identifying changes in ecosystems and wetlands</p> <p><u>R.16c</u> Set up sites for long-term monitoring of ecosystems in reference areas (e.g. Lake Saint Pierre)</p> <p><u>R.16d</u> Complete the establishment of a limited number of multidisciplinary observation stations to provide a lengthy record (climate and ecological data)</p>
	<p><u>G.17</u> The factors responsible for natural variability in animal populations need to be better understood</p>	<p><u>R.17</u> Identify the critical stages in the development of species and determine the physical and biological factors influencing the survival, growth and fecundity of individuals</p>
<p><i>effects of climate change:</i> <u>POOR</u></p> <p>The only information available is qualitative evaluations of the potential impacts of climate change on ecosystems and wetlands</p>	<p><u>G.18</u> Means of evaluating ecological changes according to the most plausible 2xCO₂ scenarios need to be established</p>	<p><u>R.18a</u> Simulate and examine the likely effects on fauna of various 2xCO₂ scenarios as they relate to decisions on controlling water levels in Lake Ontario and the St Lawrence</p> <p><u>R.18b</u> Implement and test management strategies</p>

<u>FISHERIES</u>		
OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (4)	RECOMMENDATIONS (7)
<p><u>sensitivity to climate:</u> <u>AVERAGE</u></p> <p>Much is known about the climate factors that affect freshwater populations, primarily in southern Quebec. In contrast, the situation of marine species is not known well at all.</p> <p><u>effects of climate change:</u> <u>POOR</u></p> <p>Impacts on freshwater species are assessed indirectly by using present knowledge related to extreme water levels. No quantitative analysis is available for a 2xCO₂ environment, especially for marine and northern populations</p>	<p><u>G.19</u> We need to learn more about the occurrence, magnitude and timing of fluctuations in water levels/flows in relation to the different lifestyles of many fish species. Studies should be initiated or continued to identify species' range of tolerance and to measure the strength of cohorts of certain fragile species during high and low water levels</p>	<p><u>R.19a</u> Conduct systematic analyses of episodes of extreme water levels (both high and low) in the St Lawrence</p> <p><u>R.19b</u> Examine the effects of such water levels on the strength of species cohorts (yellow perch, northern pike, walleye, tomcod) in key sectors of the St Lawrence by using fishing plans or an ichthyological monitoring network</p> <p><u>R.19c</u> Monitor sport fishing in strategic locations for this activity (size, weight, catches, age)</p>
	<p><u>G.20</u> Very little is known about the behaviour of freshwater and saltwater species in the more northerly regions of Quebec</p>	<p><u>R.20</u> Identify zones where joint studies can be undertaken to survey populations of the most important fish species found in the bodies of water in Northern Quebec</p>
	<p><u>G.21</u> Little research has been done and little is known about the effect of factors such as seasonal changes in temperature and wind direction (phenomenon of upwelling) on the presence, vitality, recruitment and mortality of certain species.</p>	<p><u>R.21a</u> By looking at specific conditions of intense cold and heat, determine the corresponding limits of tolerance and the mortality rates of species sensitive to such conditions (e.g. redbfish)</p> <p><u>R.21b</u> Gain an understanding of the chronological frequency and the meteorological, physical, biological and hydrological processes that explain variations in the presence or recruitment of certain species</p>
	<p><u>G.22</u> Coupled ocean-climate models should be used to estimate the temperature and circulation regimes in the estuary/Gulf of St Lawrence and Hudson Bay and to delineate the associated effects on the population status and health of fish species living in those waters.</p>	<p><u>R.22</u> Water temperature, wind speed and direction, currents and freshwater discharges from the St Lawrence and the large rivers of the North Shore in Quebec should be included in developing predictive models of fish landings under a 2xCO₂ scenario and for species that live in surface waters. Any effort to couple ocean, climate, hydrologic and ice modelling at a sufficiently fine scale should be encouraged.</p>

<u>FORESTRY</u>		
OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (4)	RECOMMENDATIONS (6)
<p><u><i>sensitivity to climate:</i></u> <u>AVERAGE</u> For a limited number of forest species, the links between the forest ecosystem, and the air and soil are well known. It is difficult, however, to extrapolate this information over a long period or to the entire province</p> <p><u><i>effects of climate change:</i></u> <u>POOR</u> A number of climate-vegetation simulations have been conducted on the main forest biomes in Quebec, but they did not take into account soil and biological characteristics or the incidence of extreme climate events. Coupling of biological models and regional climate models has been initiated</p>	<p><u>G.25</u> The current monitoring network shows signs of instability in tracking the state of health of forest populations in Quebec in response to increased climate stress</p>	<p><u>R.25</u> Maintain a monitoring network that has a high enough spatial and temporal resolution to monitor the following in Quebec:</p> <ul style="list-style-type: none"> • composition and change in populations; • regions where forests are particularly sensitive to climate perturbations; • interactions between growth, mortality, the water balance, carbon/nitrogen concentrations and climate
	<p><u>G.26</u> The role of climatic factors in the distribution and migration of forest populations needs to be better understood</p>	<p><u>R.26</u> In order to predict variations in stand types, biological and climate models need to be coupled in the short term, thereby integrating the process of carbon and nitrogen cycling in the forest ecosystem, the water balance, fauna and habitats</p> <p><u>R.26b</u> Promote multidisciplinary projects that can be implemented in the short term and that establish contacts among forest managers and climate, biology and forest ecology specialists</p>
	<p><u>G.27</u> Extreme natural perturbations (forest fires, freezing rain, etc.) need to be modelled in order to estimate the effects on forest populations in the medium term</p>	<p><u>R.27</u> Considering that a higher frequency of “natural disturbances” might be a warning of climate change, there is an urgent need to better describe the biological and ecological interactions between extreme events (forest fires, freezing rain storm, etc.) and populations</p>
	<p><u>G.28</u> In light of the capacity of boreal and temperate forests to store carbon, it is important to enhance our understanding of the exchanges that occur between the forest ecosystem, the atmosphere and the soil.</p>	<p><u>R.28a</u> If we want silvicultural operations to optimize both forest production and carbon sequestration in the forest ecosystem, specific studies need to be conducted on the link between climate conditions and carbon cycling by various forest populations</p> <p><u>R.28b</u> Determine the cumulative effects on forest populations of various 2xCO₂ scenarios; identify the impacts of an increase in CO₂ concentrations and temperature on the growth of species; adapt forest management techniques</p>

<u>ENERGY</u>		
OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (2)	RECOMMENDATIONS (2)
<p><u>sensitivity to climate:</u> <u>GOOD</u> Although we understand the important influence of climate on energy supply and demand, the most commonly used climatic factors are of a general nature and not well developed</p>	<p><u>G.23</u> There are no effective methods for linking regional climate fluctuations to heating and air conditioning requirements, along with the net supply of water in the reservoirs of Northern Quebec, and to the capacity of hydro-electric power stations along the St Lawrence</p>	<p><u>R.23</u> By drawing on data collected over the past 30 years in Quebec, develop and validate climate indicators that have a sufficiently high spatial and temporal resolution to correlate such indicators with actual data on energy use for heating and air conditioning, taking into account technological advances implemented to reduce energy consumption</p>
<p><u>effects of climate change:</u> <u>AVERAGE</u> Existing studies have been limited to estimating variations in water supply in hydro-electric reservoirs and the largest watersheds in Northern Quebec</p>	<p><u>G.24</u> The distribution of energy in Quebec in a 2xCO₂ environment needs to be evaluated, with a view to meeting domestic energy needs, while estimating the potential for exporting energy to regions adjacent to Quebec</p>	<p><u>R.24</u> By using regional climate models (resolution of 30-40 km) and climate indicators, indicate how Quebec's energy sector should strategically position itself in the North American context given the energy supply and demand characteristics under a 2xCO₂ scenario</p>

<u>TRANSPORTATION</u>		
OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (2)	RECOMMENDATIONS (2)
<p><u>sensitivity to climate:</u> <u>AVERAGE</u> A large number of technical studies exist which identify the relationships between modes of transportation and climate conditions. However, no overview exists of the influence of climate on transportation in Quebec</p>	<p><u>G.30</u> The effects of present and future winter conditions on road transportation should be quantified to a greater extent and properly documented</p>	<p><u>R.30</u> The overall cost associated with the effects of winter storms and freeze/thaw conditions should be evaluated and documented until such time as regional climate models are able to provide reliable indications on the track and intensity of low pressure systems in a 2xCO₂ environment</p>
<p><u>effects of climate change:</u> <u>SKETCHY</u> Marine transportation on the St Lawrence is the only sector that has been studied indirectly with reference to a 2xCO₂ scenario</p>	<p><u>G.31</u> Measures for adapting need to be developed for the marine environment to minimize the impacts of episodes (duration and intensity) of abnormally low water levels in the St Lawrence</p>	<p><u>R.31</u> The use of coupled econometric and hydrodynamic models to forecast water levels/flows in the St Lawrence will be encouraged to determine the necessary modifications in future ship design and the cargo types that should be promoted to strategically position maritime ports in Quebec</p>

INFRASTRUCTURE AND PERMAFROST

OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (1)	RECOMMENDATIONS (4)
<p><u><i>sensitivity to climate:</i></u> <u>POOR</u> The ability exists to measure the relative importance of the thermal regime in the behaviour of permafrost in Northern Quebec. However, the available data do not allow us to quantify these processes on spatial and temporal scales</p> <p><u><i>effects of climate change:</i></u> <u>SKETCHY</u> Only one specific study has been done in Quebec. There is a need to use and adapt research conducted elsewhere in Canada (e.g. Mackenzie River Basin)</p>	<p><u>G.29</u> Climate warming in Northern Quebec will increase the depth of the active permafrost, reduce its load-bearing capacity and increase the instability of slopes. All these aspects directly affect road, maritime, hydro-electric and government infrastructure.</p>	<p><u>R.29a</u> Thermal measurement networks (air and soil) need to be maintained and automated to be able to track changes in climate and the permafrost in Northern Quebec</p> <p><u>R.29b</u> Map the arctic and subarctic regions that have sensitive and ice-rich soils, in order to identify locations where there is a risk of major ecological changes in the event of permafrost melting</p> <p><u>R.29c</u> Determine, for a 2xCO₂ environment, the safety factors required in construction design to prevent costly damage resulting from subsidence of facilities built on soil containing permafrost that is undergoing melting</p> <p><u>R.29d</u> Assess the present cost of infrastructure damage that is directly linked to extreme climate events</p>

RECREATION AND TOURISM

OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (1)	RECOMMENDATIONS (2)
<p><u><i>sensitivity to climate:</i></u> <u>POOR</u> Downhill skiing, golfing and pleasure boating (indirectly), are the only sectors that have been studied</p> <p><u><i>effects of climate change:</i></u> <u>POOR</u> No work has been done aside from two studies on skiing and golfing</p>	<p><u>G.32</u> The only recreation and tourism studies dealt with downhill skiing and golfing, and touched indirectly on pleasure boating. In view of the importance of this sector in Quebec, it is essential that coverage be broadened to all recreational activities and potential tourism at the regional level</p>	<p><u>R.32a</u> Identify the satisfaction criteria for staging recreational activities in Quebec, including the alternatives available for the different activities, by documenting them to as much as possible</p> <p><u>R.32b</u> Evaluate the present economic spinoff from recreation in Quebec and link this sector to representative climate indicators</p>

EXTREME CLIMATE EVENTS

OVERALL EVALUATION OF THE KNOWLEDGE BASE	PRESENT GAPS (2)	RECOMMENDATIONS (3)
<p><u><i>sensitivity to climate:</i></u> <u>POOR</u></p> <p>In spite of the large number of reference documents, reports, and studies on extreme climate events, the majority of them have looked at the economic consequences of material damage and loss of life. Except in rare instances, social and biological aspects have not been discussed.</p>	<p><u>G.33</u> The record of extreme climate events that have occurred in Quebec is incomplete, and sometimes contradictory; these events are poorly documented and do not contain enough information to evaluate the overall impact on the physical, social and biological levels.</p>	<p><u>R.33a</u> Information on the cost and the physical, biological and social effects of extreme climate events, specifically floods, drought, heat and cold waves, and episodes of severe weather events, that is, tornadoes, heavy hail and winter storms, needs to be compiled and made available to decision makers</p> <p><u>R.33b</u> A methodology for analysing and evaluating the effects of extreme climate events on the basis of direct and indirect data needs to be developed and applied in a systematic fashion for planning purposes</p>
<p><u><i>effects of climate change:</i></u> <u>SKETCHY</u></p> <p>No study is available in Quebec on changes in the frequency, intensity and duration of extreme events under a 2xCO₂ scenario</p>	<p><u>G.34</u> Present climate change scenarios are not able to indicate whether the frequency, intensity or duration of extreme climate events will vary significantly in a 2xCO₂ environment.</p>	<p><u>R.34</u> Until climate change scenarios can give an adequate and valid indication of the influence of increased greenhouse gases on extreme climate events, work should be done to determine the sensitivity of the different sectors and the extent of the impacts of extreme climate events by varying the duration and intensity of such abnormal climate events according to a predetermined factor</p>

CONCLUSION

From the Quebec Chapter of the Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation, the following conclusions can be drawn:

- an impressive quantity of scientific information exists on the links between the climate and economic sectors in Quebec, but coverage varies considerably among the sectors;
- water resources, agriculture and forestry are the sectors for which the most information exists, covering both present and past links to climate, as well as the largest number of studies on the possible effects of a 2xCO₂ scenario;
- no work has as yet been done in the areas of human health and social aspects, fisheries, infrastructure maintenance, or recreation and tourism;
- studies have clearly shown the appreciable sensitivity that exists to extreme climate events; in view of their major impacts on Quebec, these events need to be documented more extensively and analysed both spatially and temporally.

By identifying 34 gaps in the knowledge base and providing 57 recommendations, the Quebec Chapter (Volume V) of the Canada Country Study is intended to serve as a starting point for developing and implementing rational and concrete measures for adapting to alterations in climate variability of natural or anthropogenic origin.

1. PRÉAMBULE À L'ÉTUDE PAN-CANADIENNE

1.1. L'objectif

L'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique consiste en une évaluation nationale de notre connaissance des répercussions de la variabilité et du changement climatique sur l'ensemble des secteurs au Canada. À cet objectif premier s'ajoute une volonté d'élaborer les éléments premiers de ce qui constitueraient des mesures d'adaptation à la variabilité et au changement climatiques qui soient adéquates et pertinentes.

Entreprise sous l'initiative d'Environnement Canada, l'Étude pan-canadienne regroupe un grand nombre de participants tant au niveau gouvernemental, que des universités, du secteur privé et des organisations non-gouvernementales. Fondée sur l'ensemble des études d'impacts du changement climatique faites depuis la dernière décennie au Canada, nous croyons que l'Étude pan-canadienne permettra d'avoir une idée plus réaliste de la vulnérabilité des divers secteurs face à la variabilité et au changement climatique et de mettre en place, dans les plus brefs délais, des mécanismes d'adaptation visant à réduire la portée de cette vulnérabilité. Ces informations à base scientifique sont primordiales à une prise de décision judicieuse pour l'ensemble des preneurs de décision au pays.

1.2. L'approche

L'Étude pan-canadienne est divisé en deux (2) étapes. La phase I débuta à l'été 1996 et se terminera à l'automne 1997. Cette étape veut faire une revue et une évaluation exhaustive de la littérature existante traitant des répercussions et de l'adaptation à la variabilité et au changement climatique au Canada. Les lacunes actuelles seront identifiées et des recommandations traitant des avenues de recherche future pour combler ces lacunes seront proposées pour une phase II éventuelle qui est prévue débiter à la fin de 1997 pour s'étendre sur une période de 5 ans.

Dans sa phase I, des résumés-synthèse seront publiés, soient: un résumé national dédié aux responsables des politiques, un résumé national d'intérêt général et 6 résumés régionaux d'intérêt général. Ces résumés prendront leurs informations de base de 25 rapports/articles publiés dans 8 tomes soient :

- Tome I - La Colombie-Britannique et le Yukon
- Tome II - L'Arctique
- Tome III - Les Prairies
- Tome IV - L'Ontario
- **Tome V - *Le Québec***
- Tome VI - Les Maritimes
- Tome VII - Les secteurs comprenant 12 sections nationales sur l'agriculture, les infrastructures, l'énergie, la foresterie, les pêcheries, la santé humaine, l'assurance, les loisirs et tourisme, le transport, les écosystèmes, les ressources en eau et les milieux humides.
- Tome VIII - Les enjeux intégrateurs comprenant 7 sections nationales portant sur les aménagements du territoire en évolution, le commerce intérieur, les influences transfrontalières, les événements extrêmes, les enjeux atmosphériques, le développement durable et les 2 économies.

1.3. La variabilité et le changement du climat

Le climat peut être décrit comme un ensemble d'événements météorologiques pour un endroit en particulier ; il est de nature très variable d'une année ou d'une saison à une autre. La variabilité est une caractéristique normale du climat et est suscitée par les différences thermiques des masses d'air, les changements dans la distribution des courants océaniques ou des températures à la surface de l'eau, des éruptions volcaniques, des fluctuations dans l'énergie émise par le soleil ou venant d'autres éléments du système climatique qui ne sont pas encore bien connus.

Ces fluctuations naturelles du climat à très grande échelle sont générées par des mouvements dans la position de la Terre par rapport au soleil. Ce phénomène d'altération se reflète dans des changements dans la composition de l'atmosphère terrestre et indirectement sur la présence plus ou moins abondante de certains gaz à effet de serre (tels le gaz carbonique et le méthane). Ces gaz empêchent la surface et l'atmosphère terrestres de refroidir trop rapidement permettant ainsi aux êtres vivants de survivre sur la planète.

Selon nos connaissances, les concentrations de gaz à effet de serre tendent à être inférieures durant des périodes de climat froid (ères glaciaires) et supérieures lors de climat chaud. L'être humain, par ses activités responsables d'émissions additionnelles de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, risque de perturber davantage ce lien précaire entre les concentrations et le climat. En effet, depuis la révolution préindustrielle, la teneur de l'air en gaz à effet de serre a augmenté à un rythme inquiétant pouvant même amener, selon les scientifiques, à un doublement du gaz carbonique, par exemple, dans la deuxième moitié du siècle prochain. Selon les experts internationaux, il est maintenant reconnu que l'homme a une influence perceptible sur le climat de la planète.

1.4. Le contexte international

L'intérêt international concernant le futur de notre climat s'est accru depuis les 20 dernières années. Un des pas importants dans l'évolution de cet enjeu fut la tenue de la conférence intitulée « L'atmosphère en évolution » qui s'est tenue à Toronto en 1988. Durant la même année, l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies sur l'environnement créèrent le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) avec comme objectifs de rendre compte du niveau de connaissances scientifiques liées au changement climatique, d'estimer les répercussions potentielles de tels changements et d'examiner les stratégies de réponse et d'adaptation pour y parer. Le GIEC a ultérieurement publié 2 rapports d'évaluation, un en 1990 et le deuxième en 1995 avec un troisième rapport d'évaluation prévu pour 2000.

En 1992, la Conférence des Nations Unies sur l'Environnement et le Développement se tenait à Rio de Janeiro et mena à l'élaboration de la Convention-Cadre sur le changement climatique. L'objectif de la Convention-Cadre consiste en la «stabilisation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre à un niveau qui préviendrait une influence anthropogène risquée avec le système climatique ». Actuellement en vigueur, cette entente internationale s'est traduite en des engagements face à la réduction des émissions, l'aide aux pays en développement, la tenue d'inventaires sur les émissions, la nécessité de faire de la recherche scientifique et socio-économique pour réduire les incertitudes face au changement climatique et finalement un plan de sensibilisation et d'éducation sur la problématique. Le Canada a entériné son acceptation de la Convention-Cadre en adoptant le Plan d'action National sur le Changement climatique. Le Québec a également déposé en 1995 une Stratégie Québécoise sur les gaz à effet de serre.

Jusqu'à présent, l'emphase de la Convention-Cadre a été mise sur la réduction des gaz à effet de serre. Comme l'enjeu du changement climatique en est un de longue haleine, nous devons simultanément tenter de mieux comprendre les répercussions du changement climatique afin d'élaborer et d'implanter des mesures pour s'y adapter. L'Étude pan-canadienne est une initiative directement suscitée par cette volonté.

1.5. Les modèles climatiques et leurs scénarios

Afin d'être en mesure d'évaluer comment le climat global va répondre à cette augmentation des gaz à effet de serre, l'atmosphère est modélisée i.e. simulée en utilisant des ordinateurs de haute puissance. Connus sous le nom de «*Modèles de Circulation Générale (MCG)*», ces modèles simulent le spectre des conditions climatiques qui prévaudraient dans l'éventualité où les concentrations mondiales de gaz carbonique seraient le double de celles observées avant la révolution préindustrielle (280 ppmv).

Même si les MCG sont en désaccord sur les détails entourant les scénarios de doublement de CO₂, tous s'entendent pour indiquer un réchauffement de la planète, plus accentué vers les pôles et, de façon générale, une augmentation de l'évaporation et des précipitations. Le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), dans son rapport de 1995, parle d'une hausse globale de la température de 1 à 3,5 °C au cours des 100 prochaines années. Comparativement, dans le dernier siècle, on a observé une hausse de température au niveau mondial de 0,3 à 0,6 °C. Les simulations des MCG faisant l'hypothèse d'un doublement de gaz carbonique sont communément appelées « scénarios de changement climatique ».

Dans sa phase initiale, l'Étude pan-canadienne ne traite pas d'un scénario en particulier. Elle veut plutôt couvrir la gamme des scénarios proposés par les MCG à travers le monde et qui sont amplement discutés dans la littérature scientifique. Généralement, la majorité des études sont basées sur un des 5 MCG développés au Canada, aux États-Unis ou en Angleterre.

Depuis les dernières années, bien que de nombreuses études comparatives entre les MCG ont permis d'avoir un niveau de confiance en leurs résultats, il n'en reste pas moins que ces MCG sont déficients lorsque l'on tente d'aller à une échelle plus régionale ou locale. Au Canada, les scénarios de changement climatique sont assez en accord concernant le réchauffement sur l'Ouest et le Nord du pays. Cependant, ils sont en désaccord quant à l'emplacement et l'intensité des changements dans les patrons de température et de précipitations particulièrement sur l'est du Canada.

1.6. Les répercussions et l'adaptation climatiques

Quelles seront les répercussions d'un changement climatique sur notre environnement, notre économie et sur notre façon présente et future de vivre ?

Au Canada et plus particulièrement au Québec, nous sommes habitués à des variations parfois draconiennes du climat tant au niveau géographique que saisonnier. Ces fluctuations climatiques ont plusieurs conséquences autant sur des environnements naturels ou d'origine humaine tels les ressources en eau, la faune et la flore, les pratiques agricoles, les pêcheries et la foresterie, l'offre et la demande énergétiques, les infrastructures, les loisirs et le tourisme, la santé humaine et les aspects sociaux et l'industrie de l'assurance.

Plusieurs exemples nous reviennent à l'esprit lorsqu'on pense à notre capacité à s'adapter à une gamme de conditions climatiques. Selon la zone géographique et le temps de l'année, on choisit un certain type de semis. Nos routes et nos structures résidentielles et commerciales sont construites pour faire face à un spectre de conditions météorologiques donné ou pour tenir compte du type de sol sur lequel elles sont érigées (pergélisol, chutes de neige, verglas, crues subites, etc..).

Des navires ou des plates-formes de forage sont construits pour affronter une gamme de vagues ou de couverts de glace. Des zones récréatives sont développées pour tenir de conditions climatiques avantageuses telles des enneigements appropriés pour la pratique du ski alpin ou de vents favorables à la navigation de plaisance.

Une adaptation appropriée des divers secteurs aux conditions climatiques présentes et futures passe par un questionnement de nos approches et nos attitudes face à la variabilité climatique. Nous nous devons de trouver des réponses aux questions suivantes :

- ◆ Quelles sont les répercussions d'un climat en changement sur nous et nos familles ?
- ◆ Quelles sont les décisions prises actuellement et qui ont comme conséquences de nous rendre plus vulnérables à une variabilité climatique accrue ?
- ◆ Les approches prises actuellement pour tenir compte des conditions climatiques actuelles fonctionneront-elles encore dans le futur dans un contexte de changement climatique ? Quels changements devront être apportés à ces approches pour nous adapter à un environnement climatique modifié ?
- ◆ Est-ce que la vitesse à lequel le changement climatique se produira va allouer assez de temps pour nous adapter adéquatement ?
- ◆ Est-ce que la société du futur devra être plus adaptable ou flexible au changement qu'elle ne l'est présentement ? Si oui, comment faire ?

L'Étude pan-canadienne devra, du moins nous l'espérons, indiquer des pistes de réponses à ces questions.

2. INTRODUCTION

Le Québec est caractérisé par un climat des plus variables. Les exemples sont très nombreux démontrant la sensibilité que les fluctuations climatiques peuvent avoir sur notre vie de tous les jours.

L'augmentation des gaz à effet de serre observée au niveau mondial met une pression additionnelle sur le système climatique terrestre. Les mécanismes d'ajustement du climat à ces nouveaux facteurs anthropiques sont très mal connus et le niveau de connaissances actuelles ne nous permet pas de savoir avec exactitude comment les océans, les régions polaires et les écosystèmes, entre autres, contribuent directement ou indirectement à ces mécanismes. Le Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du climat regroupant 135 pays et plus de 350 scientifiques reconnus a, pour la première fois dans son 2^e rapport d'évaluation déposé en 1995, énoncé que « l'homme a une influence perceptible sur le climat global ». L'ampleur, la vitesse et la morphologie des changements sur le climat sur la scène régionale et locale font cependant et feront encore l'objet de discussions, d'argumentations et de controverses scientifiques pour les années à venir. Le défi pour la communauté scientifique sur cet aspect est gigantesque.

Afin d'assurer une adaptation harmonieuse et adéquate de la société québécoise à une modification du climat, nous nous devons de connaître beaucoup mieux les caractéristiques du climat québécois ainsi que les répercussions positives et négatives que les fluctuations climatiques parfois extrêmes ont sur l'ensemble des ressources, des usages et des activités au Québec. En documentant mieux la relation climat-société, la capacité de s'ajuster et s'adapter à une variation même faible de la gamme des conditions climatiques futures n'en sera que rehaussée. C'est dans ce contexte que l'Étude pan-canadienne sur les répercussions et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique vient à point.

Environnement Canada et l'Association de climatologie du Québec sont très heureux de vous offrir le **tome V de l'Étude pan-canadienne traitant spécifiquement du Québec**. Tout au long de ce document, un effort particulier a été consacré à bien positionner la problématique du changement climatique dans un contexte québécois en faisant toujours référence à des événements climatiques passés et présents et ainsi de nous faire réaliser l'ampleur, le spectre et l'importance de leurs répercussions déjà observées et souvent documentées sur la société québécoise.

L'approche utilisée dans l'élaboration et la préparation de la composante québécoise de l'Étude pan-canadienne peut se diviser en 3 étapes :

- 1) un inventaire exhaustif et rigoureux des articles scientifiques, des études, des rapports, des initiatives visant à :

- quantifier le lien existant entre un secteur donné et les fluctuations climatiques passées et présentes au Québec ;
 - synthétiser notre niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique induit par l'augmentation des gaz à effet de serre .
- 2) la tenue de deux (2) forums qui ont eu lieu en avril 1997. Ces deux ateliers ont regroupé des spécialistes dans les divers secteurs et avaient comme objectifs de :
- sensibiliser les participants;
 - valider les informations recueillies jusqu'à ce jour sur notre niveau de connaissances et finalement ;
 - réfléchir collectivement sur les moyens et les étapes à prendre pour assurer le développement de mesures efficaces d'adaptation au changement climatique .
- 3) la rédaction et la révision du présent document.

Sans la contribution et la collaboration active de la centaine de spécialistes et d'experts de divers milieux contactés au cours de cette étude, il aurait été difficile de compléter ce rapport qui se veut une étape initiale à une meilleure adaptation à une variabilité climatique modifiée.

Le présent document comporte 4 grands volets. Le chapitre 3 décrit le contexte du Québec dans une perspective canadienne. Le chapitre 4 tente de dresser un tableau du climat passé, présent et futur de la province. On prendra donc le temps d'expliquer sommairement les « scénarios de changement climatique », simulations numériques à base hautement scientifique et qui nous indiquent comment un climat terrestre futur réagira si la tendance à l'augmentation des gaz à effet de serre continue. Les caractéristiques, les contraintes et l'application réaliste des scénarios de changement climatique dans une problématique québécoise seront spécifiquement traités dans le chapitre 4.

Étant donné l'importance des événements climatiques extrêmes au Québec, le présent rapport consacre entièrement le chapitre 5 à ce sujet. En agissant ainsi, les auteurs veulent indiquer à quel point ces phénomènes parfois dramatiques ont des impacts gigantesques sur l'économie, le développement et le bien-être de la province. Beaucoup d'informations existent sur ce sujet mais, dans la plupart des cas, elles sont dispersées et graduellement oubliées par la mémoire collective. Le passé étant garant du futur, nous croyons que les éléments inclus dans ce chapitre sont des pistes valables à une adaptation efficace au changement climatique futur.

Pour chacun des dix secteurs considérés dans ce rapport, le chapitre 6 les abordera systématiquement de la façon suivante :

- a) un bref résumé des caractéristiques de chaque secteur au Québec sera fait ;
- b) une synthèse des connaissances actuelles sur le niveau de sensibilité de chaque secteur aux fluctuations climatiques passées et présentes. Dans la mesure du possible, les affirmations seront documentées et feront référence à des documents, écrits, rapports, présentations pouvant éclaircir à quel point l'interaction climat-secteur est réellement quantifiée ;
- c) en utilisant les « scénarios de changement climatique » décrits au chapitre 4, on énumérera ce que l'on sait, à partir des études recensées jusqu'à ce jour, sur les répercussions futures du climat au Québec.

Enfin, le chapitre 7 identifie l'ensemble des lacunes dans les connaissances du lien climat-société et propose une série de recommandations sur les actions futures à prendre pour combler ce manque de connaissances. L'élaboration de mesures d'adaptation concrètes et judicieuses à des fluctuations climatiques accentuées passe, à notre avis, par un tel examen.

3. CONTEXTE RÉGIONAL

3.1. La démographie

La population du Québec s'établit en 1994 à 7,2 millions soit 25,1% de la population canadienne de 28,8 millions d'habitants. Selon les perspective démographiques du Bureau de la statistique du Québec, la population du Québec devrait dépasser le cap des 8 millions de personnes entre 2003 et 2016 selon qu'un scénario faible (croissance de 9,4%) ou fort (hausse de 24,5%) est choisi (Gouvernement du Québec,1995). En 1992, la structure de la population par âge est la suivante :

- moins de 15 ans : 20%
- entre 15 et 64 ans : 69%
- 65 ans et plus : 11%.

La population du Québec vieillit avec un âge médian, qui sépare la population en 2 parties égales, de 35,9 ans en 1992 comparativement à 24,0 ans en 1961, 29,6 ans en 1981 et 31,8 ans en 1986.

Le tableau 3.1 montre que plus du 2/3 de la population du Québec (69,5%) vivent à proximité du Saint-Laurent sur une superficie représentant seulement 21,6% de la superficie totale du Québec. Cette population est concentrée sur une bande riveraine de 10 km de largeur de part et d'autre du Saint-Laurent créant inévitablement une pression sur l'environnement fluvial (Environnement Canada,1997a). 80% de la population du Québec habite dans la plaine du Saint-Laurent et la moitié de la province est concentrée dans les agglomérations urbaines de Montréal, de Québec et de Trois-Rivières (Environnement Canada,1996c). Ces données reflètent l'importance de l'urbanisation et la nécessité de mieux comprendre les répercussions environnementales du développement urbain sur le Saint-Laurent.

Tableau 3.1 - La population du Québec en 1994

	<u>Population</u>	<u>Superficie (km²)</u>	<u>Densité (hab/km²)</u>
Québec	7 207 992	1 523 221	4,73
<u>Saint-Laurent</u>			
Rive nord	1 461 127	281 161	5,2
Rive sud	1 233 233	46 577	26,5
Communauté Urbaine de Montréal	1 799 254	504	3 570, 0
Communauté Urbaine de Québec	511 805	545	939, 1
TOTAL	5 005 419	328 787	15,2

(Tiré d'Environnement Canada,1997a - Source : Ministère des Affaires municipales,1995)

3.2. L'économie

En 1991, le secteur primaire représente 3,2 % (soit 4,4 milliards de \$) du Produit Intérieur Brut, dont 1,6 % pour l'agriculture, 0,6 % pour la foresterie et 1,0 % pour les mines. Le secteur secondaire représente 24,9 % (soit 33,6 milliards de \$) du PIB, avec 19,9 % pour les industries manufacturières et 5 % pour le secteur de la construction.

Enfin, le secteur tertiaire avec ses 96,9 milliards de dollars représente 71,8 % du PIB et constitue le secteur le plus important de l'économie québécoise. Le secteur des transports représente 4,8 % du PIB, celui de l'énergie 4,4 % et finalement les assurances/finances et affaires immobilières avec 13,9 % du PIB (Gouvernement du Québec, 1995).

3.3. Les ressources

Le Québec s'étend sur plus de 1 950 km du nord au sud et, sous certaines latitudes, sur plus de 1 500 km d'est en ouest (Gouvernement du Québec, 1996b). Le Québec compte 1 357 000 km² de terres, dont 940 000 km² occupés par la forêt. L'eau douce couvre 184 000 km².

Le Saint-Laurent constitue l'élément naturel prédominant du Québec et le traverse, d'ouest en est, sur 1 400 km. Avec ses 350 affluents qui l'alimentent, les quelque 1 250 îles qui le parsèment (330 dans le tronçon fluvial, 150 dans l'estuaire et 770 dans le golfe), 97% des Québécois et des Québécoises vivent à l'intérieur des limites du bassin. La portion fluviale, entre Cornwall et la pointe est de l'île d'Orléans, occupe une superficie de 1 100 km² et est marquée par la présence de plans d'eau d'importance tels les lacs Saint-François, Saint-Louis et Saint-Pierre ainsi que le bassin de LaPrairie (Environnement Canada, 1997a). La portion maritime, entre la pointe Est de l'Île d'Orléans et Pointe-des-Monts, occupe une superficie de 3 146 km² et présente un élargissement marqué, par rapport au tronçon fluvial, avec des largeurs passant de 13 km en aval de l'île d'Orléans à plus de 60 km à Pointe-des-Monts.

Le Saint-Laurent est le 17^e plus long fleuve au monde (le Nil est le premier avec 6 670 km), possède la 13^e plus grande superficie du bassin versant avec 1,6 million de km² (Environnement Canada, 1997a) et enregistre le 15^e plus grand débit soit 12 600 m³/s. L'Amazone se situe au 1^{er} rang dans ces 2 catégories avec respectivement 6,3 millions de km² en superficie et un débit de 175 000 m³/s.

Malgré que 97 % de la population du Québec occupe son bassin versant, les basses-terres du Saint-Laurent présentent un paysage diversifié où les zones agricoles et forestières occupent une place d'importance (83,1 % de la superficie totale des basses terres du Saint-Laurent, du tronçon fluvial au moyen estuaire). Le tableau 3.2 résume bien cette diversité.

Tableau 3.2 - Estimation de la superficie occupée par classe d'utilisation du sol selon les secteurs en bordure du fleuve Saint-Laurent

	<u>Tronçon fluvial</u>	<u>Estuaire fluvial</u>	<u>Moyen estuaire</u>	<u>Superficie (km²)</u>	<u>Pourcentage</u>
<i>Milieus humides</i>	522	196	151	869	5,4 %
<i>Forêts :</i>					
feuillus	638	424	359	1 421	
mixtes	462	510	1 261	2 233	
conifères	252	1 228	1 309	2 789	
TOTAL :	1 352	2 162	2 929	6 443	39,7%
<i>Zones agricoles/friches :</i>					
prairie	1 222	408	180	1 810	
pâturage	577	360	314	1 251	
céréale/maïs	1 360	520	231	2 111	
friche	693	763	520	1 976	
TOTAL	3 852	2 051	1 245	7 148	44,1%
<i>Zones bâties/sols nus :</i>					
faible densité	571	273	43	887	
forte densité	527	267	72	866	
TOTAL	<u>1 098</u>	<u>540</u>	<u>115</u>	<u>1 754</u>	10,8 %
GRAND TOTAL :	6 824	4 949	4 440	16 213	

(Sources : Grenier,1991 ; Photosur Géomat Inc,1991)

4. LE CLIMAT AU QUÉBEC

Le Québec est la plus vaste région du Canada, avec une superficie de 1,5 millions de kilomètres carrés. Situé sur les bordures méridionales et septentrionales du bouclier canadien, le Québec présente un relief varié, constitué du plateau Laurentien (dont le plus haut sommet culmine à 900 m d'altitude), des Appalaches (chaîne montagneuse d'altitude moyenne à 400 m et s'étendant jusqu'à la péninsule de Gaspé) et finalement des basses terres du Saint-Laurent. Avec ses 13 773 km de côtes (dont les baies d'Hudson et d'Ungava ainsi que le golfe du Saint-Laurent) et situé à proximité de la région des Grands Lacs et limitrophe aux régions de l'Ontario, du Nord des États-Unis, des Maritimes et du Labrador, le Québec est soumis à de nombreuses influences climatiques qui vont déterminer les caractéristiques climatiques de la province.

4.1. Les influences climatiques

L'alternance de passages de systèmes de haute et de basse pression particulièrement en hiver, classés de la façon suivante, est à l'origine du climat du Québec:

- les masses d'air chaud et humide provenant du Golfe du Mexique, responsables des tempêtes hivernales de forte intensité et des épisodes de temps violent d'été ;
- la circulation d'ouest prédominant toute l'année sur la partie méridionale de la province alors que le nord du Québec est fréquemment sous l'influence des masses d'air venant du Nord. Suite à l'englacement des plans d'eau importants tels la baie d'Hudson vers le mois de décembre, l'air arctique froid et sec envahit fréquemment l'ensemble de la province.
- Occasionnellement, les systèmes météorologiques apportent des conditions nuageuses, fraîches et humides en provenance de l'Atlantique Nord et entrant dans la province via le Labrador.

4.2. Les caractéristiques climatiques

- la période hivernale particulièrement longue (4 à 5 mois dans le sud du Québec, 5 à 8 mois dans le centre et le nord). L'écart de température entre les mois chauds et froids est très marqué à l'intérieur des terres ;
- les chutes annuelles de neige vont de 200 à 400 cm avec plus de 500 cm sur l'est de la province et les régions montagneuses. Elles débutent vers la fin de septembre dans le nord et plutôt en début novembre dans le sud;
- le manteau nival perdure jusqu'à la mi-avril sur les basses terres du Saint-Laurent, et jusqu'en juin dans l'extrême-nord. Sur la côte Arctique, les glaces sont présentes pratiquement toute l'année alors que le golfe Saint-Laurent est libre de juin à novembre ;
- les précipitations annuelles vont de moins de 400 mm pour l'extrême Nord, à plus de 1200 mm sur les reliefs bordant le Saint-Laurent. On compte une moyenne de 1 400 heures d'ensoleillement dans le nord contre 2 000 heures dans le sud.

4.3. Un retour vers le climat passé

Le Québec a un climat marqué par sa très grande fourchette de conditions climatiques. Il suffit de regarder quelques exemples du passé pour s'en convaincre (Environnement Canada 1989, 1990a, 1990b, 1996a; Lacroix, 1991) :

- en 1671, le Québec reçoit sa première tempête de neige (selon les sources disponibles du temps) seulement le 14 janvier, suivi d'un printemps hâtif dès la mi-mars;
- le dernier jour de l'année 1775 marque l'attaque infructueuse, au cours d'une violente tempête de neige, du général Benedict Arnold et ses 2 000 soldats américains contre la forteresse de Québec;
- l'année 1816, considéré comme l'« année sans été » ou « l'été noir », fut pleine de soubresauts de la nature, tous aussi bouleversants les uns des autres (elle sera traitée plus en détail dans le chapitre 5) ;
- l'hiver 1872-1873 à Québec avec ses quelque 555 cm de neige;
- du 2 au 6 avril 1885, dans la région d'Ottawa, il est tombé 108 cm de neige et 50 mm de pluie;
- une température de -54,4 °C à Doucet en Abitibi le 5 février 1923;
- la vitesse de vent moyenne la plus élevée au Canada enregistrée le 18 novembre 1931 à Cape Hopes Advance (Quaqtaq) dans la péninsule d'Ungava avec une vitesse de 201 km/h;
- la chute de neige la plus précoce à Montréal avec 0,8 cm le 25 septembre 1939 ;
- 21,8 cm de neige à Montréal le 10 mai 1963 ;
- la tempête de neige du «siècle» du 4 mars 1971 sur le sud du Québec avec près de 50 cm et des rafales de vents dépassant les 100 km/h ;
- le 3 décembre 1982, la température grimpe à 20 °C dans l'extrême sud du Québec (Huntingdon) ;
- novembre 1986 : un record de neige en Gaspésie avec plus de 70 cm de neige en 2 jours à Gaspé doublant ainsi d'un seul coup la moyenne mensuelle de chutes de neige pour la région.

Le Canada et le Québec ont déjà connu des périodes chaudes depuis la fin de la dernière époque glaciaire. On estime qu'il y a environ 6 000 ans, la température moyenne du Canada était d'environ 1 °C supérieure à celle d'aujourd'hui (Gullett & Skinner, 1992). Une seconde période de réchauffement a eu lieu au Moyen-Âge, entre 950 et 1250 approximativement, alors que les températures moyennes à nos latitudes étaient d'environ 0,5 °C supérieures à celles du début du présent siècle.

D'autres sources indirectes peuvent être utilisées pour décrire l'histoire climatique récente du Québec. Originale par son envergure, l'étude de Payette & al. (1990b) donne une revue bibliographique exhaustive sur le climat du dernier millénaire dans l'Hémisphère Nord et dans le Québec subarctique en utilisant l'ensemble des données historiques, géomorphologiques, écologiques et dendrochronologiques. Le tableau 4.1 en résume le contenu.

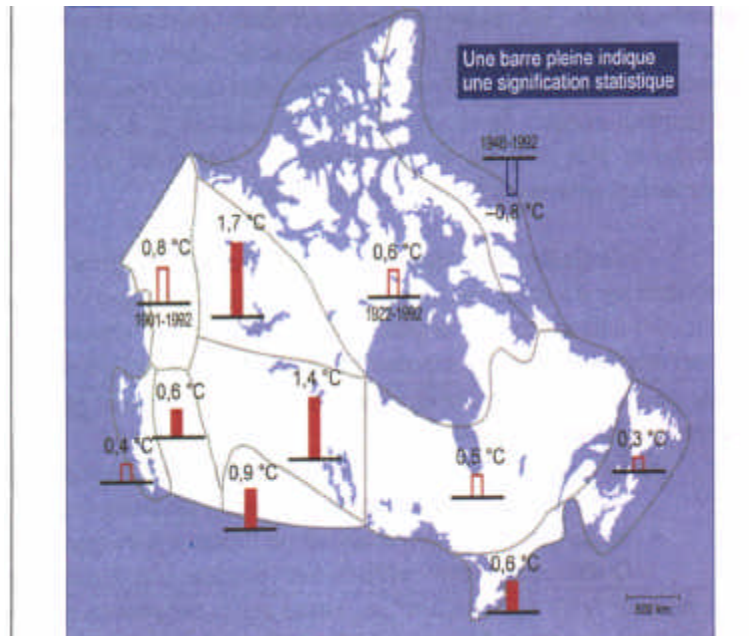
Par ailleurs, des prises de données météorologiques sont effectuées depuis environ 125 ans au Canada et au Québec. Pour la région dite de la « forêt du nord-est » (du 46^e au 57^e parallèle s'étendant de la baie d'Hudson au Labrador incluant le Bas St-Laurent et la Gaspésie), Gullett & Skinner (1992) notèrent un réchauffement statistiquement significatif d'environ 0,5 °C entre 1895 et 1991. Pour la même période, les mêmes auteurs arrivèrent à la conclusion que le bassin des Grands Lacs/Saint-Laurent avait subi un réchauffement des températures légèrement supérieur, de 0,7 °C, surtout localisé sur la partie ontarienne des Grands Lacs.

Tableau 4.1- Évolution du climat au cours du dernier millénaire à partir de données géomorphologiques, écologiques et dendrochronologiques

Période	Particularités climatiques
900 - 1200	<p>Le climat s'est réchauffé dans la plupart des régions du monde avec un maximum thermique vers 1200, une récession glaciaire et une expansion de la limite des arbres. On pratique la culture de la vigne à des latitudes inhabituelles et les annales liées aux Vikings de l'époque suggèrent un retrait des glaces marines et des pratiques d'ensevelissement des morts dans des sols aujourd'hui considérés comme du pergélisol.</p> <p>Au Québec, les analyses de fossiles confirment une limite beaucoup plus septentrionale de la forêt boréale et de la toundra. L'activité périglaciaire est diminuée et l'activité éolienne absente. Les analyses polliniques révèlent l'existence d'une flore présentant des espèces thermophiles. La largeur des cernes des arbres montre un développement marqué. <i>« Le Québec subarctique connaît un climat chaud et humide »</i></p>
1200-1400	<p>Dégradation marquée du climat, plus grande instabilité et d'occurrence d'extrêmes climatiques plus fréquents et plus accentués. Émergence de crises sociales et économiques sérieuses en Europe (grande famine).</p> <p><i>« Le Québec subarctique a subi une période de temps froid et sec »</i> caractérisé par des conditions écologiques suscitées par une baisse des températures en juillet, une intensification de la déforestation par les feux, un abaissement de la limite altitudinale des arbres et une importante chute dans la croissance radiale des arbres.</p>
1400-1570	<p>Bien que contestée par certains chercheurs, la période se caractérise par des <i>« conditions douces et humides »</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les données géomorphologiques indiquent une légère récession glaciaire ; les informations écologiques semblent montrer la formation de tourbes ; • les analyses dendrochronologiques sur l'épinette noire dans le Nord Québécois supportent la présence de conditions plus clémentes et neigeuses.
1570-1880	<p>Au cours du "Petit Âge Glaciaire", on estime que la température moyenne annuelle s'est refroidi d'environ 1,3 °C entre 1200 et 1700 avec le maximum de froid en Europe vers les années 1620.</p> <p>Au Québec subarctique, les conditions écologiques indiquent des températures de juillet à leur plus bas niveau de même qu'un retrait des arbres au cours des 18^e et 19^e siècles. La mortalité et la faible croissance radiale notées des arbres, la dominance des krummholz ainsi que la diminution de la couche nivale tendent à montrer que la période fut caractérisé par des <i>« étés frais et humides et des hivers froids et venteux »</i>. L'influence de l'éruption volcanique du Tambora (Indonésie) en 1815 a été soulevée par plusieurs chercheurs.</p>
1880-1900	<p>Plusieurs courbes dendrochronologiques du Québec-Labrador montrent une croissance radiale des arbres à la hausse à partir des années 1865-1880 et correspond, dans une moindre mesure, <i>« au réchauffement des températures »</i> observées au niveau mondial</p>
	Tiré et adapté de Payette & al. (1990b)

La figure 4.1 résume les tendances régionales de la température annuelle moyenne entre 1895 et 1992 et confirme les observations d'un léger réchauffement sur le sud du Québec, avec un gradient allant de 0,1 à 0,4 °C (Environnement Canada,1995a ; Gouvernement du Québec,1996a), et d'un refroidissement significatif sur le Labrador et le Nouveau-Québec.

Figure 4.1- Tendances régionales de la température annuelle moyenne au Canada entre 1895 et 1992



Source : Environnement Canada (1995a)

Gullett & Skinner (1992) ont examiné la variation de la température annuelle au Canada par décennie depuis 1900, en la comparant à la normale climatique de 30 ans (1951-1980) et en utilisant quelque 131 stations au pays. Ces stations ont été retenues non seulement parce que leurs données étaient complètes et de qualité, mais aussi parce qu'elles représentaient le plus fidèlement les conditions climatiques des régions. Le tableau 4.2 montre, qu'à l'exception de la décennie 1950-59, le Québec a connu un régime thermique près ou sous la normale depuis le début du siècle (Gullett & Skinner, 1992) et qui ne montre aucune tendance significative pour la période 1961-1990 (Gouvernement du Québec,1996a).

Tableau 4.2 - Évolution de la température au Québec depuis le début du siècle

<u>Décennie</u>	<u>Sud du Québec (au sud du 50 °N)</u>	<u>Nord du Québec</u>
1900-1909	frais sur la Côte-Nord, le bas St-Laurent et la Gaspésie ; froid ailleurs	pas d'information suffisante
1910-1919	frais	pas d'information suffisante
1920-1929	froid sur la quasi-totalité du territoire	pas d'information suffisante
1930-1939	près de la normale	frais
1940-1949	doux sur le sud-ouest ; près de la normale ailleurs	près de la normale sauf frais sur le Nouveau-Québec
1950-1959	doux sur la quasi-totalité du territoire	doux
1960-1969	près de la normale ; frais sur l'ouest de la province	près de la normale
1970-1979	frais sauf près de la normale sur l'extrême sud de la province	froid
1980-1989	près de la normale	près de la normale ; frais sur l'extrême-nord de la province

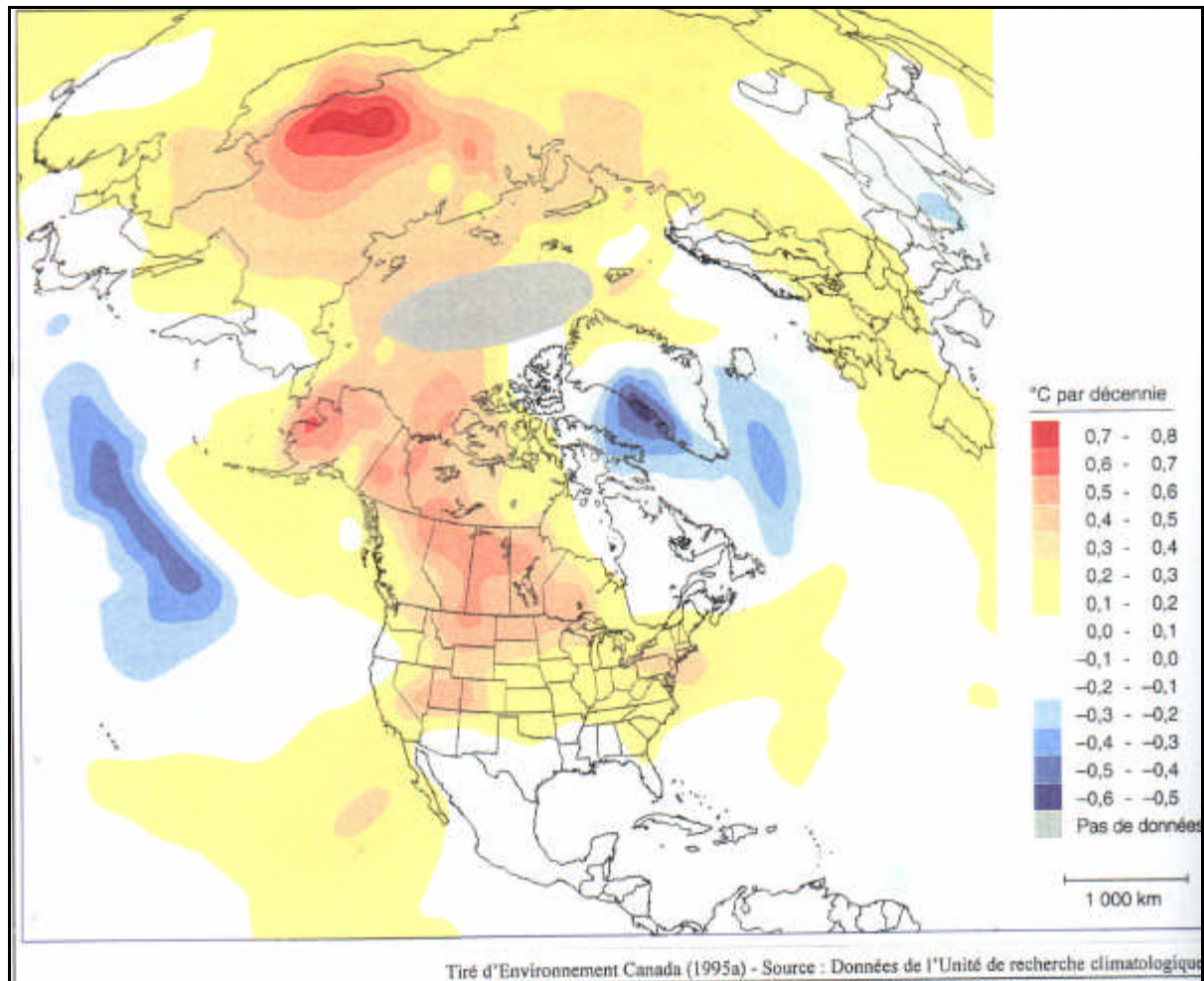
chaud : de + 0,5 à + 0,75 °C
doux : de + 0,25 à + 0,5 °C
près de la normale : par rapport à la normale 1951-80 (de -0,25 à + 0,25 °C)
frais : de -0,25 à -0,5 °C
froid : de -0,5 à -0,75 °C

Tiré et adapté de Gullett & Skinner (1992)

Pour appuyer davantage cette observation, la figure 4.2 montre que les récentes variations régionales (1961-90) au Canada correspondent bien à la tendance observée à l'échelle hémisphérique. On y note que :

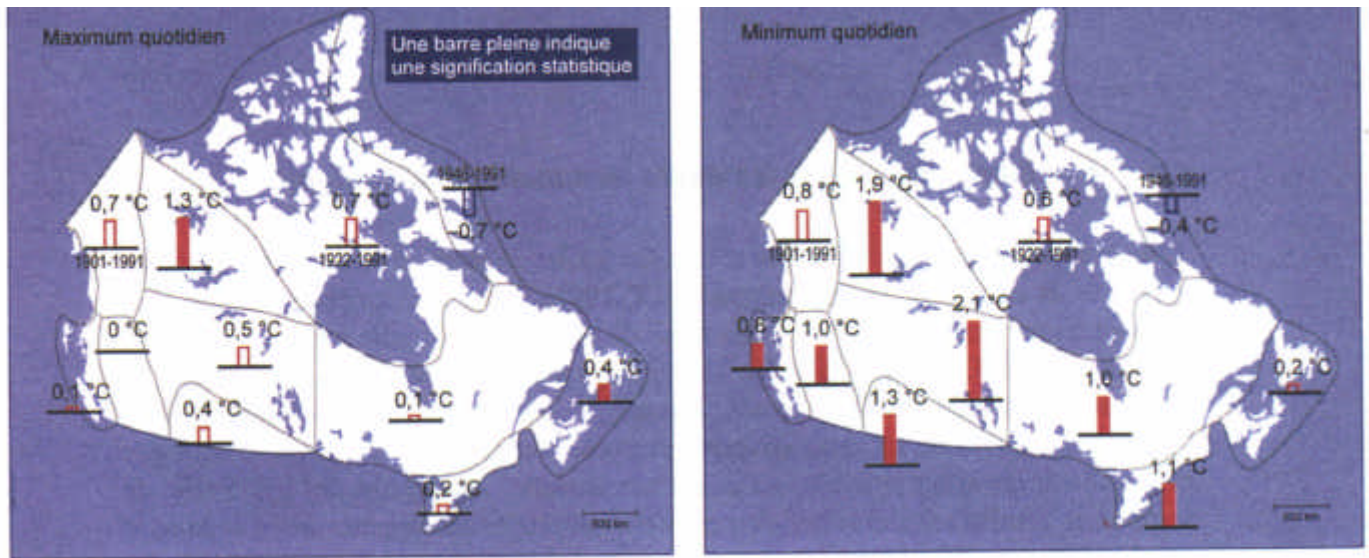
- le réchauffement est le plus marqué sur l'ouest du pays et plus particulièrement à l'intérieur des continents ;
- le Québec et les Maritimes ont subi, depuis les 30 dernières années, des températures moyennes annuelles se maintenant près ou légèrement sous les normales.

Figure 4.2 - Tendances de la température annuelle de surface à l'échelle hémisphérique entre 1961 et 1990



Le léger réchauffement observé depuis 1895 sur le sud du Québec provient principalement de températures minimales plus hautes et d'un resserrement de la variation diurne quotidienne. La figure 4.3 indique bien, en effet, que le maximum quotidien moyen n'a pratiquement pas bougé depuis 100 ans sur le centre du pays et plus particulièrement au Québec. Des données d'englacement du lac Knob et du lac Saint-Jean (Environnement Canada, 1995a) supportent également l'observation d'un léger réchauffement plus significatif au printemps avec des dates de dégel très précoces ; ainsi, en 1987, le lac Knob connut sa 3^e date la plus précoce en 35 ans d'observations.

Figure 4.3 - Tendances dans les températures maximale et minimale au Canada entre 1865 et 1992



Source Environnement Canada, 1995a

À partir des données climatiques de l'observatoire de McGill entre 1887 et 1966, Dubé (1967) confirme les observations du tableau 4.2 en indiquant une période de temps froid à Montréal entre 1887 et 1927, suivi d'une remontée de la température annuelle atteignant son apogée entre 1954 et 1961.

En ce qui a trait aux précipitations, au Québec elles varient de 300 mm (en équivalent eau) au Nouveau-Québec à près de 1 200 mm le long de la vallée du Saint-Laurent et dans les régions montagneuses du Bouclier Canadien et des Appalaches. Selon Environnement Canada (1995a), les précipitations ont été à la hausse entre 1948 et 1992, même si les particularités régionales sont difficiles à discerner (Gouvernement du Québec, 1996a).

Pour sa part, la nébulosité (i.e. la fraction du ciel couvert par les nuages) annuelle au Québec affiche une faible augmentation entre 1953 et 1991 allant de 1-2 % (Environnement Canada, 1995a) à 5 % (Gouvernement du Québec, 1996a). La hausse de la nébulosité a été plus accentuée durant cette période à l'automne.

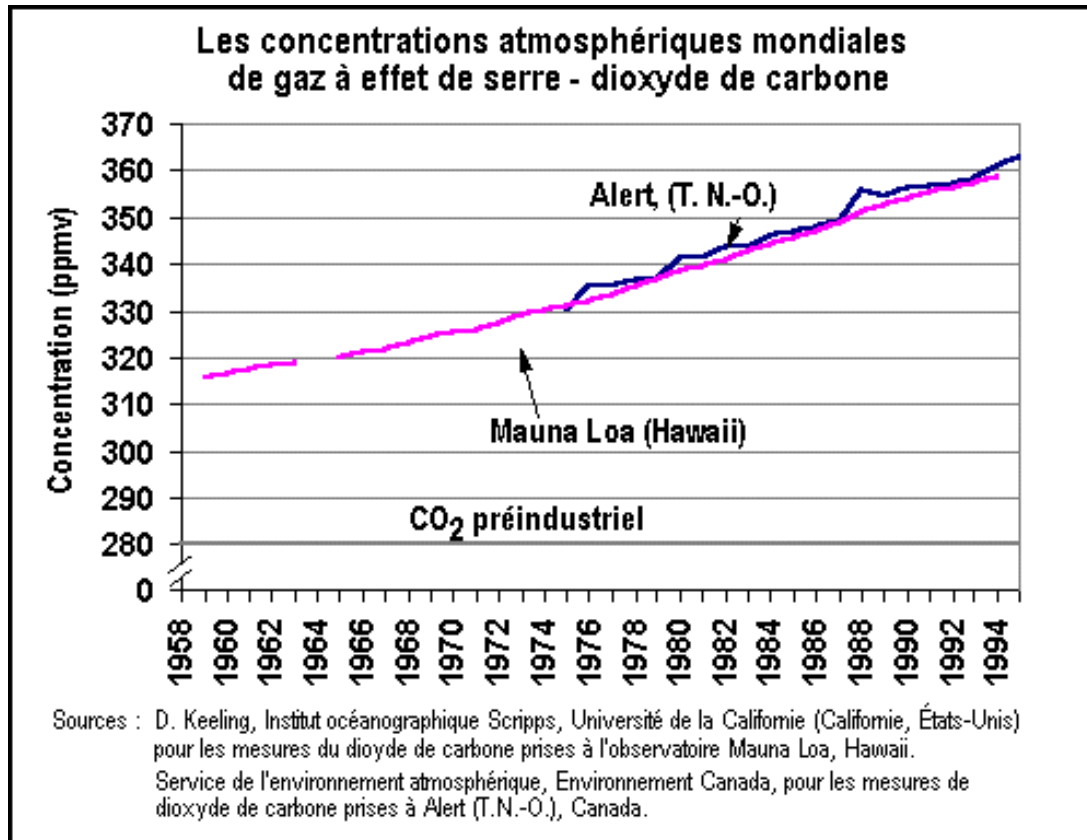
À ce point-ci, il paraît cependant important de souligner qu'avec l'automatisation des stations météorologiques et climatologiques au Canada et plus particulièrement au Québec, l'observation de certains paramètres météorologiques comme les précipitations et la couverture nuageuse exige une plus grande prudence dans l'analyse et le traitement des données en vue d'établir les séries temporelles de ces paramètres. En effet, l'introduction de biais systématiques purement causés par une modification des méthodes d'observation (automatique plutôt qu'humaine) ou des protocoles différents dans l'acquisition et le contrôle de qualité des données requiert cette mise au point.

4.4. Le climat futur vu par les outils de simulation disponibles

L'augmentation du gaz carbonique et des gaz à effet de serre ne fait plus aucun doute auprès de la communauté scientifique (IPCC,1995a) avec une concentration du CO₂ atmosphérique passant de 280 ppm au début de l'ère préindustrielle à plus de 360 ppm en 1996 (figure 4.4). Or, depuis les 15 dernières années, l'utilisation des modèles de circulation générale (MCG), outils servant à simuler le bilan énergétique de l'atmosphère terrestre, est mondialement acceptée comme étant une façon d'anticiper et de prévoir les effets possibles qu'aurait une tendance à la hausse des gaz à effet de serre. Les résultats des modèles de circulation générale sont appelés des « *scénarios de changement climatique* ».

À partir de la description des modèles de circulation générale préparée par Taylor (1997) dans le cadre de l'Étude pan-canadienne sur les répercussions et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique, nous tenterons, dans un premier temps, de décrire ce qu'est un « modèle de circulation générale », d'en identifier ses caractéristiques et ses limites et, en dernier lieu, de voir comment ils peuvent être utilisés en tenant compte des incertitudes qu'ils comportent. Puis, en mettant l'emphase sur la province de Québec, nous examinerons ce que ces scénarios de changement climatique, suivant l'hypothèse d'un doublement de CO₂ atmosphérique nous réservent au point de vue changement futur du climat. Une revue complète du niveau de connaissances traitant spécifiquement des répercussions d'un changement futur du climat pour les secteurs principaux au Québec complétera le chapitre 6.

Figure 4.4 - Évolution des concentrations de CO₂ atmosphérique à la station d'observation de Mauna Loa (Hawaï) et d'Alert (Territoires du Nord-Ouest) de 1958 à 1995*



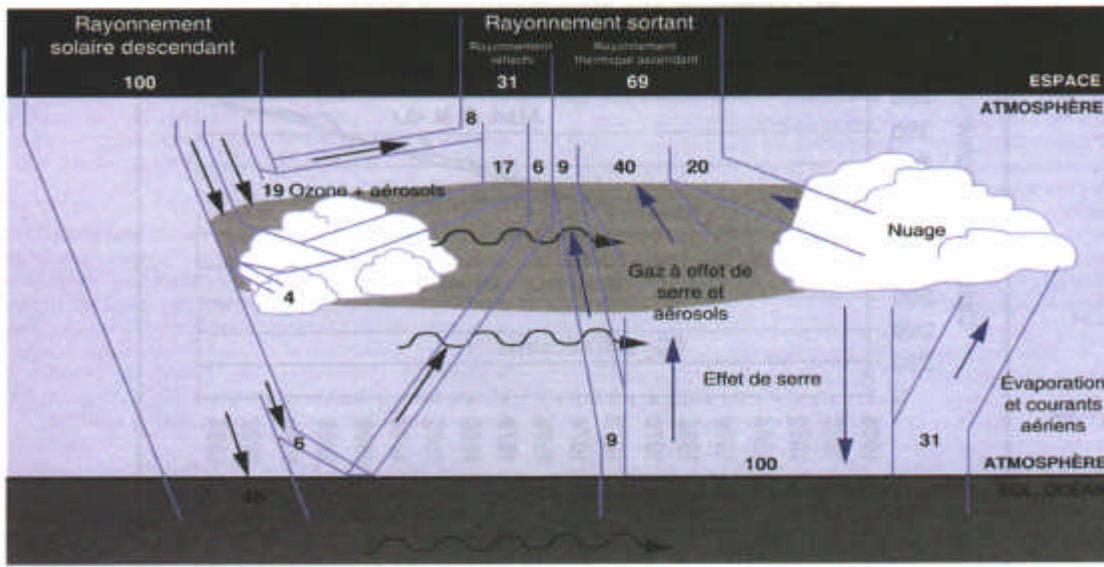
(*) : Ce graphique a été tiré du site WEB d'Environnement Canada - [http : //www.doe.ca/](http://www.doe.ca/)

4.4.1. Utilisation des scénarios de changement climatique

On peut considérer le système climatique terrestre comme une gigantesque machine thermique activée par l'énergie émise du Soleil (Peixoto & Oort, 1992). La grande majorité de cette énergie solaire traverse la basse atmosphère et la surface terrestre réchauffant ainsi l'air qui l'entoure, mettant ainsi en mouvement les vents atmosphériques, les courants océaniques et les processus d'évaporation et de précipitation du cycle de l'eau. Le climat est ainsi créé.

La surface terrestre et la basse atmosphère réchauffées par les rayons du Soleil libèrent de nouveau cette chaleur en réémettant cette énergie sous forme d'ondes plus longues, les infrarouges (figure 4.5). À mesure qu'il se déplace vers l'espace sidéral, ce rayonnement infrarouge rencontre deux obstacles atmosphériques majeurs : les nuages et les gaz à effet de serre.

Figure 4.5 - Flux d'énergie dans le système climatique terrestre



Ce diagramme décrit le flux de 100 unités d'énergie solaire dans un système climatique en équilibre. L'effet de serre ralentit le départ d'une importante partie de cette énergie intensifiant ainsi le réchauffement de la surface terrestre. C'est pourquoi la surface de la Terre émet beaucoup plus d'énergie (140 unités) qu'elle n'en absorbe directement du soleil (46 unités).

Source : Hengeveld (1995) adapté de de MacCracken & Luther (1985)

Ces deux barrières absorbent la plus grande partie de l'énergie thermique infrarouge transmise par la Terre et la réémettent dans toutes les directions. Plus particulièrement, les gaz à effet de serre, d'origine naturelle dans l'atmosphère, rendent l'atmosphère opaque au rayonnement ascendant de manière similaire à un verre opaque qui freine la transmission de la lumière visible. Avec les nuages, ils forment donc une couche isolante autour de la Terre et lui conservent sa chaleur. Sans cet « effet de serre » naturel, la température moyenne de la Terre serait au maximum de moins 18 °C au lieu du 15 °C présentement observée .

Avec l'augmentation observée et la durée de vie des divers gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane, oxyde nitreux, ozone, CFC, etc...), l'effet de serre ou la capacité de l'atmosphère d'empêcher l'énergie infrarouge de s'échapper vers l'espace sidéral est accentué. Le tableau 4.3 tiré de IPCC (1995a) donne le potentiel de réchauffement planétaire généré par un certain nombre de gaz à effet de serre. À titre d'exemple, le méthane (CH₄), à des concentrations de 2 ordres de grandeur inférieures aux concentrations de CO₂ (1,7 ppm vs 360 ppm), possède un potentiel de réchauffement planétaire dans 20 ans équivalent à 56 molécules de CO₂.

Tableau 4.3 - Potentiel de réchauffement planétaire des gaz à effet de serre

	Formule chimique	Durée de vie (ans)	Potentiel de réchauffement planétaire*		
			dans 20 ans	dans 100 ans	dans 500 ans
Gaz carbonique	CO ₂	Variable	1	1	1
Méthane	CH ₄	12	56	21	6,5
Oxyde nitreux	N ₂ O	120	280	310	170
HFC-23	CHF ₃	264	9 100	11 700	9 800
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,6	2 100	650	200
HFC-125	C ₂ HF ₃	32,6	4 600	2 800	920
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14,6	3 400	1 300	420
HFC-152a	C ₂ H ₄ F ₂	1,5	460	140	42
HFC-143a	C ₂ H ₃ F ₃	48,3	5 000	3 800	1 400
HFC-227ea	C ₃ HF ₇	36,5	4 300	2 900	950
Hexafluorure de soufre	SF ₆	3 200	16 300	23 900	34 900
Perfluorométhane	CF ₄	50 000	4 400	6 500	10 000
Perfluoroéthane	C ₂ F ₆	10 000	6 200	9 200	14 000

(*) : Le potentiel de réchauffement planétaire tient compte du taux de dégradation mis à jour par le modèle du cycle de carbone de Bern et repose sur l'hypothèse que les futures concentrations atmosphériques de CO₂ demeureront les mêmes qu'actuellement.

(Source : IPCC, 1995a)

Plusieurs facteurs comme la présence des océans, ralentissent, par leur capacité tampon, la réponse climatique de l'augmentation des gaz à effet de serre. De plus, la présence d'aérosols atmosphériques, fines particules d'origine naturelle (volcans, poussières) ou anthropique (combustion de combustibles fossiles ou de biomasse), agissent directement sur les propriétés optiques des nuages à absorber, réfléchir ou réfracter l'énergie (IPCC,1995a).

Les modèles de circulation générale (MCG) consistent en des représentations mathématiques des lois physiques de conservation du mouvement, de masse, d'humidité et d'énergie voulant simuler, de la façon la plus complète possible et en 3 dimensions, le système climatique global. Ils incluent donc de l'information sur les concentrations présentes et futures des gaz à effet de serre et les plus récentes versions commencent à inclure les aérosols atmosphériques, particulièrement depuis l'éruption volcanique du Pinatubo en 1991.

Bien qu'il existe une dizaine de MCG à travers le monde, une grande partie des études nord-américaines visant à estimer les répercussions d'un changement climatique ont utilisé un des trois (3) MCG suivants :

- le MCG de 2^{ième} génération du Centre Climatologique Canadien (CCC MCG II 1992), décrit dans Boer & al.,1992 ;
- le MCG de l'Université Princeton - le Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL,1991), expliqué dans Manabe & al.,1991 ;
- le MCG du Goddard Institute for Space Studies de la NASA (GISS,1995), décrit dans Russell & al. (1995) et Hansen & al. (1983).

Nous allons constamment référer, dans les sections 4.4 et 4.5, à ces 3 MCG en prenant cependant soin de donner des exemples basés sur le modèle canadien, le CCC MCG II (1992).

4.4.2. Caractéristiques des MCG

Tous les MCG actuellement disponibles ont la capacité de faire et de comparer des simulations entre des conditions de référence (concentrations de $1\times\text{CO}_2$ se situant entre 300 et 330 ppm) et des situations où les concentrations sont doublées ($2\times\text{CO}_2$ i.e. entre 600-660 ppm). Un MCG va d'abord diviser la planète en un nombre très grand de « points de grille », puis fera des estimés des conditions climatiques actuelles qui caractérisent chaque point de grille.

Ainsi, l'utilisation du sol, la présence ou non de plans d'eau importants, la topographie, les océans et les zones couvertes de glace permanente constituent un ensemble de paramètres individualisant chacun des points de grille et jouant ainsi un rôle certain dans le bilan énergétique de la Terre, que ce soit sous des conditions récentes (scénario de $1xCO_2$) ou futures (scénario de $2xCO_2$).

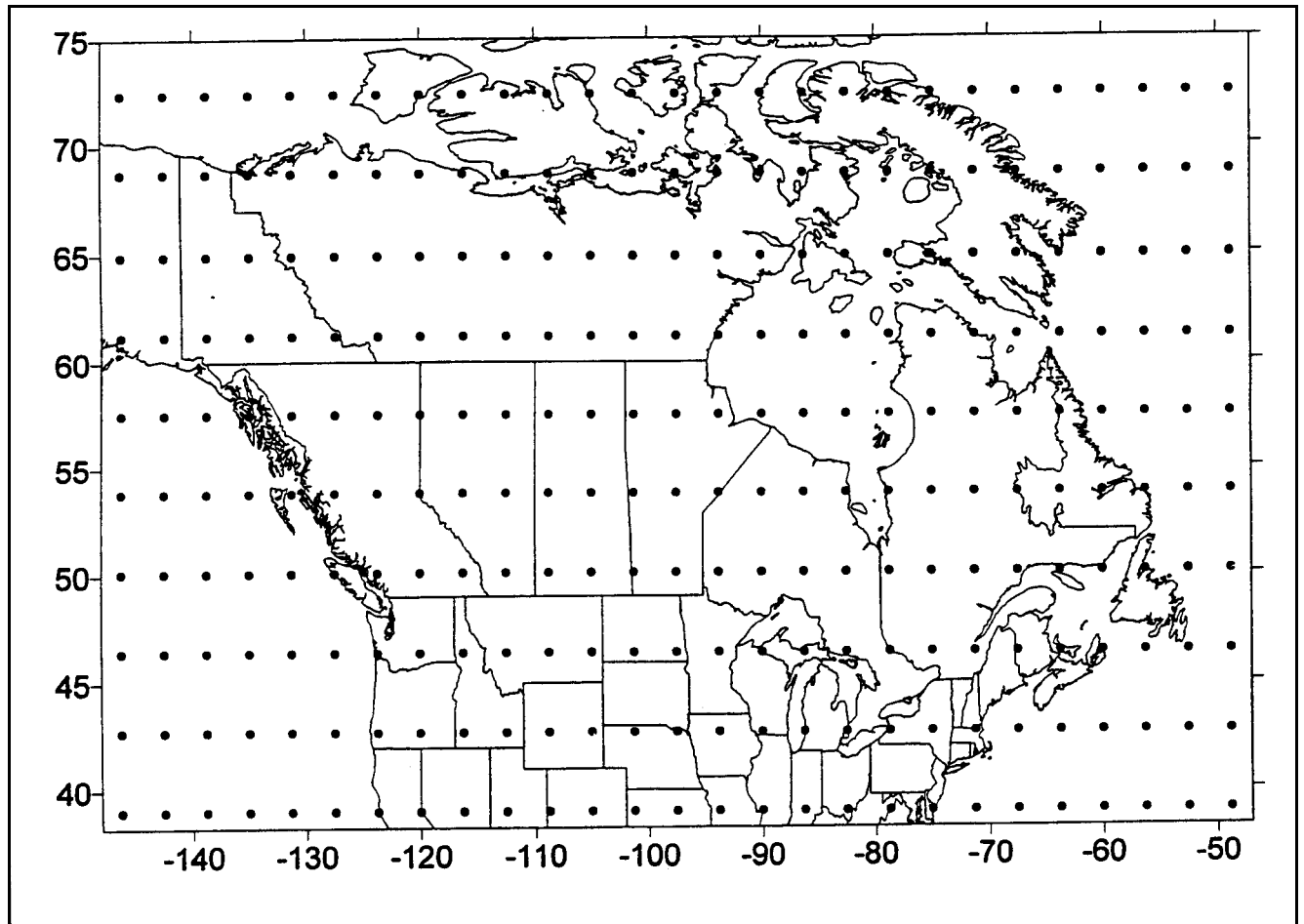
Chaque MCG effectue ces simulations en utilisant une formulation mathématique et physique pouvant être différente. La résolution spatiale entre les points de grille des MCG varie selon les modèles et se situe présentement entre 200 et 300 km. En examinant la résolution spatiale du CCC (figure 4.6), il est intéressant de remarquer l'absence de points de grille sur les Grands Lacs et l'estuaire du Saint-Laurent. Malgré le fait que le modèle de circulation générale canadien possède une résolution plus forte (distance entre les points de grille plus faible) que plusieurs de ses concurrents, on peut voir que le MCG, par ses caractéristiques intrinsèques et le coût informatique élevé à effectuer ces simulations, ne constitue qu'une représentation limitée des conditions environnementales réelles.

Les MCG se divisent en deux grandes catégories selon le type de réponse forcée sur le modèle suite à un doublement du CO_2 atmosphérique : les MCG en équilibre (CCC-1992) et les MCG en mode transitoire (GISS-1995 ; GFDL-1991). Le tableau 4.4 compare les caractéristiques des 3 MCG.

Les MCG en équilibre débutent par une initialisation du modèle à des concentrations actuelles de CO_2 ($1xCO_2$). Puis les concentrations de CO_2 sont abruptement doublées laissant le modèle fonctionner jusqu'à l'atteinte d'un nouvel état d'équilibre.

Le scénario $2xCO_2$ ainsi produit donne une réponse climatique à une augmentation instantanée du CO_2 , sans tamponnement ou délai dans le signal dû, par exemple, à l'inertie thermique des océans (Manabe & al., 1991). Ces MCG en équilibre utilisent habituellement une représentation océanique dite « en couches » et ont le désavantage de ne pas être construits pour montrer, de façon réaliste, comment le climat variera avec les années.

Figure 4.6 - Distance entre les points de grille du modèle de circulation générale canadien-CCC MCGII (1992) ayant une résolution de 3,75 ° longitude par 3,7 ° latitude (formulation gaussienne). Ceci équivaut à une distance, à 45 °N de latitude de 295 km par 411 km.



Source : Taylor (1997)

D'autre part, les MCG en mode transitoire permettent une hausse progressive des concentrations de CO₂ avec le temps (e.g. 1% par année) et nécessitent un couplage de l'atmosphère avec les systèmes océaniques afin que les flux thermiques et d'humidité entre l'atmosphère, la surface des mers et les couches plus profondes des océans soient adéquatement représentés en fonction des années.

Tableau 4.4 - Comparaison de 3 modèles de circulation générale

MCG	Type de MCG	Résolution horizontale	Représentation océanique	Auteurs	Particularités
CCC ¹	équilibre	3,75 ° lon x 3,7 ° lat (gaussien) À 45 °N, 295 x 411 km	en couches, couche de mélange de 50 m	Boer et al. (1992)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulation de référence sur 20 ans initialisée à 330 ppm CO₂ 2. État d'équilibre : 660 ppm CO₂ 3. Moyennes mensuelles de 10 ans calculées (an 1 à an 10)
GFDL ²	transitoire	7,5 ° lon x 4,5 ° lat (gaussien) À 45 °N, 590 x 500 km	couplée	Manabe et al. (1991)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulation de référence sur 100 ans initialisée à 1958 (315 ppm de CO₂) 2. Simulation transitoire de 1% d'augmentation de CO₂ par année pour 100 ans 3. Moyennes mensuelles calculées pour les années 60 à 80
GISS ³	transitoire	5,0 ° lon x 4,0 ° lat À 45 °N, 393 x 445 km	couplée	Russell et al. (1995) après Hansen et al. (1983)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Simulation de référence sur 74 ans initialisée à 315 ppm de CO₂ 2. Simulation transitoire de 1% par année d'augmentation de CO₂ pour 74 ans 3. Moyennes saisonnières sur 10 ans (an 65 à an 74)

(1) : Centre Climatologique Canadien MCG II
(2) : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
(3) : Goddard Institute for Space Studies

Source : Taylor (1997)

4.4.3. Contraintes associées aux MCG

Il devient hasardeux de comparer aveuglement les scénarios des divers MCG ayant des formulations mathématiques et physiques différentes (équilibre versus transitoire, résolutions spatiale et temporelle diverses, représentation océanique variée, etc). On peut ainsi énumérer rapidement une série d'arguments appuyant la nécessité d'être prudents dans l'utilisation des MCG, sans toutefois en limiter leur utilité à donner des *tendances et des pistes* sur ce que sera le climat futur sous un doublement des concentrations de CO₂ :

- Bien que les concentrations de CO₂ atmosphérique n'aient augmenté que de 35 ppm de la fin du 19^e siècle à la fin des années 50', le taux de croissance depuis les 30 dernières années est d'environ 0,7% annuellement (IPCC,1995a) pour atteindre 360 ppmv en 1996. À ce taux, les MCG en équilibre partent donc de l'hypothèse que les concentrations de CO₂ seront doublées à la fin du siècle prochain (environ 100 ans). D'autre part, les MCG transitoires forcent un taux de croissance du CO₂ atmosphérique de 1 % annuellement, ce qui doublera les concentrations d'ici 70 ans. La grande variété d'approches ajoute à la confusion entre les MCG.
- Le tableau 4.4 indique bien que les niveaux initiaux de concentrations de CO₂ utilisés par les MCG dans leurs simulations de référence, diffèrent d'un MCG à l'autre (CCC-330 ppm ; GFDL - 315 ppm ; GISS - 315 ppm).
- Dans le tableau 4.3, nous voyons que chaque gaz à effet de serre a un potentiel de réchauffement planétaire qui est fonction de sa durée de vie et de sa concentration dans l'atmosphère. IPCC (1995a) parle de CO₂ équivalent, qui est la concentration de CO₂ requise pour ajouter au CO₂ actuel la contribution d'effet de serre des autres gaz. Comme les scénarios de changement climatique ont comme hypothèse de base un climat ayant un doublement de CO₂, les MCG ont tous des formulations différentes pour traiter le CO₂ seul versus le CO₂ équivalent.

- En couplant dynamiquement l'atmosphère avec l'océan, les MCG transitoires peuvent plus adéquatement simuler le délai existant entre l'augmentation du CO₂ atmosphérique et la réponse climatique. Ils ont donc l'habitude d'être lents à démarrer un réchauffement dont l'ampleur est habituellement moindre que dans les MCG en équilibre. Partant d'une situation à l'équilibre (1xCO₂), les premières décennies de simulation des MCG transitoires voient le réchauffement induit par la hausse de CO₂ être contrecarré fortement par l'inertie thermique des océans.
- Certains MCG commencent à inclure la présence des aérosols qui ont comme effet de réduire l'énergie solaire incidente et de modifier les propriétés optiques des nuages. Les 3 MCG discutés dans cette section (CCC II-1992 ; GFDL-1991 ; GISS-1995) n'ont pas cette particularité de considérer les aérosols atmosphériques.

Bien que les MCG peuvent être utilisés pour indiquer l'ampleur de la réponse climatique à une augmentation importante des gaz à effet de serre à une échelle planétaire, le degré d'incertitude dans l'application des MCG à une échelle régionale demeure très élevé (IPCC, 1995a ; McBean & al.,1992). Les différences dans la distribution régionale des températures et des précipitations, selon le MCG utilisé, indiquent bien la prudence à les utiliser aveuglement.

C'est pour cette raison que le développement associé aux modèles régionaux du climat (Caya & al.,1995 ; Giorgi,1990) doit être suivi avec grand intérêt. Fonctionnant à des résolutions suffisamment fines pour permettre une meilleure représentation des champs physiques de l'air, de l'eau et du sol, les modèles régionaux deviennent alors des outils d'interface entre les MCG et les outils de prise de décision, dans les divers secteurs affectés par une variabilité climatique accrue.

4.4.4. Application des scénarios de changement climatique

Ayant passé en revue la série de contraintes associées aux MCG, quelle est donc la méthodologie proposée pour utiliser les scénarios de changement climatique dans l'estimation des répercussions de la variabilité et du changement climatique au pays. Taylor (1997), appuyé par IPCC (1994), suggère d'employer les données climatologiques observées au lieu des simulations de référence 1xCO₂, de les interpoler aux points de grille des MCG les plus

proches (krigeage) et d'y appliquer les changements tels que suggérés par les scénarios de changement climatique. Bien que cette technique donne des bons résultats pour la température, cette procédure devient beaucoup plus risquée dans l'estimation des précipitations sous des conditions de doublement de CO₂ atmosphérique.

En conclusion, combinés à des données climatologiques historiques de haute qualité, les MCG demeurent des outils valables pour l'identification des répercussions d'un changement climatique induit par une augmentation des gaz à effet de serre. Limités dans leur capacité de fournir des scénarios de haute résolution et précision et, requérant une puissance informatique exceptionnelle, les MCG continueront à s'améliorer avec l'acquisition de nouvelles connaissances tant au niveau physique, chimique que mathématique. L'utilisateur des scénarios de changement climatique doit donc en surveiller attentivement l'évolution future.

4.5. Que représente un changement futur du climat pour le Québec ?

Un examen comparatif des scénarios de température et de précipitations des 3 MCG (CCC II-1992 ; GFDL-1991 ; GISS-1995) portant sur le territoire québécois (tableaux 4.5 et 4.6), combiné aux sorties spécifiques du modèle de circulation générale canadien (CCC II-1992) pour les saisons estivale et hivernale, permet de faire les observations suivantes sous l'hypothèse d'un doublement de CO₂ atmosphérique :

- a) une tendance générale au réchauffement de + 1 à + 4 °C partout sur le sud du Québec et de + 2 à + 6 °C dans la partie septentrionale de la province (tableau 4.5). Ce réchauffement sera plus accentué lors de la saison hivernale et beaucoup important et intense dans le Nord du Québec (figures 4.7 et 4.8) ;*
- b) le sud du Québec recevrait, sous des conditions de doublement de CO₂ atmosphérique, des quantités de précipitation près ou légèrement au-dessus des normales saisonnières (de 0% à +10%). Les régions plus nordiques du Québec, pour leur part, recevraient entre 10 et 20% plus de précipitations que les valeurs actuellement observées (tableau 4.6). Les divergences spatiales (selon les régions de la province) et temporelles (selon les saisons) sont cependant plus importantes pour les scénarios de précipitations des MCG que pour le champ de température anticipé sous des conditions de 2xCO₂, (figures 4.9 et 4.10)*

Aucune indication n'est cependant donnée, à partir des scénarios de changement climatique, sur la fréquence, la durée et l'intensité prévue des événements climatiques extrêmes (sécheresse, inondations, vagues de froid et de chaleur, tempêtes hivernales,

etc.), ni sur les modifications apportées à la trajectoire moyenne des systèmes météorologiques affectant le Québec.

Tableau 4.5 - Changement dans la température moyenne saisonnière (en °C) selon 3 modèles de circulation générale (MCG)

	<i>Sud du Québec</i>			<i>Nord du Québec</i>		
	<u>CCC</u> (1992)	<u>GFDL</u> (1991)	<u>GISS</u> (1995)	<u>CCC</u> (1992)	<u>GFDL</u> (1991)	<u>GISS</u> (1995)
Printemps (mars à mai)	+ 4	+ 3	+ 1 à + 2	+ 4	+ 3	+ 2 à + 4
Été (juin à août)	+ 4	+ 3	+ 1	+ 2 à + 4	+ 2 à + 3	+ 2
Automne (sept à nov)	+ 3	+ 2 à + 3	+ 1 à + 2	+ 3	+ 3 à + 5	+ 2 à + 3
Hiver (déc à fév)	+ 5 à + 6	+ 4	+ 2	+ 6 à + 9	+ 4 à + 7	+ 2 à + 5

Source : Tiré et adapté de Taylor (1997)

CCC : modèle de circulation générale en équilibre 2xCO₂ - Centre Climatologique Canadien (1992)

GFDL : modèle de circulation générale transitoire 2xCO₂ - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (1991)

GISS : modèle de circulation générale transitoire 2xCO₂ - Goddard Institute for Space Studies (1995)

Figure 4.7 - Variation de la température moyenne en été (°C)

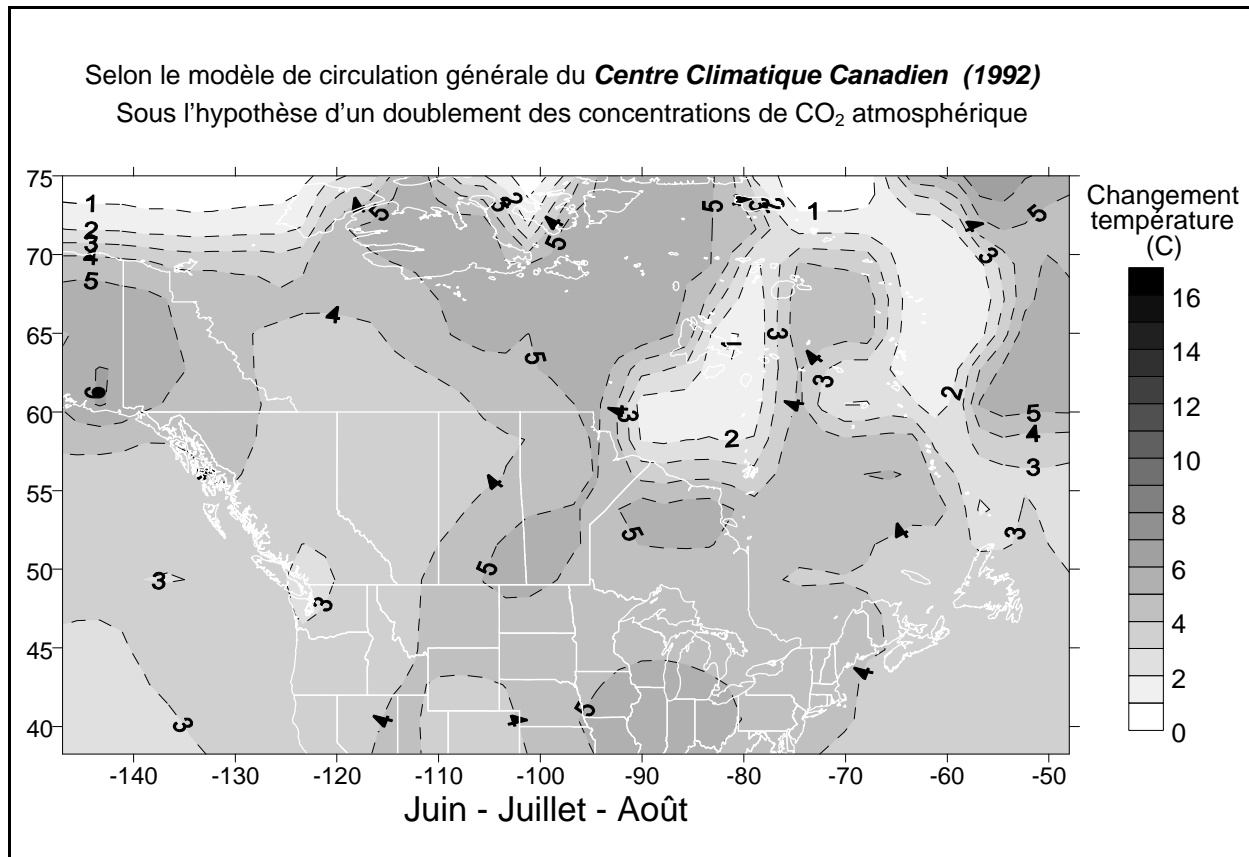


Figure 4.8 - Variation de la température moyenne en hiver (°C)

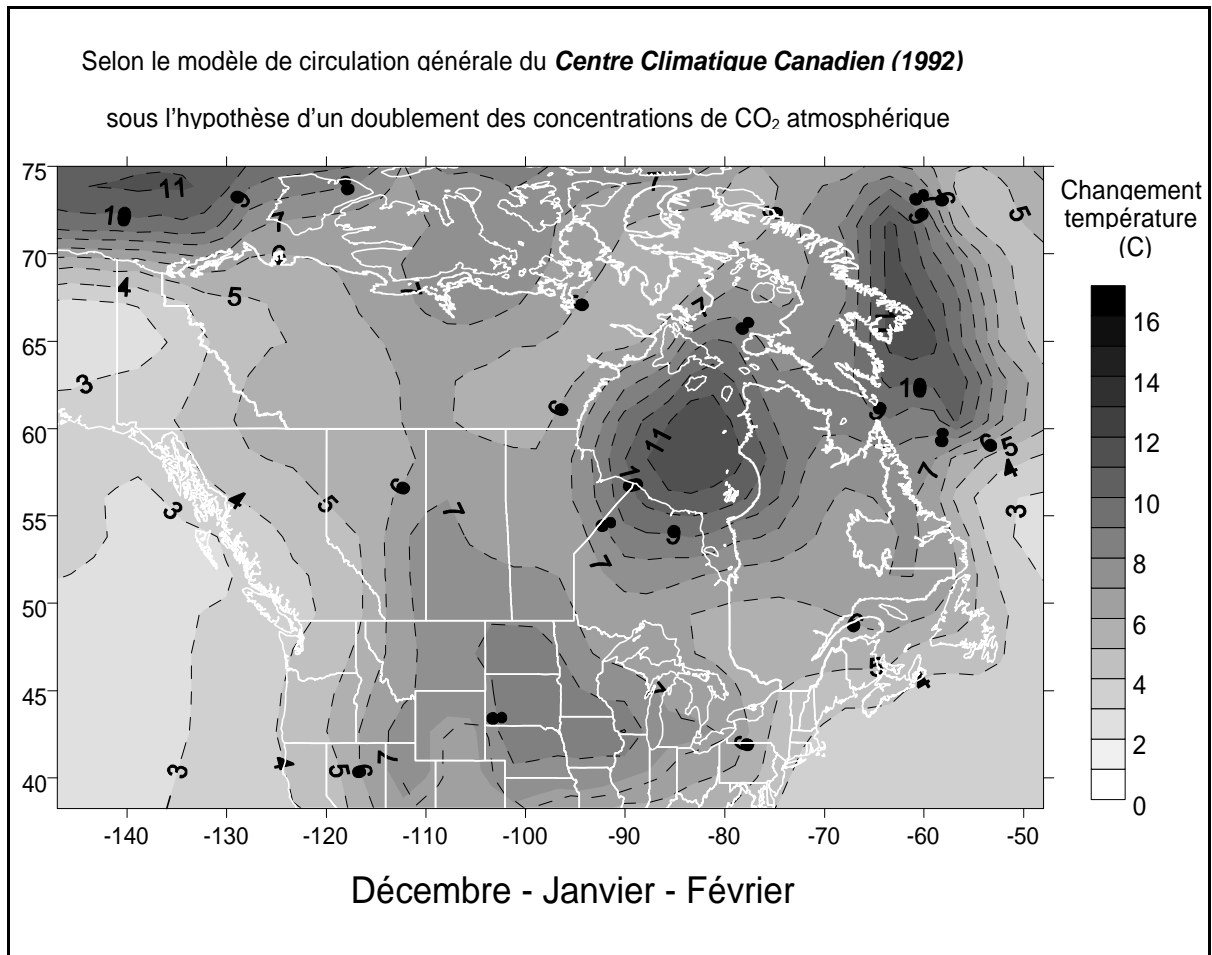


Tableau 4.6 - Changement dans la précipitation saisonnière (en pourcentage) selon 3 modèles de circulation générale (MCG)

	<i>Sud du Québec</i>			<i>Nord du Québec</i>		
	CCC (1992)	GFDL (1991)	GISS (1995)	CCC (1992)	GFDL (1991)	GISS (1995)
Printemps (mars à mai)	<i>0 %</i>	<i>+10 %</i>	<i>+ 5 %</i>	<i>+ 10 %</i>	<i>0 %</i>	<i>+ 10 %</i>
	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>
	<i>+ 10 %</i>	<i>+20 %</i>	<i>+ 10 %</i>	<i>+20 %</i>	<i>+ 20 %</i>	<i>+ 20 %</i>
Été (juin à août)	<i>0 %</i>	<i>-10 %</i>	<i>0 %</i>	<i>-10 %</i>	<i>0 %</i>	<i>0 %</i>
	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>
	<i>+ 10 %</i>	<i>+10%</i>	<i>- 10 %</i>	<i>+20 %</i>	<i>+20 %</i>	<i>+ 20 %</i>
Automne (sept à nov)	<i>0 %</i>	<i>0 %</i>	<i>0 %</i>	<i>5 %</i>	<i>0 %</i>	<i>+ 10 %</i>
	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	
	<i>-30 %</i>	<i>+ 10 %</i>	<i>5 %</i>	<i>+ 20 %</i>	<i>+ 10 %</i>	
Hiver (déc à fév)	<i>+ 5%</i>	<i>+ 10 %</i>	<i>+ 10 %</i>	<i>+ 10%</i>	<i>+ 10 %</i>	<i>0 %</i>
	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>	<i>à</i>
	<i>+10%</i>	<i>+ 20 %</i>	<i>+ 20 %</i>	<i>+ 20%</i>	<i>+ 20 %</i>	<i>+ 20 %</i>

Source : Tiré et adapté de Taylor (1997)

CCC : modèle de circulation générale en équilibre 2xCO₂- Centre Climatologique Canadien (1992)
GFDL : modèle de circulation générale transitoire 2xCO₂ - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (1991)
GISS : modèle de circulation générale transitoire 2xCO₂ - Goddard Institute for Space Studies (1995)

Figure 4.9 - Variation de la précipitation totale en été (en pourcentage)

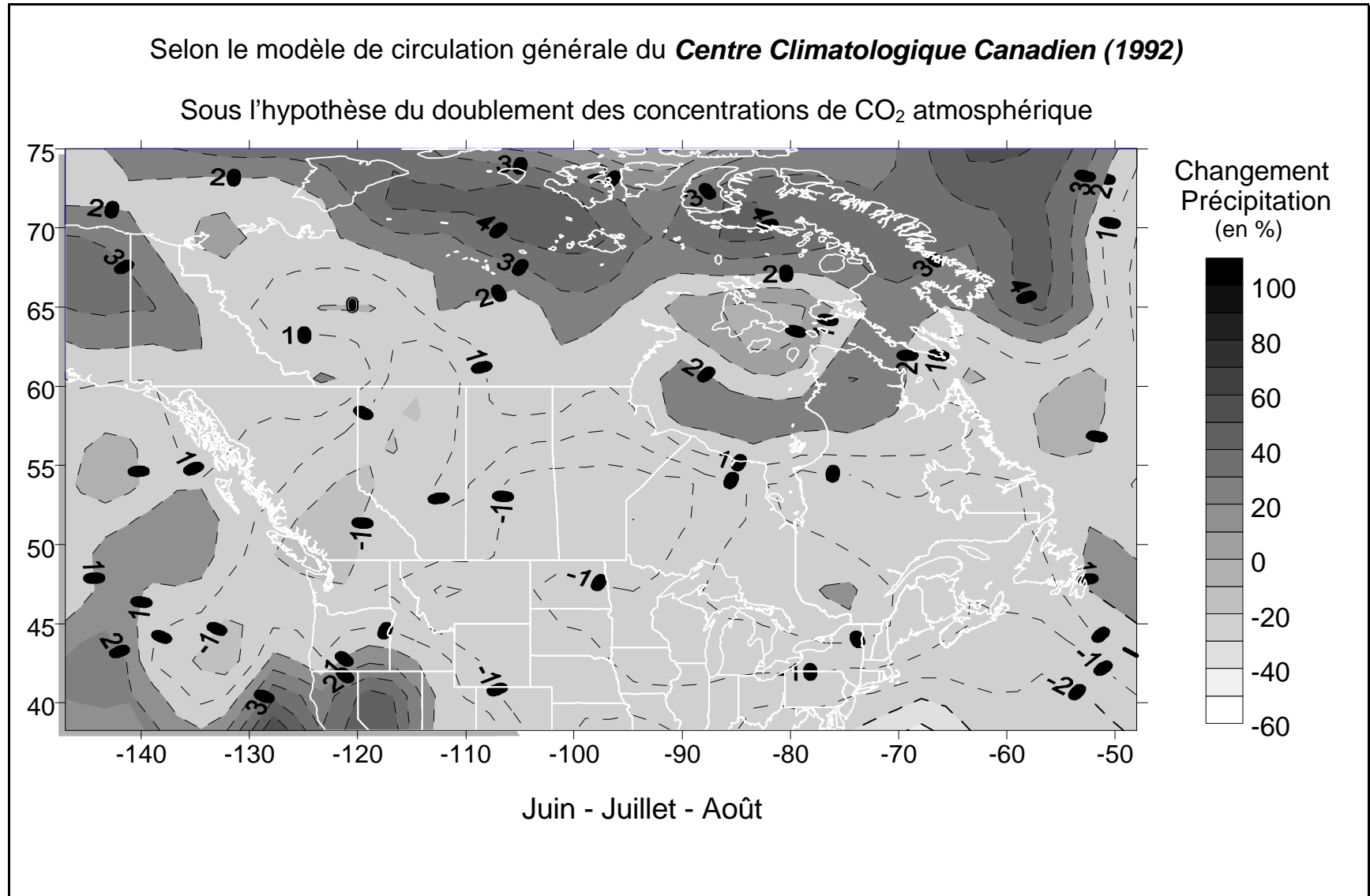
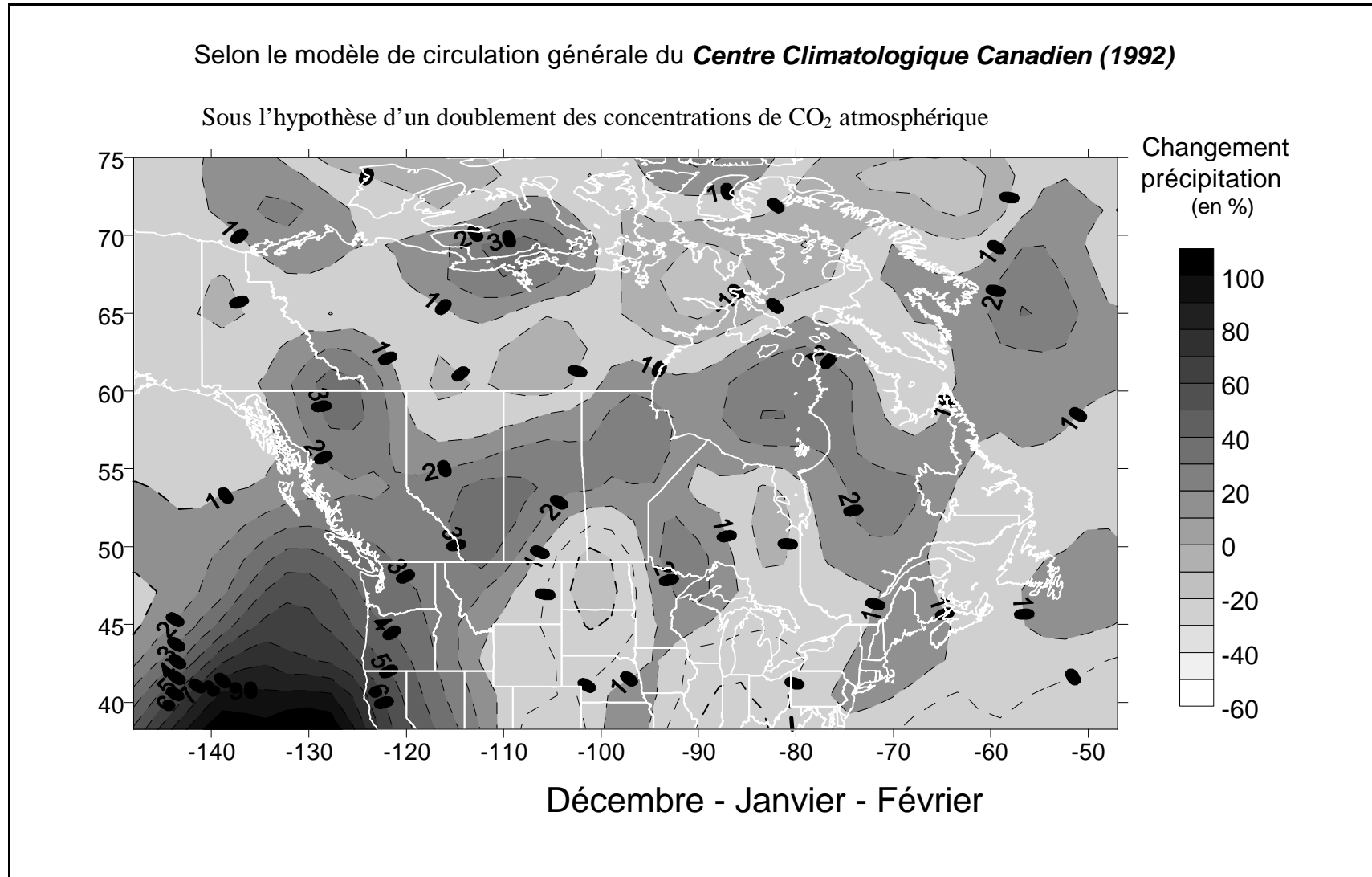


Figure 4.10 Variation de la précipitation totale en hiver (en pourcentage)



5. IMPORTANCE DES ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTRÊMES

Le climat peut être traité comme une distribution statistique représentant l'ensemble des situations météorologiques affectant une région donnée. La fréquence, l'amplitude, la durée et la séquence de ces situations météorologiques peuvent résulter en des épisodes climatiques extrêmes causant parfois des dommages d'une intensité inouïe à la société québécoise et aux écosystèmes qui l'entourent.

Ainsi, le dense et persistant brouillard du 22 août 1711, bien que banal en nature, vint quand même contrecarrer les plans d'assaut de la ville de Québec de l'amiral Walker en faisant échouer 8 de ses 15 navires de guerre, ce qui causa le décès de 884 personnes (Etkin,1997 ; Environnement Canada,1988). Et que dire de la collision du « Empress of Ireland », paquebot du Canadien Pacifique, avec le charbonnier norvégien le « Storstad », à la hauteur de Rimouski le 29 mai 1914, qui entraîna la mort de près de 1 024¹ personnes en moins de 25 minutes? (Environnement Canada,1996a).

Les résidents de Saint-Jean-de-Vianney se souviendront sûrement de la dévastation de leur village, le 4 mai 1971, lors d'un glissement de terrain majeur accompagné de pluies abondantes qui causa la mort de 31 personnes ainsi que l'engouffrement d'un autobus, de plusieurs voitures et de 35 maisons dans un cratère de 600 m de largeur par 30 m de profondeur (Environnement Canada,1991).

L'histoire du Québec est parsemée de tels événements climatiques dramatiques d'origine naturelle et qui font partie du paysage climatique québécois. Comment passer sous silence l'« année sans été » ou « l'été noir » de 1816 qui occupe, sans contredit, une place privilégiée dans les annales météorologiques de l'Amérique du Nord. Soupçonné d'être directement lié à l'intense éruption volcanique de Tambora, près de Java en Indonésie en avril 1815, qui a éjecté une estimation de 150 millions de tonnes de poussières volcaniques dans l'atmosphère, les répercussions de l'été 1816 (entre mai et septembre) sont renversants (Environnement Canada 1989, 1990a) :

- des bourrasques de neige à Montréal les 6 et 8 juin;
- 30 cm de neige à Québec le 10 juin créant des congères « aussi hauts que les essieux des calèches » et des températures sous le point de congélation font noircir les cultures et compromettent la récolte de l'été 1816. On craint la famine ;
- en juillet, certains lacs du nord-est du Québec étaient encore recouverts de glace assez épaisse pour pouvoir s'y aventurer ;

¹ Etkin (1997) parle plutôt de 1 014 pertes de vie.

- en août, il neige 7 fois à Grande-Rivière-de-la-Baleine (rive est de la baie d'Hudson) et on établit un record de gel hâtif sur l'est de la province forçant les employés de la baie d'Hudson à abandonner leur poste pour éviter la famine
- les températures estivales enregistrées se sont maintenues de 3 à 5 °C sous les normales saisonnières.

Des anomalies climatiques se sont donc déjà produites dans le passé. Elles font partie des caractéristiques intrinsèques du climat passé et présent. Mais qu'en serait-il du climat futur ? Aurons-nous davantage ou moins de vagues de froid, de tornades, de crues subites et de périodes de sécheresse sous des conditions futures de concentrations rehaussées des gaz à effet de serre ?

La réponse à ces questions suscite une grande controverse au sein de la communauté scientifique qui tente, depuis les 20 dernières années, de mieux comprendre et anticiper la réaction du système climatique terrestre, suite à une augmentation des gaz à effet de serre sur la fréquence, la durée et l'intensité des événements climatiques extrêmes ainsi que sur la trajectoire des systèmes météorologiques qui affectent quotidiennement nos régions (Held,1993). Par exemple :

- Agee (1991) trouva une corrélation statistique significative entre la fréquence des tempêtes météorologiques et le régime thermique à long terme observé sur une région donnée. Dans une période de temps chaud, la fréquence des tempêtes augmente (de 19 % entre 1905 et 1940) alors que, lorsque la température moyenne annuelle tend vers un refroidissement, la fréquence diminue jusqu'à 30 % (e.g. entre 1950 et 1975 aux Etats-Unis).
- Stein et Hense (1994) vont dans le même sens en associant la fréquence plus élevée des tempêtes hivernales intenses de l'Atlantique Nord depuis 1988/89 au réchauffement inhabituel observé dans cette région.
- Utilisant le scénario canadien du changement climatique (voir le chapitre 4 pour plus de détail sur les modèles de circulation générale), Lambert (1995) trouva que, même si la fréquence de dépressions météorologiques intenses serait plus élevée, un environnement 2xCO₂ verrait une réduction de 4 % dans le nombre total de systèmes météorologiques.
- Hall & al. (1994) ainsi que Carnell & al. (1996) trouvèrent une intensification et un déplacement vers le nord des trajectoires des systèmes météorologiques

- Les auteurs divergent d'opinions sur l'observation d'une tendance passée, présente ou future dans le nombre et l'intensité des ouragans frappant la côte Atlantique et parfois responsables de quantités importantes de pluie automnale au Québec. On peut citer l'exemple « anonyme » de 1869 (Phillips,1984), de Carol en 1954 (Environnement Canada,1987a), d'Agnès en 1972 (Phillips,1984), de Belle en 1976 (Environnement Canada,1989), de David (Phillips,1984) ainsi que de Frédéric (Environnement Canada,1987a) en 1979.

Landsea & al. (1996) conclut que cette fréquence diminue depuis le milieu des années 70. Emmanuel (1987) avance des arguments thermodynamiques pour dire qu'une augmentation de la température de l'eau des océans réduira l'intensité des ouragans par 40 à 50 %. Idso & al. (1990) suggèrent qu'un climat plus chaud de 0,5 à 1,0 °C donnera des ouragans moins fréquents et moins intenses. Haarsma & al. (1993) montrent qu'en utilisant un scénario de changement climatique, le nombre d'ouragans augmentera de 50% avec plus d'événements très intenses. Evans (1993), Lighthill & al. (1994) et Ryan & al. (1992) indiquent que le niveau de connaissances actuelles ne permet pas d'inférer les répercussions d'un changement climatique sur la fréquence et l'intensité des ouragans.

On ne saurait trop insister sur l'importance de bien connaître la distribution spatiale et temporelle de ces événements climatiques anormalement intenses, en plus d'avoir une connaissance quantitative la plus précise et exacte possible de la fourchette de répercussions qu'ils apportent avec eux. Si l'augmentation des gaz à effet de serre à l'échelle mondiale se traduit effectivement par un changement dans la fréquence, la durée et l'intensité des phénomènes climatiques extrêmes, il est primordial d'être en mesure de le détecter rapidement et d'en évaluer l'ensemble des impacts. Le présent chapitre poursuit cet objectif.

Malheureusement, il n'est pas facile de rassembler ces informations essentielles à une adaptation judicieuse à une variabilité climatique modifiée. Ces informations sont dispersées et générées suite à diverses requêtes du milieu (physique, biologique ou social). C'est pour cette raison que, tout au long du présent chapitre, on n'hésitera pas à énumérer les événements climatiques qui ont marqué le Québec en tentant, dans la mesure du possible, de citer la source et les références.

Cinq catégories d'événements climatiques extrêmes considérés comme les plus dommageables et les plus typiques du climat québécois seront considérées dans le présent chapitre. Ce sont :

- *les inondations ;*
- *les périodes de sécheresse ;*
- *les tempêtes hivernales ;*
- *les vagues de froid intense et de chaleur accablante ;*
- *le temps violent estival de nature convective (venant d'orages) plus particulièrement les tornades et la chute de forte grêle.*

5.1. Inondations

Andrews (1993) et Perrier(1978) dénotent trois (3) causes principales des inondations au Québec soient :

- les crues subites (d'origine convective et orageuse) ou des chutes de pluie extrêmes et prolongées (générées de systèmes météorologiques intenses);
- la fonte rapide de la neige au printemps ;
- les embâcles.

La fonte du couvert de neige au printemps est directement liée à la quantité de neige accumulée au cours de l'hiver ainsi qu'à la vitesse du dégel printanier. Accompagné de pluies fortes, ce dégel peut devenir catastrophique et favoriser la formation d'embâcles. Habitée par 80 % de la population du Québec, la plaine du Saint-Laurent constitue un endroit vulnérable aux inondations, particulièrement celles liées à la fonte printanière et aux embâcles. Beaucoup de villes et villages se sont développés sur les abords de cours d'eau et souvent au sein même de la plaine inondable (Landry & Mercier, 1983). Ceci s'explique du fait que les plaines inondables sont estimées pour leur potentiel agricole, la construction domiciliaire et industrielle et l'accessibilité aux rives (Coates, 1981). Par contre, les inondations ont comme conséquences de réduire les possibilités d'utilisation du sol et de limiter ainsi la mise en valeur commerciale de ces territoires (Éconosult, 1986).

Plusieurs des inondations majeures du Québec, qui sont adéquatement documentées, sont liées directement ou indirectement à des embâcles soit au niveau du Saint-Laurent ou de ses tributaires importants. On peut mentionner :

- l'embâcle du fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Montréal en 1888 alors que les rues du centre ville furent recouvertes d'eau;
- le cas du 30 juillet 1917 sur la Chaudière avec 16 000 personnes affectées et de pertes de 1,3 million de dollars (1917\$);
- les désastres de fin septembre 1924 et du début novembre 1927 (avec 1 perte de vie) sur la rive sud du Haut St-Laurent;
- la crue printanière de mars 1936 en Estrie et dans Charlevoix avec 11 décès répertoriés;
- l'inondation du 3 août 1957 dans les Cantons de l'Est et sur la rive sud du Saint-Laurent avec 4 pertes de vie et 2 millions de dollars(1957\$) de dommages;

- l'événement du 2 et 3 novembre 1966 sur la rive nord du fleuve avec 4 pertes de vie et des dommages totalisant 1,3 millions de dollars (1966\$);
- les crues d'avril à juin 1974 dans les régions de l'Outaouais et de Montréal avec plus de 4 000 familles affectées et quelques 30 millions de dollars (1974\$) en aide financière aux sinistrés versés par les gouvernements provincial et fédéral;
- la crue de 1976 particulièrement forte et prolongée et avec une récurrence de 1 dans 100 ans, la pire au Québec en termes de superficie affectée et qui entraîna des déboursés, en termes d'aide financière aux sinistrés, de près de 30 millions de dollars (1976\$);
- la crue des 17 au 19 avril 1982 dans les régions de l'Estrie, des Cantons de l'Est et de la Beauce qui força l'évacuation, à Sherbrooke seulement, de plus de 300 personnes entraînant des dommages de plus de 10 millions de dollars (1982\$);
- les crues d'avril 1991 sur la rivière Chaudière avec plus de 1 000 personnes affectées et près de 10 millions de dollars(1991\$) de dommages;
- les crues et embâcles de janvier et de février 1996 sur les rivières Chateauguy et Saint-François avec 72 municipalités et 3 250 résidences touchées (en janvier seulement) nécessitant une aide financière par le gouvernement dépassant les 3,3 millions de dollars (1996\$).

Le fleuve Saint-Laurent a également connu des crues par embâcles désastreuses. Dans la plupart des cas, les forts vents soutenus du nord-est qui poussent les glaces dans le sens contraire des courants sont à l'origine des embâcles majeurs de glaces qui se forment dans le chenal maritime du lac Saint-Pierre. Ainsi, Michel (1976) et Andrews (1993) mentionnent l'embâcle de janvier 1968 près du pont de Québec durant lequel le refoulement de la glace vers l'amont a atteint Trois-Rivières, nécessitant l'emploi de 9 brise-glaces pour éliminer l'embâcle. Par ailleurs, les conditions climatiques particulières de l'hiver 1992-93 ont favorisé une accumulation de 10 mètres d'épaisseur de glace (Bergeron,1995) et la formation d'un embâcle majeur dans le secteur entre Lanoraie et Yamachiche (Lacroix, 1997, comm. pers.). Cet embâcle a provoqué des inondations dans 7 municipalités et, surtout, a obstrué la Voie maritime pendant plusieurs jours, paralysant la navigation fluviale entre Trois-Rivières et Montréal.

De par son régime climatique et les caractéristiques de son réseau hydrographique, le Québec connaît des inondations à tous les ans. Les inondations majeures qui ont des impacts sur les populations, les bâtiments et les infrastructures sont également fréquentes. L'annexe A donne la liste non-exhaustive des inondations d'importance au Québec à partir de l'ensemble des références disponibles à ce jour. Bien qu'incomplète, on peut déjà faire des observations intéressantes sur l'ampleur de ce type d'événements climatiques extrêmes et ses conséquences sur la population québécoise (tableau 5.1) :

- Entre 1865 et 1996, on compte au moins 167 inondations au Québec entraînant plus de 100 pertes de vie et au moins 46 000 personnes affectées et évacuées et totalisant, en dollars réels, un minimum avoisinant le milliard de dollars. Ces chiffres sont extrêmement conservateurs étant tirés des rapports d'experts souvent orientés vers la réfection d'infrastructures telles les ponts, les voies ferrées, etc... Les dommages matériels de la quantité phénoménale de sous-sols inondés, bâtiments ravagés, inconvéniens liés à la fermeture d'usines, de commerces, d'écoles, de services de tous genres ne sont que très rarement documentés ou comptabilisés dans les références ;
- En moyenne, on a plus d'une inondation majeure au Québec annuellement et les statistiques disponibles démontrent qu'à toutes les 2 inondations, on peut s'attendre à 250-300 personnes évacuées et affectées. La perte en dommages liée à une inondation majeure se situe en moyenne entre 2,0 et 5,5 millions de dollars. Il faut cependant noter que, depuis 1974, les pertes de vie attribuables directement aux inondations sont rares : on recense un cas en avril 1982 et un cas en juillet 1987. Par ailleurs et malgré l'importance du désastre, les inondations de juillet 1996 au Saguenay n'ont entraîné aucune perte de vie par noyade: sur les dix pertes de vie dénombrées, huit sont liées à des phénomènes de mouvement de sol (coulée argileuse et affaissement de routes) et deux à une erreur de navigation (Lacroix, 1997, comm. pers.);
- L'information disponible sur les inondations de la période 1865 à 1912 est très fragmentaire et requiert une analyse beaucoup plus rigoureuse qui tienne compte des mouvements démographiques et des conditions sociales de la population du temps ainsi que des bases économiques sur lesquelles le Québec était structuré ;
- Avec la création par le gouvernement du Québec de la Commission des eaux courantes en 1912, on assiste à un examen plus systématique des conditions entourant chaque inondation majeure connue. Perrier (1978) tire un grand nombre de ces informations de cette source fiable. Malgré tout, beaucoup de travail reste à faire pour documenter adéquatement les inondations d'importance ayant affecté la province, surtout en ce qui concerne l'ampleur des répercussions qu'elles ont causé à la population et à ses biens matériels ainsi qu'aux conséquences environnementales qui, jusqu'à tout récemment, furent systématiquement ignorées.

Tableau 5.1 - Liste préliminaire des inondations majeures au Québec des 125 dernières années et leurs répercussions

Période	Nombre d'inondations majeures	Nombre minimal de pertes de vie et personnes affectées	Estimé minimal des dommages matériels (en millions de dollars)
Avant 1900	7	45 morts	N/D
1900-1909	2	N/D	N/D
1910-1919	5	16 000 affectées	plus de 1,3 million (1917\$)
1920-1929	16	4 morts et plus	N/D
1930-1939	21	20 morts	plus de 1,0 million (1938\$)
1940-1949	11	N/D	plus de 1,4 million (1942\$, 1944\$)
1950-1959	21	4 décès	plus de 2,0 millions (1957\$)
1960-1969	11	5 décès	plus de 2,8 millions (1966\$, 1968\$)
1970-1979	16	10 000 personnes affectées	plus de 60,0 millions (1974\$, 1976\$)
1980-1989	52	14 morts - plus de 2 500 personnes affectées - 44 000 résidences/chalets touchés	plus de 18,0 millions
1990-1996	5	10 morts - au moins 18 000 personnes affectées	plus de 813,0 millions (1996\$)
TOTAL	167 <i>(soit 1,6 cas en moyenne par année)</i>	102 morts au moins 46 500 personnes affectées <i>(soit une moyenne de 250 à 300 personnes affectées à chaque 2 inondations)</i>	au moins 890 millions (en dollars réels) <i>(en considérant la crue du Saguenay en 1996, au moins 5,5 millions de \$\$ de dommages par inondation). Cependant, selon les études de la Direction Générale de la Sécurité Publique, les coûts moyens annuels sont autour de 2,0 à 2,5 millions de dollars)</i>

Bien qu'incomplètes, les statistiques du tableau 5.1 combinées à la liste non-exhaustive des inondations de l'annexe A sont cohérentes avec celles de Boivin & Lacroix (1990a) dénombrant, entre le 1^{er} janvier 1979 et le 31 décembre 1988, 67 cas d'inondations à travers la province.

Par ailleurs, en territoire québécois, la Convention Canada - Québec relative à la cartographie et à la protection des plaines d'inondation et au développement durable

des ressources en eau (appelée la *Convention*) a permis, depuis sa signature en 1976², la détermination, la délimitation et la cartographie de “*zones sujettes aux inondations*”. Ces zones d’inondation désignées distinguent une zone de grand courant (crues de récurrence 0-20 ans) et une zone de faible courant (crues de récurrence 20-100 ans). Les cartes issues de la *Convention* sont officiellement désignées par Environnement Canada et le Ministère de l’Environnement et de la Faune du Québec. La *Convention* restreint les affectations et les usages des zones inondables désignées et stipule :

- qu’aucun ouvrage fédéral ou provincial n’y sera construit ;
- qu’aucune aide financière ne sera accordée pour des ouvrages édifiés ou à être édifiés ;
- qu’en cas d’inondation, aucune indemnisation ne sera versée pour les dommages ou pertes aux biens meubles ou ouvrages édifiés postérieurement à l’établissement de la zone désignée ;
- que le fédéral et le provincial inciteront les autorités relevant de leur compétence à prohiber la construction d’ouvrages, à imposer des restrictions ou des mesures d’indemnisation contre les inondations.

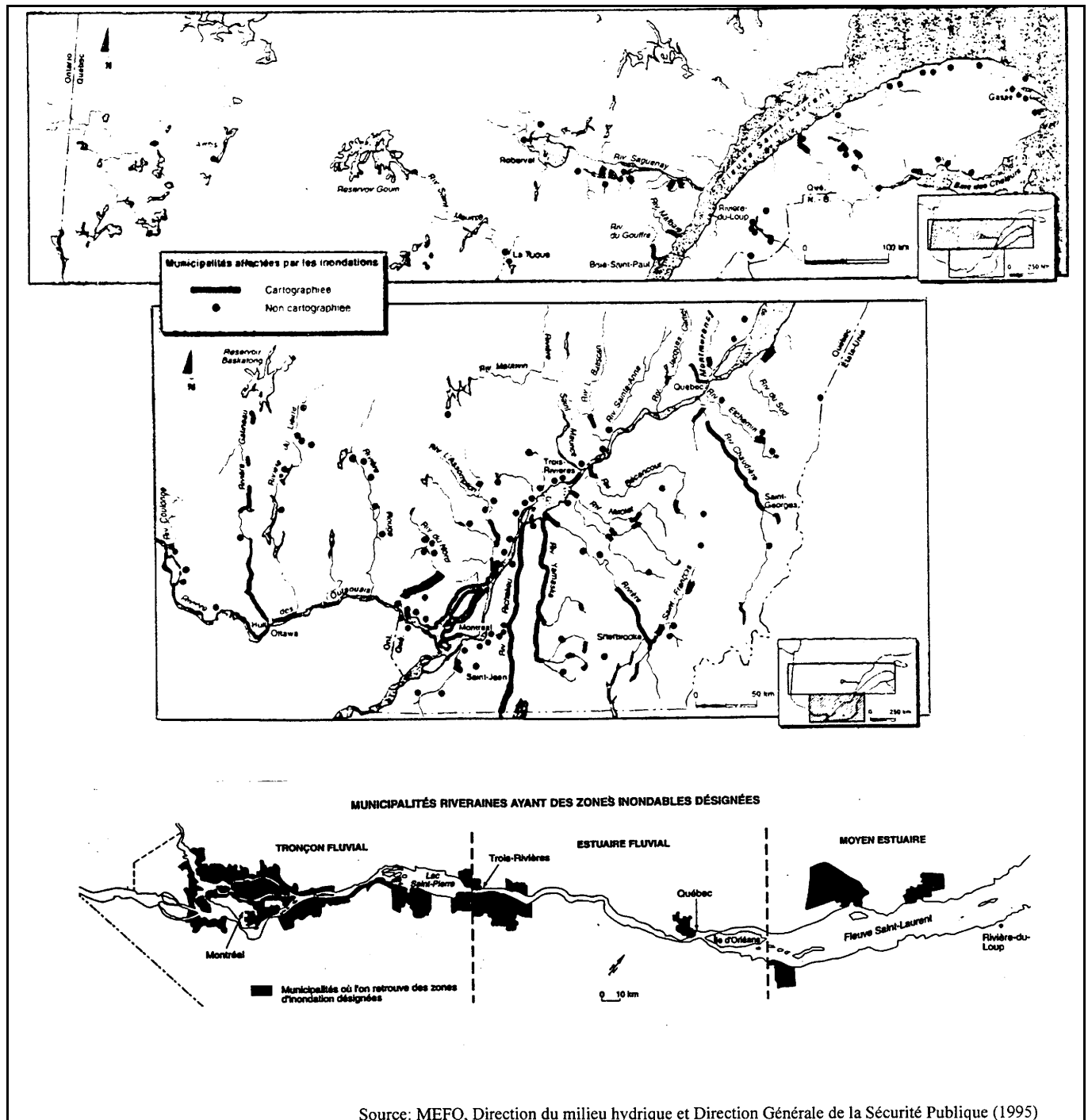
Au 31 mars 1997, il y avait 263 municipalités cartographiées selon la convention relative à la cartographie et à la protection des plaines d’inondation et au développement durable des ressources en eau dont 57 dans le tronçon fluvial, 5 dans l’estuaire fluvial, 6 dans le moyen estuaire, quatre le long du Saguenay, deux dans l’estuaire maritime et une dans le golfe (figure 5.1). On prévoit en avoir 278 cartographiées d’ici 1998. De plus, pour l’ensemble des municipalités le long de l’axe du Saint-Laurent entre le lac Saint-Louis et Sainte-Anne-des-Monts (Gaspésie), des cotes d’inondation pour les récurrences de 20 et de 100 ans ont été fournies par le ministère de l’Environnement et de la Faune du Québec aux municipalités et aux municipalités régionales de comté (MRC) concernées (Lacroix, 1997 - comm. pers.).

Par ailleurs et malgré tous les efforts faits pour identifier et gérer sainement les zones inondables, les inondations comptent parmi les événements naturels qui coûtent le plus cher aux instances gouvernementales. La Direction générale de la Sécurité et de la Prévention (DGSP) du Gouvernement du Québec a le mandat de gérer les demandes d’indemnisation des riverains suite aux inondations. Bergeron (1995), citant les statistiques de la Direction générale de la Sécurité civile³, mentionne l’importance des inondations de 1974 et 1976 quant au nombre de municipalités touchées. Selon le tableau 5.2, les municipalités riveraines du lac Saint-Louis ont reçu du Bureau d’aide financière du Québec 1,2 million de dollars (1974\$) suite à la crue de 1974 (Jourdain & al., 1994).

²La cartographie des plaines inondables a effectivement débuté en 1977-1978 ultérieurement aux inondations majeures de 1974 et de 1976 sur le sud du Québec

³Est devenue la DGSP en octobre 1995

Figure 5.1 - Régions cartographiées et ayant des zones inondables désignées (Haut Saint-Laurent) ainsi que les municipalités affectées par les inondations au Québec



Le secteur fluvial, entre Boucherville et Trois-Rivières, est un secteur sensible aux variations des niveaux d'eau, plus particulièrement les basses terres du lac Saint-Pierre. De fait, une zone d'environ 18 000 hectares est identifiée comme ayant une

réurrence d'inondation aux 2 ans avec une durée moyenne d'inondation de 5 à 9 semaines (MCLP, 1987). Les réclamations les plus importantes dans ce tronçon ont été produites à la suite des inondations de 1974, 1976 et 1981 (Sécurité publique, 1995) (tableau 5.3) pour un total, entre 1974 et 1991, de 1,8 million de dollars.

Tableau 5.2 - Répartition de l'assistance financière aux municipalités riveraines du lac Saint-Louis suite aux inondations de 1974

Municipalités	Riverains	Entreprises	Fermes	Organismes	Mesures d'urgences	Montant total (1974\$)
Ste-Anne-de-Bellevue	3 234	3 307	0	0	2 060	8 601
Beaconsfield	4 048	0	0	0	0	4 048
Pointe-Claire	1 200	0	0	0	2 998	4 198
Dorval	430	0	0	0	21 309	21 739
Lachine	991	442	0	0	6 286	57 719
Pincourt	7 547	0	0	0	5 178	12 725
L'Île-Perrot	25 002	1 350	0	4 672	54 137	85 161
Notre-Dame Île-Perrot	20 513	17 863	0	201 408	16 513	256 297
Vaudreuil	3 710	6 705	2 170	0	37 784	50 369
Maple-Grove	43 581	986	0	56 559	0	101 126
Léry	52 271	2 826	0	0	39	55 136
Châteauguay	122 567	17 695	2 162	0	442 228	584 652
Kahnawake	0	3 182	0	0	0	3 182
Total	285 094	53 456	4 332	303 804	542 367	<u>1 244 953</u>
	22,9 %	4,3 %	0,3 %	24,4 %	43,6 %	

Tiré de Bergeron(1995) - source originale : Ministère de la Sécurité Publique (1995)

Tableau 5.3 - Indemnités versées aux municipalités touchées par les inondations entre 1974 et 1991 (de Boucherville à Trois-Rivières)

Municipalités	Riverains	Entreprises	Fermes	Organismes	Montant partiel (\$)
Boucherville	14 147	0	3 903	0	18 050
Repentigny	82 976	34 817	0	0	117 793
Sorel	214 535	38 158	26 267	0	278 960
Berthierville	75 378	101 576	7 320	0	184 274
Saint-Barthelemy	38 957	1 974	229 359	0	270 290
Nicolet	172 320	82 639	75 902	0	330 861
Trois-Rivières	485 627	93 710	1 320	0	580 657
TOTAL :	1 083 940	352 874	344 071	0	1 780 885

Tiré de Bergeron(1995) - source : Sécurité publique (1995)

Or selon Lacroix (1997), et en excluant le sinistre de 1996 au Saguenay, les sommes versées par les gouvernement du Québec aux sinistrés des inondations de la province, entre 1981 et 1996, s'élèvent à près de 40 M\$, soit 57% de toutes les indemnités versés au Québec pour des sinistres d'origine naturelle (tableau 5.4). Ces sommes représentent en moyenne que 20% des dommages réels, ce qui revient à dire que les inondations entre 1981 et 1996 ont causé pour près de 200 millions de dommages. Cette évaluation est du même ordre de grandeur que ce qui est indiqué au tableau 5.1.

Tableau 5.4 - Indemnités (en dollars) versées par le gouvernement provincial en fonction du type de sinistre (1981-1996)

Année	Inondations	Verglas	Tornades et vents	Mouvements de sol	Feux de forêt	TOTAL
1981	5 444 571					5 444 571
1982	3 950 011					3 950 011
1983	2 213 036	7 077 055	179 704	13 819 960	81 503	23 371 258
1984	919 076		435 781	189 674		1 544 531
1985	10 005	361 043		172 746		543 794
1986	1 166 505			55 233	59 692	1 281 430
1987	9 386 080			90 278		9 476 358
1988	279 228					279 228
1989	1 560 580			381 204	228 873	2 170 657
1990	356 200			103 771		459 971
1991	3 333 159		2 027 797	273 500	1 465 149	7 099 605
1992	942 552			2 120 186		3 062 738
1993	1 711 764			188 252		1 900 016
1994	1 508 310 ¹		230 000	269 395		2 007 705
1995	165 338			238 219	55 454	459 011
1996	108 707 558 ¹ 101 740 399 ^{1,2}					108 707 558
TOTAL	141 653 973	7 438 098	2 873 282	17 902 418	1 890 671	171 758 442\$
Excluant le Saguenay	39 913 574\$					70 018 023\$
¹ : indique que ces montants ne sont pas finaux ² : montant lié au seul sinistre de juillet 96 du Saguenay						

Source : Direction générale de la sécurité et de la prévention (1997)

Les pluies diluviennes survenues du 18 au 21 juillet 1996 dans la région du Saguenay s'inscrivent comme un événement marquant de l'histoire climatique du Québec. Les dommages estimés varient entre 700 et 800 millions de dollars (1996\$) avec un engagement des autorités gouvernementales pour la reconstruction pour la reconstruction et l'indemnisation de la région dépassant les 413 millions de dollars⁴ dont 100 millions provenant du gouvernement du Québec (Bureau de reconstruction et de relance du Saguenay/Lac Saint-Jean, 1996 ; Lacroix, 1997 - comm. pers.).

⁴ À partir des documents disponibles lors de la rédaction du présent rapport, il nous a été difficile de statuer avec précision sur l'engagement financier de chaque niveau de gouvernement pour l'indemnisation et la reconstruction des zones sinistrées.

Il a été estimé que 90% des dommages sont liés aux résidences localisées en zone inondable. L'événement a mis en relief toute la gestion déficiente des ouvrages de retenue des eaux au Québec dont un grand nombre sont orphelins (i.e. sans surveillance continue de leurs opérations ou sans propriétaire).

Environnement Canada (1997c) tire les observations suivantes d'une analyse climatologique de l'inondation de 1996 au Saguenay :

- les secteurs du Saguenay, du Parc des Laurentides et de la Côte-Nord (à l'ouest de Sept-Iles) ont reçu, du 18 au 21 juillet, une accumulation totale de précipitation supérieure à 100 mm avec un maximum enregistré à Rivière-aux-Écorces, au sud-ouest du Saguenay avec plus de 275 mm (figure 5.2) ;
- de tous les cas répertoriés au Québec, la tempête du 18 au 21 juillet 1996 constitue la tempête ayant généré les plus importantes accumulations de pluie en 48 heures sur 1 000 km² (hauteur moyenne de pluie de 261,8 mm), sur 10 000 km² (hauteur moyenne de pluie de 206,8 mm) et sur 100 000 km² (hauteur moyenne de pluie de 125,6 mm). Cependant, pour la même période d'accumulation (48 heures), l'étude constate que, de tous les cas répertoriés au Canada, le nombre de tempêtes ayant produit des volumes d'eau comparables ou supérieurs est de :
 - plus de 30 cas sur une superficie de 1 000 km² ;
 - plus de 15 cas sur une superficie de 10 000 km² ;
 - près de 7 cas sur une superficie de 100 000 km².

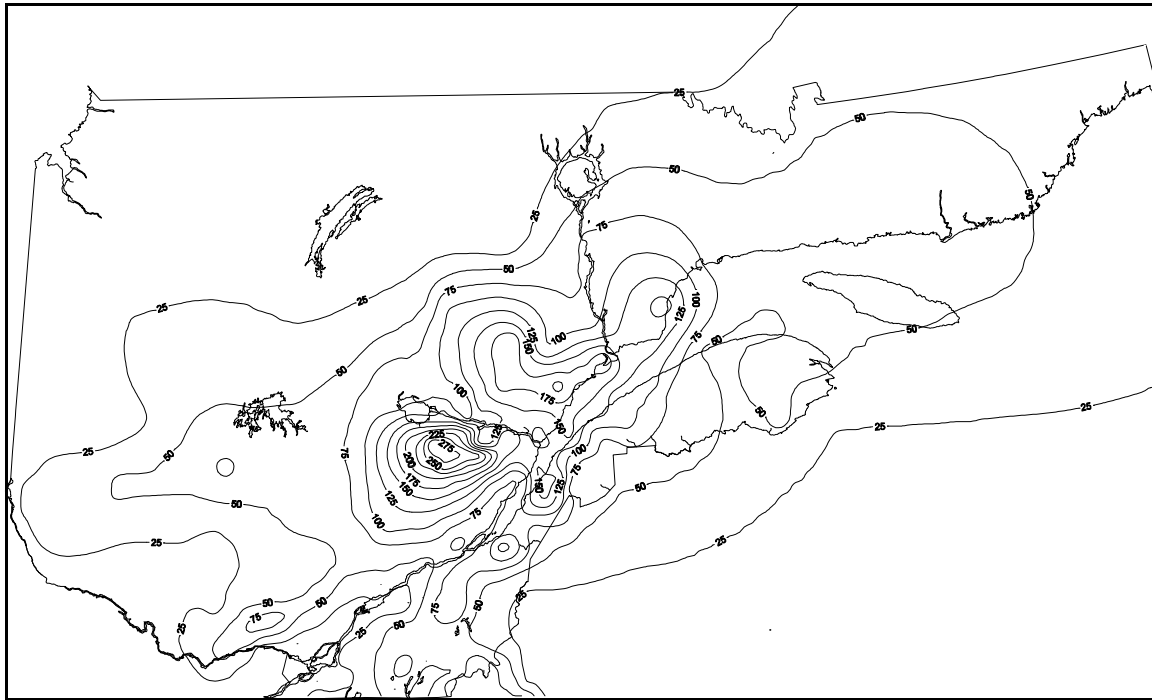
L'évaluation sommaire des effets environnementaux des inondations qui ont frappé la région du Saguenay en juillet 1996 porte surtout sur les oiseaux migrateurs, le milieu marin, les poissons d'eau douce et leurs habitats respectifs. Globalement, les inondations n'ont pas occasionné d'effet négatif important sur l'avifaune et son habitat. En effet, aucun habitat d'importance et aucune espèce rare ou menacée n'a été significativement affecté (Pigamon Inc., 1996). Seul le delta de la baie des Ha ! Ha !, deuxième site d'importance pour les oiseaux aquatiques, a été recouvert d'une couche de sédiments pouvant atteindre 1 m et s'est agrandi de telle sorte que le potentiel du marais, après la recolonisation par la végétation, pourrait être supérieur à ce qu'il était auparavant (Pigamon Inc., 1996).

Les principaux impacts rencontrés dans les rivières tributaires du Saguenay sont liés à une érosion importante de leurs rives et de leur lit ainsi qu'à une dévalaison massive des espèces de poissons. Walsh & Bougeois (1996) rapportent, après une évaluation préliminaire des impacts des inondations, que les modifications observées dans le milieu marin sont attribuables à un apport de sédiments et de débris de toutes sortes qui se sont déposés sur le fond marin. Ces accumulations ont probablement eu des effets dévastateurs sur la faune benthique et sur les herbiers aquatiques. Il en résulte une perte d'habitat pour la reproduction et l'alimentation de plusieurs espèces utilisatrices de ces milieux (Walsh & Bougeois, 1996).

Ceci amène immédiatement la question suivante. Y a-t-il plus d'inondations qu'auparavant? Aucune étude systématique n'a, au Québec, examiné cette question bien que l'on reconnaît que les dommages causés par les inondations sont en croissance. Par ailleurs, certains auteurs ont examiné plus spécifiquement les événements de pluies. Ainsi, Hogg (1997, comm. pers.) a examiné les séries temporelles des cas extrêmes de pluie autant au point de vue fréquence que quantité en utilisant approximativement 50 stations à travers le Canada. Aucune tendance systématique à large échelle n'a pu être déterminée au pays (Lawford & al., 1995) contrairement à Angel & Huff (1997) qui, à partir de données d'événements à pluie maximale à 304 endroits dans le Mid-Ouest américain remontant jusqu'en 1901, trouvèrent une plus grande occurrence de ces pluies dans les dernières années et couvrant une plus grande superficie touchée qu'au début de la série temporelle. Cependant, selon Lacroix (1997 - comm. pers.), les seules analyses de pluies extrêmes, même si elles dénotent un accroissement de ces dernières, ne permettent pas d'évaluer s'il y a une tendance similaire pour les inondations puisque de nombreux éléments entrent en jeu lorsque l'on considère la problématique des inondations.

Un nombre important de références, documents et rapports publiés par le Département des Ressources hydrauliques du Gouvernement du Québec existe sur l'historique et les détails des inondations affectant la rivière Ste-Anne à Saint-Raymond (Cartier & Leclerc, 1965a,1966a,1966b; Bourbonnais & al.,1966), la Rivière-du-Loup (Cartier & Leclerc,1966c), la Chaudière (Dionne & al.,1953), la Sainte-Anne-de-la-Pérade (Leclerc & Cartier, 1951), la rivière Saint-François (Boucher & al., 1952,1953,1966; Cartier & Leclerc, 1965b) et la rivière Bécancour (Slivitzky & al., 1962). Un examen plus détaillé permettrait certainement un dénombrement plus exhaustif des inondations au Québec et de leurs impacts sur la population et l'économie.

Figure 5.2- Accumulation des hauteurs de pluie (mm) pour une période de 72 heures, de 08 HAE le 18 juillet à 08 HAE le 21 juillet, 1996



5.2. Sécheresse

La sécheresse n'est pas considérée, au Québec, comme un risque majeur. Cependant, les épisodes prolongés (10 jours et plus) sans précipitations significatives sont assez fréquents pour que plusieurs secteurs d'activité puissent en être affectés. On peut mentionner :

- la baisse du rendement des cultures;
- les répercussions sur certaines activités récréatives ainsi que sur la navigation commerciale et de plaisance;
- la production d'hydro-électricité;
- la santé de la faune et de la flore ainsi que la recrudescence des feux de forêt;
- l'approvisionnement en eau potable et l'impact sur les nappes phréatiques;
- l'impact d'un manque d'eau dans la capacité des cours d'eau importants (tels le Saint-Laurent) de diluer les polluants;
- les problèmes d'irrigation et d'arrosage.

Lorsqu'il s'agit de déterminer l'occurrence ou non d'une période de sécheresse, on se heurte rapidement aux disparités spatiales et temporelles liées aux systèmes météorologiques responsables de la précipitation (nature convective ou stratiforme), au

réseau d'observation disponible (nombre de stations météorologiques, couverture radar), à la saison considérée (été ou hiver), au régime thermique associé avec l'épisode de sécheresse et finalement à la sensibilité du secteur ou de l'activité à ce manque temporaire en eau.

C'est pourquoi la littérature pullule de références qui ont tenté de définir, de façon stricte et rigoureuse, ce qu'est une « période de sécheresse » (Barger & Thom,1949; Briffa & al.,1994; Karl & al.,1996; Karl,1986; Lanzante,1996; Lewis & MacSwain,1996; Lough,1997; Palmer,1965; Ravelo & Decker,1979; Storch & Navarra, 1995).

Lacroix & Boivin (1992) ont étudié le phénomène de sécheresse au Québec, en termes de fréquence et de répercussions, en partant de la définition d'une sécheresse comme étant une période de 10 jours consécutifs sans précipitation. Ils notent que les épisodes de sécheresse affectent surtout la région arctique et l'extrême sud-ouest de la province et que les cas les plus sévères (plus de 15 jours sans précipitations) se produisent principalement en mai et juin. Les impacts des sécheresses se font particulièrement sentir au niveau d'une baisse de rendement des cultures, de risques accrus de feux de forêt et, pour plusieurs municipalités, d'une obligation d'imposer à leurs citoyens des limites dans l'utilisation de l'eau (e.g. système de rotation pour pouvoir faire la lessive ou laver sa voiture, interdiction d'arrosage des pelouses, etc...)

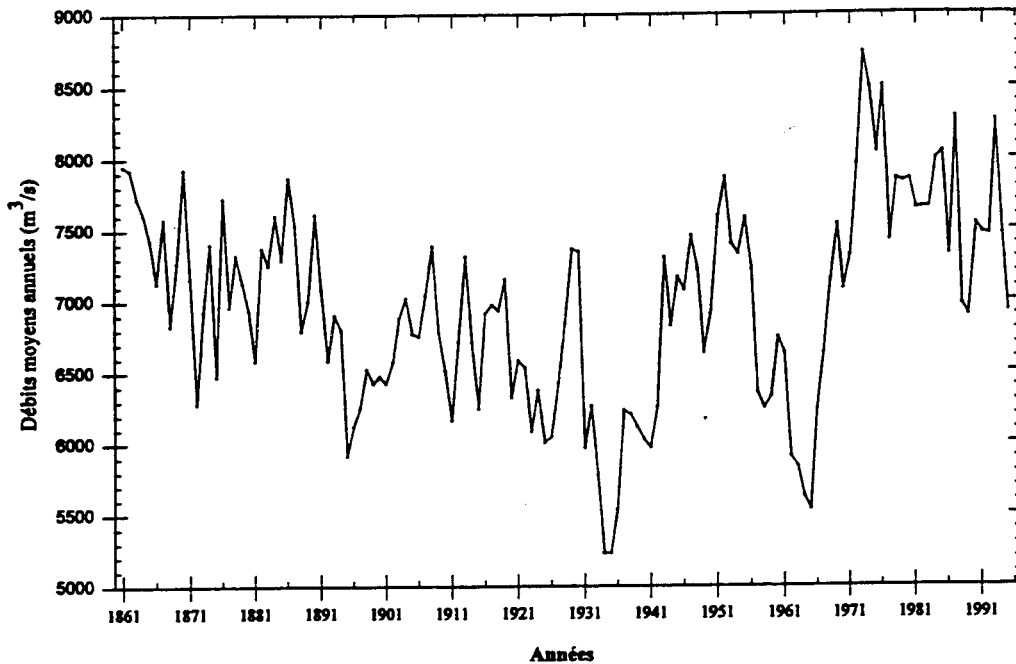
À notre connaissance, il n'existe pas d'études énumérant les périodes de sécheresse marquée au Québec et encore moins la gamme des répercussions liées spécifiquement à tel ou tel événement. Ainsi, le mois d'août le plus sec en archives dans la région de Montréal fut enregistré en 1957 avec moins de 1 mm de pluie observée (Phillips,1984) et, pourtant, il nous a été impossible de retracer les dommages que cet événement exceptionnel a pu causer. On remarque la même absence d'informations fiables concernant la sécheresse de l'été 1947 dans les régions de Montréal et de Québec, durant laquelle il est tombé moins de 1 mm de pluie en 21 jours, soit du 28 juillet au 18 août 1947 (Environnement Canada, 1990b) et qui est, par ailleurs, encore très loin du record canadien appartenant à la région de Calgary avec 71 jours consécutifs sans précipitation significative en 1885.

La majorité des références faisant mention d'événements de sécheresse et de manque d'eau sont liées aux faibles niveaux d'eau dans le Saint-Laurent et à leurs répercussions. Ceci ne signifie point que d'autres régions de la province ne souffrent pas de sécheresses prolongées. Le potentiel hydro-électrique tiré des grands réservoirs du Nord québécois y est fortement influencé.

Le comportement des fluctuations des débits d'eau sur le fleuve Saint-Laurent a beaucoup changé depuis le début du XXIème siècle (figure 5.3). Bien que les fluctuations des niveaux d'eau aient beaucoup changé depuis 1964 (figure 5.4), il est possible de constater l'existence d'un cycle de bas et de haut niveau des eaux dont la période est d'environ trente ans (Labrecque,1994).

Les années extrêmes de bas niveau d'eau correspondent aux périodes entre 1934 et 1937, 1964 et 1966 ainsi qu'en 1995.

Figure 5.3 - Variations des débits moyens annuels du Saint-Laurent à Cornwall (1861-1995)

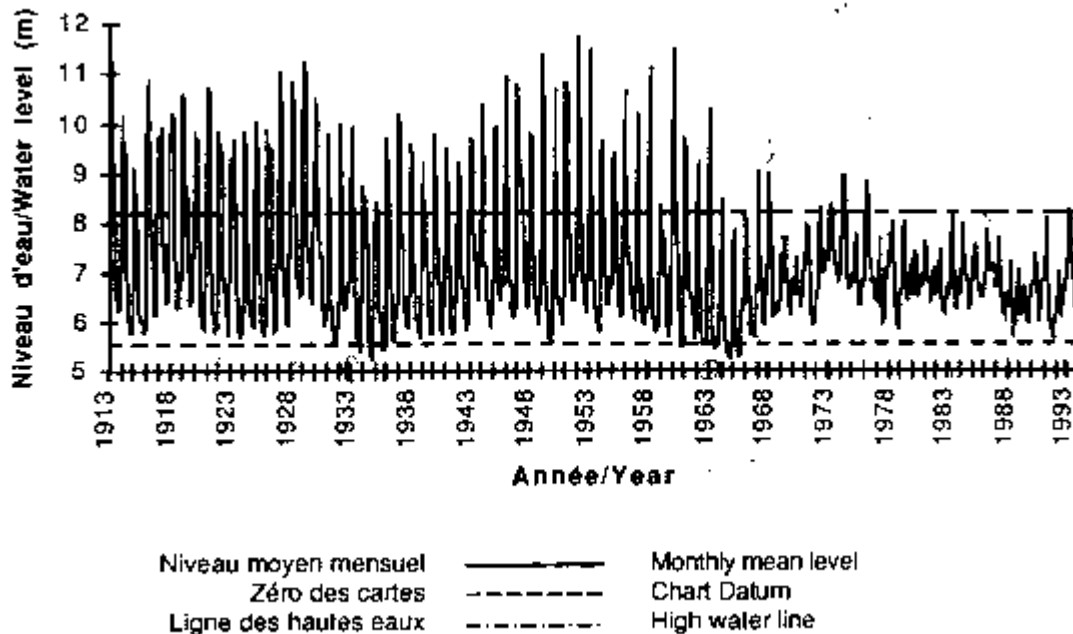


Source : Banque de données HYDAT adapté par Slivitzky (comm. pers)

En 1995, les niveaux d'eau sur le fleuve Saint-Laurent se sont maintenus exceptionnellement bas durant le printemps et tout au long de la saison estivale. Le Service hydrographique du Canada rapporte que les mesures à la station limnimétrique au Port de Montréal ont été les plus basses depuis 1967 (Service Hydrographique du Canada, Bulletin mensuel, juillet 1996). Le niveau des eaux au Port de Montréal a été inférieur au zéro des cartes pendant 4 jours en juillet 1995 (Environnement Canada, 1995b).

Cette situation a eu des conséquences néfastes sur la navigation commerciale et l'écosystème du fleuve. Au printemps, les habitudes de la faune ont donc été fortement modifiées en ce qui a trait aux lieux et aux périodes de reproduction dans les milieux d'eau lente comme dans les milieux d'eau vive (Dumont & Léveillé, 1995). Si une telle situation devait durer plusieurs années, les impacts pourraient être majeurs, notamment en ce qui a trait à la qualité de l'eau, l'assèchement des marais, l'aménagement faunique réalisé récemment pour compenser la perte des milieux humides.

Figure 5.4 - Fluctuations des débits d'eau au Port de Montréal depuis le XXIème siècle



Les bas niveaux d'eau extrêmes de l'été 1995 ont affecté la répartition de la végétation aquatique. Hudon (1997) rapporte que cette baisse du niveau des eaux a réduit considérablement la surface disponible pour la croissance des plantes submergées. L'examen par Hudon (1997) des zones habituellement colonisées par la végétation submergée a permis, pour l'été 1995, d'estimer une perte d'environ 22 % uniquement pour le tronçon fluvial. Selon la morphologie des rives, la perte de la végétation submergée peut varier entre 0 et 77 %.

En période de temps sec et prolongé, le risque d'occurrence de feux de forêt augmente significativement affectant une ressource, la forêt, abritant une biodiversité diversifiée et ayant une valeur économique stratégique pour le Québec. Les feux de forêt ont depuis toujours fait partie de l'histoire du Québec. Ceux de l'été 1991 ont tenu en alerte la population de plusieurs municipalités et réserves indiennes de la Côte-Nord, entre Les Escoumins et Sept-Iles et ont forcé l'évacuation de plus de 3 000 personnes pendant une dizaine de jours réduisant même la visibilité sur la route 138 entre Tadoussac et Godbout. La fin d'août 1995 fut également marqué par des feux faisant rage dans le centre du Québec et causant une dispersion de la fumée et des particules sur tout l'est de la province (Environnement Canada, 1996a).

Au Québec, selon les données de la SOPFEU (Société pour la protection des feux de forêt) synthétisées au tableau 5.5, il y a environ 1 000 feux annuellement avec une superficie moyenne de forêts affectée par ces feux variant entre 10 et 110 ha. Aucune tendance significative ne peut être décelée dans le nombre total de feux d'origine humaine ou naturelle. La proportion des feux de forêt au Québec déclenchés par des causes naturelles (essentiellement la foudre) a graduellement augmentée dans les 50 dernières années passant de 5 % en 1940 à plus de 35 % dans les années 90. Cette statistique peut être cependant trompeuse considérant que les détecteurs de foudre ne sont utilisés systématiquement par les agences forestières que depuis peu d'années.

Les saisons 1983 et 1991 sont grandement responsables des sommes importantes consacrées à la lutte des incendies de forêts avec respectivement 11,8 et 22,1 millions de dollars. Peu d'informations existent sur la valeur commerciale des forêts touchées par les feux.

Tableau 5.5 - Évolution des feux de forêt au Québec entre 1922 et 1996

	1922 à 1931	1932 à 1941	1942 à 1951	1952 à 1961	1962 à 1971	1972 à 1981	1982 à 1991	1992 à 1996
Nombre total de feux	7493	11564	11261	8547	10011	10488	10491	3969
% des feux causés par la foudre	6,0%	4,8%	9,9%	16,1%	24,5%	17,5%	21,9%	35,2%
Nombre total d'hectares affectés	578057*	1 076 794	701 831	835 778	336 341*	124 801	852 202	442 530
% d'hectares affectés par la foudre	16,8%	8,8%	4,0%	24,5%	42,5%*	46,3%	90,0%	70,8%
Superficie moyenne (en ha) affectée par un feu	85 ha	93 ha	62 ha	98 ha	42 ha*	12 ha	81 ha	111 ha
Coût total pour éteindre les feux (en millions de dollars)	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	17,6 M	71,8 M	11,9 M
Coût moyen par feu	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	1 680\$	6 843\$	6 977\$

* : le nombre d'hectares pour les années 1967 et 1968 ne sont pas disponibles

** : les données de coûts ne sont disponibles que pour les années 1992 et 1993

Source de données: Service d'informations - SOPFEU (1997)

L'éclosion d'un incendie nécessite la présence de causes ou d'agents capables de générer un feu et d'un degré suffisant d'inflammabilité de la forêt. La façon dont le feu se propagera ou se développera dépend du type de forêt, de la topographie et des conditions météorologiques. Van Wagner (1987), du Service canadien des forêts, a développé un indice en un point donné appelé "*indice forêt-météo*" tenant compte des indices des combustibles léger (état de la litière) et disponible (matériel à brûler) ainsi que la capacité de propagation du feu par le vent. Pouliot (1991) a adapté cet indice pour les forêts du Québec tout en examinant la sensibilité respective des divers paramètres à l'intensité et le développement d'un feu.

Pour tenir compte de la localisation et de la représentativité des stations d'observation utilisées pour le calcul des différents indices, Van Wagner (1970) utilisa la notion de "gravité de feux" permettant ainsi de passer d'une échelle locale à une échelle régionale. Environnement Canada (1987d) donne la gravité entre 1977 et 1986 cumulant les gravités quotidiennes entre le 1^{er} mai et le 31 août de chaque année et ce, pour l'ensemble des sociétés de conservation forestière du Québec. Grâce aux informations météorologiques fournies par Poirier (1997, comm. pers.) du Bureau des Services Météorologiques et Environnementaux de Québec, le tableau 5.6 met, de façon évidente, la gravité quotidienne moyenne (et non cumulative) et diverses statistiques forestières (nombre de feux, d'hectares affectés, coût pour éteindre les feux) et ce, de 1978 à 1991. On y remarque l'anormalité des saisons 1983 et 1991 (gravité respectivement de 1,77 et 1,82) ainsi que la très bonne corrélation existant entre cet indicateur et le nombre de feux (79,9 %), le nombre d'hectares affectés (72,8 %) et le coût pour éteindre les feux (86,1 %). Ce type de statistiques saisonnières et provinciales de l'évolution de la gravité des feux déterminée à partir des indices forêt-météo n'est cependant plus disponible.

Tableau 5.6 - La gravité moyenne des feux au Québec entre 1978 et 1991 établie à partir des indices forêt-météo

	Nombre de feux	Nombre d'hectares	Coût pour éteindre les feux	Gravité moyenne de feux
1978	1 160	3 672	1 991 618 \$	1,11
1979	615	3 200	940 949 \$	0,79
1980	861	13 177	1 869 115 \$	0,75
1981	1 114	2 480	2 369 282 \$	1,10
1982	1 202	7 970	3 249 018 \$	1,04
1983	1 653	238 903	11 803 496 \$	1,77
1984	683	3 082	1 099 679 \$	0,53
1985	880	2 697	1 831 088 \$	0,81
1986	830	167 550	5 091 307 \$	0,86
1987	959	20 935	3 765 557 \$	0,74
1988	1 266	7 143	8 345 678 \$	1,34
1989	1 064	6 497	7 128 433 \$	1,11
1990	798	16 064	7 384 437 \$	1,09
1991	1 156	379 892	22 093 464 \$	1,82
Gravité moyenne pour la période 1978 à 1991				1,06
Caractéristiques de la saison de feux de forêt				
gravité < 0,75 : bien au-dessous de la moyenne				
gravité de 0,75 à 0,89 : sous la moyenne				
gravité de 0,90 à 1,14 : près de la moyenne				
gravité de 1,15 à 1,39 : au-dessus de la moyenne				
gravité > 1,40 : bien au-dessus de la moyenne				
Tiré de: Environnement Canada (1987d), Pouliot (1991), données de SOPFEU (1997) et de Poirier (1997)				

5.3 Vagues de chaleur et de froid intense

Au Québec, les températures atteignent parfois des valeurs extrêmes qui peuvent persister plusieurs jours et avoir des répercussions dramatiques sur des portions importantes de la population, des écosystèmes et des activités économiques et sociales.

5.3.1. Vagues de chaleur

Thomas (1971) souligne l'été exceptionnel de 1955 dans le sud du Québec avec un record mensuel pour la température moyenne en juillet de 23,8 °C (Environnement Canada, 1987c) ce qui, d'après Dubé (1967), n'avait pas été vu depuis 1730 et 1775 (source anonyme). Occasionnellement, la saison estivale est parsemée de périodes de chaleur anormale, des « canicules », dont la fréquence et la durée varient selon les endroits et d'année en année. Approximativement 7 personnes sont décédées des suites de chaleur excessive pour la même période au Canada en 1965 et 1987 (Environnement Canada, 1990a).

Il n'existe pas de définition précise pour une vague de chaleur mais certains seuils critiques peuvent être considérés dans l'analyse de la fréquence et de la durée de ces phénomènes au Québec. Ainsi, deux (2) approches sont fréquemment utilisées pour identifier et détecter une « vague de chaleur » :

Durée au-dessus d'une température seuil :

La plupart des études spécifiques au Québec ont utilisé soit :

- a) *le nombre de jours consécutifs avec une température quotidienne maximale supérieure à 30 °C* (Environnement Canada, 1987c). À titre d'exemple, Montréal enregistra 8 jours consécutifs avec des maximums supérieurs à 30 °C à la fin de juillet 1970 (du 23 au 30) alors qu'en moyenne dans un été, on observe 2 à 4 jours où ce seuil critique est dépassé ;
- b) *le nombre de jours consécutifs où la température maximale quotidienne dépasse la valeur correspondant au percentile 90* (Powe, 1969) ;
- c) *le nombre d'heures consécutives où la température de l'air dépasse 30 °C*. De fait, Boivin et Lacroix (1989) ont défini une vague de chaleur comme les épisodes ayant au moins 6 heures consécutives avec 30 °C pendant au moins 2 jours de suite. Examinant les données horaires de température à 26 stations au Québec entre 1958 et 1987, ils vinrent aux conclusions suivantes ;

- le Québec subit l'influence de deux types de vagues de chaleur :
 - les vagues de chaleur locales affectent surtout l'extrême sud de la province au moins *une* fois par été, ne durent jamais plus qu'*une* journée même si le nombre d'heures consécutives où la température dépasse les 30 °C peut atteindre 9 heures (entre 10h et 20h) en certaines occasions ;
 - les vagues de chaleur généralisées se prolongent de 2 à 4 jours et affectent presque toutes les régions au sud du 55^e parallèle selon une intensité variable qui s'accroît dans les secteurs plus au sud. Ces canicules généralisées se produisent habituellement à tous les 5 ans.
- les secteurs au nord du 50^e parallèle peuvent être l'objet de 1 à 2 vagues de chaleur à tous les 30 ans. Entre le 48^e et le 50^e parallèle, on peut s'attendre à 1 ou 2 vagues de chaleur par 2 ans alors que l'extrême sud de la province (régions de Montréal et de l'Outaouais) subit 2 à 3 canicules par été.

Durée au-dessus d'une valeur d'humidex seuil :

L'autre critère utilisé dans la littérature pour déterminer des vagues de chaleur dite « accablante » est de combiner la température élevée avec le taux d'humidité présent dans l'atmosphère (Masterton & Richardson,1979 ; Quayle & Doehring,1981; Environnement Canada,1985; Boivin & Lacroix, 1989). On définit alors le « facteur humidex » qui constitue la base même employée pour calculer le nombre de vagues de chaleur accablante dans une saison estivale (tableau 5.7).

Tableau 5.7 - Valeur du facteur humidex en fonction de température de l'air et de l'humidité relative

<u>Température (°C)</u>	<u>Humidité relative (en pourcentage)</u>				
	100%	90%	80%	70%	60%
35	61	57	54	51	48
30	48	46	43	41	38
25	37	35	33	32	30

Un « facteur humidex » de :

20-29	donne des conditions confortables
30-39	cause des degrés variables d'inconfort
40-45	fait en sorte que la grande majorité de la population est affectée
46 et plus	exige que plusieurs types de travaux soient limités

(Adapté de Boivin et Lacroix 1989 ; Environnement Canada 1985a)

Bien que plusieurs endroits au Québec puissent expérimenter, de façon sporadique et irrégulière, une journée avec un indice humidex dépassant 40 (e.g. à Montréal, environ 2 à 3 fois par année selon Environnement Canada (1987c)), la fréquence d'occurrence d'une vague de chaleur accablante durant laquelle l'humidex est de 40 ou plus pendant au moins 6 heures consécutives et pour au moins 2 jours vont de (Boivin & Lacroix,1989) :

- *1 fois tous les 30 ans* pour le bas Saint-Laurent, la Gaspésie et les Laurentides ;
- *1 fois aux 10 à 15 ans* pour le Saguenay, le lac Saint-Jean, l'Estrie et l'Abitibi ;
- *1 fois aux 3 ou 4 ans* pour la région de Québec et finalement
- *1 fois aux 2 ans* pour l'extrême-sud du Québec (régions de Montréal et de l'Outaouais).

Ces statistiques ont été déterminées par Boivin et Lacroix (1989) à partir de l'analyse des données à 26 stations météorologiques du Québec entre 1958 et 1987. Un humidex de 46 est très rarement atteint au Québec. Selon Boivin et Lacroix (1989), le facteur humidex a atteint ou dépassé 46 dans le sud du Québec pour une période de 2 à 5 heures en 30 ans.

Il ne faut pas perdre de vue que la très grande majorité des stations considérées dans une telle analyse de l'occurrence des vagues de chaleur sont situées dans

des zones rurales ou semi-urbaines. Par sa capacité de stockage de la chaleur diurne dans les rues et dans les édifices des villes et la diminution de pertes énergétiques bloquées par la pollution urbaine, le phénomène de l'îlot urbain décrit par Thomas (1971) et Leduc & al. (1980) exacerbe définitivement l'occurrence de vagues de chaleur dans les centres-villes des municipalités importantes du Québec.

En matière de risques associés aux vagues de chaleur, il est important de souligner le risque pour la santé humaine. La déshydratation, l'insolation, les coups de chaleur, les problèmes cardiaques et respiratoires, les fièvres et colliques néphrétiques sont les pathologies les plus fréquentes lors de tels événements. Dans le but d'estimer la sensibilité réelle de la population de la région de Québec à des vagues de chaleur accablante, Boivin & Lacroix (1989) ont examiné les symptômes et diagnostics des patients de l'hôpital Enfant-Jésus de Québec pour les journées des 4 et 5 juillet 1983 avec des humidex se maintenant entre 40 et 44 pendant plus de 10 heures consécutives.

Les résultats de cette recherche montre qu'aucune différence significative n'a été détectée. Les auteurs soupçonnent qu'une vague de chaleur accablante doit probablement durer plus longtemps avec des humidex élevés pour observer une hausse substantielle des pathologies liées à la chaleur. Le cas de juillet 1987 en Grèce où des températures de 40 °C se sont maintenus pendant 2 semaines consécutives sont des exemples extrêmes mais possiblement représentatifs du type de circonstances météorologiques requises pour sentir un effet général sur la population (Boivin & Lacroix,1989). Un certain nombre d'auteurs américains ont tenté de corréliser les vagues de chaleur dans de grandes villes des Etats-Unis avec la hausse de la criminalité durant ces épisodes. Ceci demeure une piste future à explorer.

Il est important de mentionner également, à ce point-ci, les conséquences particulièrement sévères d'une vague de chaleur hivernale ($T > 10$ °C) entraînant un dégel important en plein hiver. Non seulement, ces événements ont des conséquences parfois immédiates sur la fréquence des inondations et la formation d'embâcles (surtout s'ils sont accompagnés de pluies abondantes), mais peuvent induire un processus de retour printanier trop hâtif et extrêmement dommageable pour les écosystèmes.

Ainsi, le dégel de février 1981 sur le sud du Québec restera pour longtemps dans la mémoire collective des agriculteurs (Environnement Canada, 1987a) et des forestiers (Robitaille,1982). En effet, durant cette période, on observa des températures quotidiennes maximales se maintenant entre 10 et 18 °C pendant plusieurs jours (Lacroix,1981). Bien qu'exceptionnelle, cette situation météorologique avait déjà été observée dans le passé en janvier 1876 (Environnement Canada, 1989) avec des températures dépassant les 15 °C sur le sud du Québec.

5.3.2. Vagues de froid intense

Avec son climat si changeant, le Québec vit régulièrement des chutes draconiennes de température au cours de la saison hivernale, caractéristiques des systèmes météorologiques intenses qui frappent constamment la région. Des variations de l'ordre de 25 à 30 °C en 6 à 12 heures ne sont pas des événements rares à chaque hiver au Québec et sont responsables d'une multitude d'ennuis liés au gel subit de pièces et de mécanismes devenant inopérants face à un changement si brutal de la température. L'histoire du Québec a enregistré des hivers de froid intense mémorables. La période extrêmement froide de décembre 1835 semble avoir été responsable d'un nombre très important d'incendies à Montréal (Environnement Canada,1996). Ces situations glaciales ont souvent résulté en la formation de "*glace noire*", ennemi mortel des automobilistes et des véhicules circulant sur les routes du Québec. Les cas du 5 mars 1987 (Environnement Canada,1989) et du 6 janvier 1996 (Environnement Canada,1996) dans la région de Montréal constituent des exemples frappants de ce phénomène.

Entre 1965 et 1987, 110 personnes en moyenne sont mortes directement ou indirectement au Canada suite à un froid excessif allant d'un minimum de 1 en 1967 à un maximum de 158 en 1971 (Environnement Canada, 1990a).

Personne ne réagit au froid de la même façon et nos réactions varient selon une multitude de paramètres physiques et culturels (Currie,1951 ; Terjung,1966). Pour préserver son intégrité, le corps humain doit maintenir une température constante d'environ 37 °C. Dans une mince couche d'air au-dessus de la surface de la peau, un équilibre thermique s'établit entre l'air extérieur et le corps humain. Le vent perturbe cet équilibre en déplaçant l'air et le taux de renouvellement de l'air dans cette couche est proportionnel à la force du vent. On appelle « *refroidissement éolien ou facteur de froideur du vent* » la perte de chaleur causée par la combinaison du vent et de la température.

Le « facteur de refroidissement éolien », développé par Siple & Passel (1945) en Antarctique et enrichi par les travaux de Steadman (1971), peut être simple (en ne tenant compte que du vent et de la température de l'air) ou complexe (en intégrant, en plus, la portion couverte par les vêtements, la résistance thermique du vêtement, l'activité de l'individu, son rythme respiratoire, l'humidité de l'air et le rayonnement). Le tableau 5.8 donne les diverses classes du facteur de refroidissement éolien pour le Québec et la perception de froid ressentie par la population affectée.

Tableau 5.8 - Perception de froid ressentie en fonction du facteur de refroidissement éolien

<u>Valeur du facteur de refroidissement éolien</u> <u>(en W/m²)</u>	<u>Sensation</u>
moins de 1 200	Agréable
1200 à 1399	Désagréable par temps couvert
1400 à 1599	Désagréable en tout temps
1600 à 2250	Gel possible de la peau exposée
2250 et plus	Gel en 1 minute

Note : la réaction du corps peut varier en fonction des différences culturelles et démographiques. De plus, un avertissement de froid intense est émis par Environnement Canada si le facteur de refroidissement éolien est prévu persister pendant au moins 6 heures au-dessus de 2 250 Watts par mètre carré.

Dans leur étude sur le refroidissement éolien au Québec, Brière & al. (1991) montrèrent qu'entre 1976 et 1990, le critère de refroidissement éolien de 2 250 W/m² pendant 6 heures consécutives était dépassé en moyenne 1 à 5 fois par an sur le sud du Québec. Pour les régions situées au nord du 52^e parallèle, la fréquence annuelle de dépassement se situe entre 10 et 50 cas selon les secteurs. Pour leur part, Lacroix & Boivin (1990), en examinant les données horaires de température à 17 stations au sud du 50^e parallèle, pour la période entre 1958 et 1987, ont trouvé que des vagues de froid intense, où le critère de refroidissement éolien atteint 2 300 W/m² pendant au moins 6 heures consécutives, pouvaient se produire une fois aux deux ans, pour les stations les plus affectées et, essentiellement en janvier et février. Pour des périodes de froid intense d'au moins 18 heures consécutives, ils notent que seules les stations entre les 48^e et 50^e parallèles sont affectées et, pour les plus vulnérables, en moyenne une fois aux dix ans.

Mais est-ce que la population du Québec est adaptée aux vagues de froid intense qui l'assaillent ? À notre connaissance, la seule étude qui relie engelures et autres météopathologies directement ou indirectement à ce type de phénomènes climatiques extrêmes est celle de Boivin & Lacroix (1992). Ces auteurs ont examiné les admissions aux cliniques externes et aux urgences des deux hôpitaux de La Baie et Chicoutimi, pour la période du 11 au 15 février 1987, alors que la région du Saguenay subissait une vague de froid où le critère de refroidissement éolien dépassait la valeur de 1 900 W/m² pour au moins 18 heures consécutives et, ceci pour chacun des cinq jours de la période considérée. Ils ont noté qu'aucun cas d'engelure ou d'hypothermie n'a été rapporté pour cette période. Ils concluent que: soit les valeurs retenues pour définir une vague de froid ne sont pas assez élevées, soit que la population en général a développé un sens critique qui pousse les individus à se mettre à l'abri

lors de tels événements ou à adopter des mesures préventives appropriées (vêtements plus chauds, utilisation de taxis ou véhicules privés plutôt que le transport en commun ou la marche). Ils notent finalement que, dans des centres urbains majeurs comme Montréal, où l'on dénombre plusieurs clochards et sans-abris, la même analyse pourrait en arriver à des résultats différents.

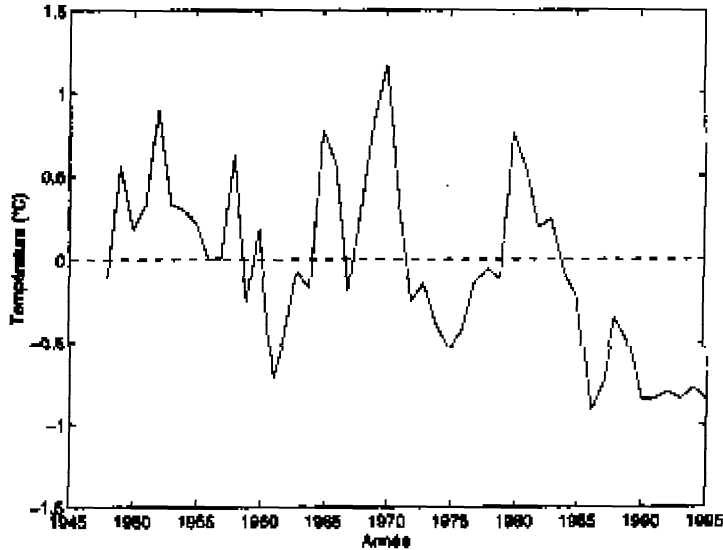
Dans son rapport sur l'importance des îlots urbains dans les villes canadiennes, Thomas (1971) mentionne l'anormalité extrême de l'hiver 1956-57 tout en passant sous silence l'ampleur de ses répercussions. Il prend cependant soin de souligner le rôle tamponisateur des centres-villes dans leur capacité à amoindrir quelque peu, par l'effet de l'îlot urbain, les impacts négatifs du froid intense.

L'occurrence de vagues de froid intense ne se fait pas sentir seulement sur la population du Québec. Les écosystèmes montrent des signes évidents de sensibilité à des températures extrêmes en hiver. Allard & al. (1995) donnent l'exemple de l'été 1992, plus froid que d'habitude dans la région de la baie d'Ungava et qui fut immédiatement suivi par un hiver (1992-93) considéré comme exceptionnellement froid. Les auteurs montrèrent que la baisse dans la température annuelle moyenne de l'air et au sol sont plutôt sensibles à des hivers longs et froids qu'à un refroidissement constant au tout au long de l'année.

Un autre exemple est celui de l'été et de l'automne 1993 et 1994, durant lesquels des mortalités de sébastes furent observées à plusieurs reprises, entre autres, dans la baie des Ha! Ha!, située dans la partie amont du fjord du Saguenay. En 1993, en date du 1^{er} et du 10 juillet ainsi que du 16 septembre, plus de 1 000 individus flottent à la surface. En 1994, des sébastes morts sont de nouveau retrouvés à deux reprises dans la baie de Ha! Ha! (en septembre et en octobre) ainsi que les 22 et 23 août, dans la région de l'Anse à la Croix (Gilbert, 1996). Les caractéristiques hydrodynamiques du fjord du Saguenay et la variabilité interannuelle du climat au Québec indiquent que, parmi les différents stress physico-chimiques possibles, un choc thermique lié aux températures froides serait l'hypothèse la plus plausible pour expliquer les mortalités de sébastes (Gilbert, 1996). Les conditions climatiques observées dans le golfe du Saint-Laurent révèlent, en effet, que les hivers de 1993 et 1994 (figure 5.5) ont été parmi les plus froids au cours des 30 dernières années (Gilbert & Couillard, 1996).

Comme le montre la figure 5.5, les six années allant de 1990 à 1995 comptent parmi les plus froides de toute la période d'étude (1948-1995) selon Gilbert & Pettigrew (1996). Selon l'opinion de certains scientifiques, ces conditions anormalement froides de la *couche intermédiaire froide* auraient pu contribuer à l'effondrement des stocks commerciaux de morue et à la détérioration de la condition physiologique des morues adultes vers le début des années 1990.

Figure 5.5 - Déviation par rapport à la moyenne 1948-1995 de la température du coeur de la couche froide intermédiaire du golfe du Saint-Laurent



Source : Gilbert & Pettigrew (1996)

Un autre exemple de répercussions liées aux extrêmes de température est dénoté dans une étude interne du Centre Météorologique du Québec (CMQ,1983), qui indique que les principaux facteurs affectant la mortalité généralisée des pommiers sont directement liés à un hiver précédent très froid suivi en février de températures chaudes et de précipitations.

Ainsi, le taux de mortalité des pommiers observée dans les vergers au printemps de 1981 a atteint 15 % soit 239 563 arbres, une véritable catastrophe pour les pommiculteurs du Québec. Les quatre(4) autres années de forte mortalité enregistrée (1976, 1957, 1934 et 1918) sur le sud-ouest du Québec ont en commun, l'occurrence d'un froid intense dans l'hiver précédant la floraison. Ce froid significatif, peu importe s'il arrive en décembre, en janvier ou même en février, doit persister même durant le jour (CMQ,1983) avec des températures moyennes inférieures au seuil de -22 °C suivi d'un mois de février favorisant un dégel.

5.4. Tempêtes hivernales

Une tempête hivernale majeure est définie ici comme un événement météorologique de forte intensité pouvant résulter en une chute de neige importante, du verglas persistant sur plusieurs heures ou de la neige et des forts vents menant à de la poudrière généralisée et la formation de congères.

La première chute de neige de la saison provoque souvent de sérieux incidents à la circulation routière, des blessures et même des pertes de vie. Des exemples : le 24 octobre 1933 entre Ottawa et Montréal (Environnement Canada, 1987a), le 17 novembre 1984 à Québec avec un carambolage de 30 voitures sur le pont Pierre-Laporte (Environnement Canada, 1990b), le 4 novembre 1986 à Montréal (Environnement Canada, 1988). On ne trouve pas la même ampleur des impacts lors de la dernière tempête de la saison se produisant en avril ou même en mai comme ce fut le cas le 4 mai 1907 à Ottawa (Phillips,1984) ou le 10 mai 1963 à Montréal (Environnement Canada,1987a).

Dans son étude sur les tempêtes de neige frappant la région de Québec entre 1965 et 1975, Plamondon (1979,1990) les classa en 7 catégories distinctes tenant compte de la durée de la chute de neige, de la quantité de neige tombée, des températures accompagnant la température et la vitesse des vents associée (tableau 5.9). La tempête moyenne à Québec dure près de 23 heures, laissant 19 cm de neige tombés à une intensité de 0,91 cm/h avec un vent soufflant du nord-est entre 24 et 37 km/h et des températures avoisinant les -5 °C.

Tableau 5.9 - Catégories de tempêtes à Québec (1965-1975)

<u>Catégorie de tempête</u>	<u>Durée de la tempête (en heures)</u>	<u>Chute de neige totale (cm)</u>	<u>Intensité moyenne de la chute de neige (cm/h)</u>	<u>Vents (km/h)</u>	<u>Températures de l'air (°C)</u>
I	20,5	14,8	0,76	11,6	-6,1
II	24,1	17,4	0,76	30,6	-9,6
III	17,2	12,8	0,80	20,9	-1,2
IV	23,2	20,3	0,88	25,9	-3,9
V	11,8	17,8	1,52	28,3	-4,5
VI	22,5	30,7	1,39	33,5	-4,9
VII	49,1	39,3	0,84	26,8	-7,3

Source : Plamondon (1979,1990)

Lacroix & Boivin (1991a), pour leur part, ont étudié le phénomène des tempêtes de neige pour 23 stations au Québec et les ont classé en trois catégories: les tempêtes de neige de 20 cm et plus, les tempêtes de poudrierie (15 cm de neige et plus en 24 heures, accompagné de vents d'au moins 40 km/h) et les tempêtes de blizzard⁵. Ils notent que les stations cotières du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent ainsi que celles de l'ouest du Nouveau-Québec sont les plus touchées par les tempêtes de neige et que le nombre de tempêtes, pour le sud du Québec, augmente de l'ouest vers l'est. Ces tempêtes se produisent en plus forte proportion en décembre pour la majorité des stations.

En ce qui a trait aux tempêtes de poudrierie, Lacroix & Boivin (1991a) notent que ce phénomène se retrouve essentiellement au sud du 50^e parallèle et principalement dans les axes du Saint-Laurent et du Saguenay. La fréquence moyenne annuelle de telles tempêtes varie considérablement selon les secteurs et peut atteindre, pour les stations les plus affectées, 2 à 3 épisodes par année. Par ailleurs, les tempêtes de blizzard sont rares (en moyenne une aux 7 ans pour les stations les plus vulnérables) et frappent essentiellement l'axe du Saint-Laurent, de Montréal à Sept-Iles, ainsi que l'axe du Saguenay.

L'annexe B donne une liste incomplète et non-exhaustive (à partir des informations partielles disponibles) des tempêtes hivernales majeures ayant frappé le Québec particulièrement au cours des 125 dernières années. Le tout est résumé au tableau 5.10 et démontre, sans doute possible, qu'un travail immense de documentation de ces tempêtes hivernales reste à faire. Les tempêtes hivernales les plus documentées sont celles dans lesquelles le verglas constitue le paramètre principal (25 février 1961, 23 mars 1972, 13 décembre 1983, 24 décembre 1986).

Il est très surprenant de constater qu'il est beaucoup plus facile d'obtenir de l'information détaillée (décès, dommages, zones affectées) et historique relativement à des inondations (tableau 5.1) ou à des tornades (tableau 5.13) que sur les tempêtes hivernales. Les raisons de cet état de fait demeurent obscures: peut-être que les tempêtes hivernales font partie du climat saisonnier du Québec et qu'il ne semble pas urgent de clarifier davantage l'ampleur de leurs répercussions (tableau 5.10) :

⁵ poudrierie accompagné d'un facteur de refroidissement éolien d'au moins 1 900 W/m²

Tableau 5.10 - Liste préliminaire des tempêtes hivernales majeures au Québec des 125 dernières années et leurs répercussions

<u>Période</u>	<u>Nombre de tempêtes hivernales</u>	<u>Nombre minimal de pertes de vie et personnes affectées</u>	<u>Estimé minimal des dommages matériels (en millions de dollars)</u>
Avant 1900	7	N/D	N/D
1900-1909	2	N/D	N/D
1910-1939	N/D	N/D	N/D
1940-1949	2	N/D	N/D
1950-1959	N/D	N/D	N/D
1960-1969	5	15 morts	plus de 7,0 million (1961\$)
1970-1979	6	60 000 personnes touchées	plus de 1,5 million (1972\$)
1980-1989	42	28 morts - 124 blessés entre 0,5 et 1,0 million de personnes touchées	plusieurs millions de dollars (1988\$)
1990-1996	N/D	N/D	N/D
<i>TOTAL</i>	<i>N/D</i>	<i>au moins 43 morts et 124 blessés</i> <i>Un total de personnes affectées de l'ordre du million</i>	<i>Plusieurs dizaines de millions de dollars</i>

N.B. Vu la faiblesse de la banque de données disponibles, ces statistiques doivent être utilisées avec très grande prudence.

La sévérité des hivers québécois fait en sorte que des programmes d'entretien sont mis en place pour minimiser des pertes économiques plus importantes, pour prévenir des accidents fatals et éviter à la population d'être coupée des services. Que ce soit au niveau du déblaiement et de la disposition de la neige ou de l'utilisation de sels⁶ pour prévenir le dérapage dans les cas de verglas, il est surprenant de constater le nombre relativement faible d'études liant quantitativement l'occurrence des tempêtes hivernales et ses caractéristiques à l'ensemble des répercussions que celles-ci ont sur la société québécoise.

En Ontario, des auteurs ont développé des équations de régression pour synthétiser la corrélation existant entre l'entretien des routes en hiver et les paramètres météorologiques les plus importantes (McCoy,1993; McCabe,1995). À notre connaissance, de telles études équivalentes n'ont pas été faites dans un contexte québécois.

⁶ Samuels (1989) estima qu'environ 4 millions de tonnes de désalants sont utilisés chaque année au Canada par les autorités municipales et provinciales, chaque tonne coutant approximativement 35-40\$

5.5. Temps violent estival de nature convective : les tornades et la grêle

Autant le climat québécois est caractérisé par ses tempêtes hivernales, autant la sévérité occasionnelle des cellules orageuses typiques de la saison estivale peut surprendre. Non seulement ces orages de nature convective sont habituellement de diamètre plus restreint que les systèmes météorologiques intenses automnaux et hivernaux, mais ils sont plus variables dans le temps et l'espace, ce qui en rend la prévision et le suivi très difficiles. De plus, certains phénomènes d'origine convective peuvent parfois donner, de façon quasi-instantanée, de la grêle forte, des pluies abondantes (responsables de nombreuses crues désastreuses comme mentionné à la section 5.1 - inondations), des vents violents et des tornades.

Deaudelin (1993), Vaillancourt (1994,1997) et Lacroix (1997) ont élaboré la liste complète des événements météorologiques violents satisfaisant (considérés comme confirmés) ou s'approchant (considérés comme probables) des critères d'émission d'alertes météorologiques de temps violent⁷. Le tableau 5.11 montre qu'entre 1981 et 1996, il y a eu un total de 1 832 cas de temps violent confirmé au Québec, soit une moyenne annuelle de 115 événements violents. De ces 1 832 phénomènes violents, 499 (27,2 %) sont des cas de vents violents, 61 des tornades (3,3 %) et 324 de la grêle (17,7 %).

Le tableau 5.11 montre que l'année 1994 fut une année particulièrement propice à ce genre d'événements avec 224 épisodes de temps violent confirmés dont la majorité (102) sous forme de crues subites. Sur le territoire du Québec, la grande région de Montréal est la plus affectée par l'ensemble des phénomènes climatiques violents d'été (tableau 5.12), avec 16,6 % des événements recensés au Québec entre 1981 et 1996. L'Estrie et la Beauce viennent au 2^e rang des régions de la province particulièrement affectées par le temps violent estival.

⁷ 25 mm en 1 heure ; grêle de la grosseur d'un pois, tornades, vents violents pouvant atteindre 90 km/h

Tableau 5.11 - Liste des cas de temps violent au Québec entre 1981 et 1996

Année	Nombre de cas confirmés	Grêle	Vents violents	Crue subite	Pluie abondante	Tornade	Nombre de cas confirmés et probables
1981	115	23	8	2	80	2	N/D
1982	75	20	24	0	29	2	N/D
1983	85	15	32	5	31	4	N/D
1984	180	33	34	53	58	2	N/D
1985	53	14	9	7	20	3	N/D
1986	94	20	25	4	43	2	N/D
1987	71	17	26	8	15	5	N/D
1988	136	25	65	29	15	2	269
1989	97	22	35	20	19	1	149
1990	115	26	25	30	34	0	190
1991	168	35	64	50	13	6	300
1992	88	8	30	20	28	2	153
1993	127	22	32	50	17	6	298
1994	224	26	52	102	27	17	534
1995	120	8	23	68	19	2	270
1996	84	12	15	30	22	5	200
TOTAL	1832	324 <i>(17,7 %)</i>	499 <i>(27,2 %)</i>	478 <i>(26,1 %)</i>	470 <i>(25,7 %)</i>	61 <i>(3,3 %)</i>	3036
Moyenne annuelle	114,5	20,2	31,2	29,9	29,4	3,8	337,3 (1988-96)

Source: Lacroix (1997); Vaillancourt (1997)

Tableau 5.12 - Nombre total d'événements confirmés et probables* (entre parenthèses) de temps violent estival (grêle, vents violents, crue subite et pluie abondante, tornades au Québec par région pour la période 1981-1996

<u>Région</u>	<u>Nombre total d'événements</u>
Abitibi/Témiscamingue	132 (194)
Réservoir Cabonga/Gouin	44 (74)
Pontiac-Gatineau la Lièvre	115 (224)
Laurentides	122 (208)
Ottawa-Hull-Cornwall	114 (210)
Montréal	304 (473)
Trois-Rivières et Drummondville	174 (270)
Québec	117 (193)
Estrie -Beauce	184 (286)
Lac Saint-Jean	43 (73)
Saguenay	57 (85)
La Tuque	66 (131)
Réserve Faunique des Laurentides	40 (78)
Charlevoix-Rivière-du-Loup	50 (94)
Rimouski-Matapédia	47 (75)
Sainte-Anne-des-Monts	38 (57)
Gaspé/Parc de Forillon	25 (32)
Baie Comeau	17 (27)
Sept-Îles	24 (34)
Basse-Côte-Nord	18 (33)
Matagami	23 (43)
Chibougameau	40 (63)
Manicouagan-Gagnon	36 (65)
Côte nord de la baie des Chaleurs	<u>2 (14)**</u>
Total	1 832 (3 036)

*: Les statistiques sur le temps violent probable ne sont disponibles qu'à partir de 1988.
 **: Aucune statistique disponible avant 1994.

Source : Lacroix (1997), Vaillancourt (1997)

5.5.1. Les tornades

L'avènement des photos satellitaires et des radars météorologiques a facilité beaucoup l'identification et le suivi des tornades et autres orages violents depuis les 30 dernières années. De plus, depuis une vingtaine d'années, les météorologistes d'Environnement Canada font un effort rigoureux et minutieux pour identifier leur présence et évaluer leur intensité. À partir des coupures de presse, des mentions officielles et locales, des rapports sur l'ampleur des dommages, du réseau d'observations météorologiques et de la mémoire collective,

Newark (1983) fut le premier à établir des statistiques partielles sur la fréquence, la durée et l'intensité des tornades au Canada entre 1950 et 1979 et arriva aux conclusions suivantes pour le Québec :

- des 636 tornades identifiées au Canada entre 1950 et 1979, 98 tornades (15,4 %) se sont produites au Québec, échelonnées sur 81 jours, causant 4 décès et une centaine de blessés au cours de cette période de 30 ans ;
- la très grande majorité des tornades au Québec (89 %) sont d'intensité F0 ou F1 selon l'échelle Fujita (1973)⁸ avec une très faible pourcentage pouvant atteindre l'intensité maximale F3 (2 %) ;
- la saison des tornades au Québec est de la mi-mai à la mi-septembre (120 jours) avec un maximum à la fin juin et début juillet, avec une fréquence accrue entre 15h00 et 19h00 ;
- la direction prédominante de la trajectoire d'une tornade est d'ouest en est ;
- la probabilité annuelle d'avoir une tornade (peu importe son intensité) varie de 2 à 8 tornades par 100 000 km² sur la partie méridionale du Québec, soit dans les régions au sud du 50 °N. Les statistiques sur le nombre de tornades entre 1981 et 1996 (tableau 5.11) au Québec donne une moyenne annuelle de 3,8 ;
- on peut s'attendre à être victime d'une tornade F2 au Québec à tous les 5 ans et d'une tornade F3 à tous les 15 ans ;
- la présence de plans d'eau importants, par exemple l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent, tend à affaiblir l'intensité d'une tornade ou en empêcher le développement.

L'annexe C donne la liste des tornades répertoriées au Québec et ne peut être considérée comme complète. En tout, entre 1847 et 1996, un total de 173 tornades ont été documentées ou rapportées dans les annales météorologiques, c'est donc un minimum de plus de 1 tornade confirmée par année.

⁸ l'échelle Fujita détermine l'intensité des tornades

F0 (léger):	vents de moins de 115km/h, dommages légers
F1(modéré):	vents de 116 à 179 km/h, dommages aux toitures
F2 (forte):	vents de 180 à 251 km/h, toitures arrachées
F3 (intense):	vents de 252 à 330 km/h, maison partiellement détruite
F4 (très intense):	vents de 331 à 416 km/h, maison détruite

Par ailleurs, on a pu voir que, entre 1981 et 1996, on parle d'une moyenne de 4 tornades par année. Cette discordance peut sans doute être expliquée en bonne partie par le fait que l'information sur les cas de tornades dans la période 1900 à 1950 est quasi-inexistante et que la documentation systématique concernant l'estimation de la force des tornades et de l'ampleur des dommages causés a vraiment débuté dans les années 50.

Selon le tableau 5.13, ces 173 tornades ont tué au moins 35 personnes, causé des blessures à un minimum de 235 personnes et provoqué des dommages matériels dépassant les 15 millions de dollars. L'absence d'information sur les tornades entre 1900 et 1950 indique définitivement que ces chiffres sont conservateurs.

Tableau 5.13 - Liste préliminaire des tornades au Québec depuis les 125 dernières années et leurs répercussions

<u>Période</u>	<u>Nombre de tornades</u>	<u>Nombre minimal de pertes de vie et personnes affectées</u>	<u>Estimé minimal des dommages matériels (en millions de dollars)</u>
Avant 1900	8	au moins 25 morts, plus de 57 blessés	N/D
1900-1939	N/D	N/D	N/D
1940-1949	1	N/D	au moins 0,2 million (1949)
1950-1979	98	4 décès, une centaine de blessés	au moins 7,5 million
1980-1989	28	6 morts, au moins 63 blessés	au moins 2,5 million
1990-1996	38	aucun mort, au moins 15 blessés, 100 personnes sans abri	plus de 5,0 million
<i>TOTAL</i>	<i>au moins 173 tornades</i>	<i>au moins 35 morts, plus de 235 blessés</i>	<i>plus de 15 millions de dollars (réels)</i>

5.5.2. La grêle

Phénomène relativement fréquent, la chute de grêle lors d'orages violents accompagne souvent les crues subites, les vents violents et même les tornades associés aux cellules convectives intenses. Entre 1981 et 1996, au moins 324 cas de grêle ont été confirmés (tableau 5.11). À partir de l'énumération des cas de grêle faite par Boivin & Lacroix (1990b) et complété par Deaudelin (1993), Vaillancourt (1994,1997), Vaillancourt & Gaudette (1996) et Lacroix (1997), l'annexe C énumère, de façon non-exhaustive, une centaine de cas de grêle suffisamment documentés pour permettre de cerner la localisation et l'ampleur

des dommages causés par la forte grêle. Malgré la faiblesse relative de cette énumération, on peut conclure, sans trop se tromper, que les dommages causés spécifiquement par la grêle au Québec depuis 1979 dépassent les 80 millions de dollars.

Toutes les régions du Québec peuvent s'attendre à être affectées par des épisodes de grêle à un rythme pouvant varier d'une occurrence en 4 ans à près de trois occurrences par année (Boivin & Lacroix, 1990b). Les occurrences de grêle se produisent principalement entre mai et septembre (75 % de tous les cas de grêle) et sont plus probables sur le sud-ouest du Québec.

C'est en agriculture que les répercussions négatives d'un épisode de grêle se font le plus sentir en anéantissant des récoltes entières de céréales, en détruisant les cultures maraîchères et en dévastant des vergers. La tempête de grêle dans la région de Saint-Grégoire et de l'Ange-Gardien du 29 juillet 1985 donne un bon exemple de l'ampleur des dommages causés par une cellule orageuse d'environ 60 km² (Boivin & Lacroix, 1990b):

- 150 exploitations agricoles dévastées
- des récoltes complètement anéanties
- 17 % des vergers abimés
- 800 000 boisseaux de pommes ravagés
- Estimé total des dommages : 3,5 millions de dollars (1985)

Le 2 août 1979, des dommages importants aux cultures de tabac dans la région de Joliette furent encourus avec une perte atteignant 1 million de dollars et 50 % des plants affectés par la grêle (Environnement Canada, 1988).

Les grêlons, par leur force d'impact, peuvent aussi causer des dommages considérables aux toitures des maisons et établissements bien qu'il soit difficile de chiffrer l'ampleur des dégâts. Peu d'informations quantitatives existent sur les dommages associés à la grêle seule, étant donné que, très souvent, la grêle s'accompagne de vents violents et de crues subites, caractéristiques de cellules orageuses intenses.

La grêle peut également causer de lourds dégâts aux carrosseries des véhicules (peinture, vitres, etc..) comme le démontre les quelque 50 millions de dollars en réclamations d'automobilistes lors de l'événement de grêle du 29 mai 1986 sur le sud-ouest du Québec (Boivin & Lacroix, 1990b). Très peu de décès sont associés à la chute de la grêle, à l'exception des cas où le diamètre des grêlons a atteint une taille démesurée (1^{er} juillet 1983 au nord du lac Saint-Jean).

Tout au long du chapitre 5, nous avons examiné les phénomènes climatiques extrêmes qui influent fortement sur la majorité des facettes du Québec tant au niveau biologique, physique, social, économique et humain. Nous pouvons donc conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité du Québec aux phénomènes climatiques extrêmes est FAIBLE* car

bien qu'il existe un nombre important de références, rapports, études sur des événements climatiques extrêmes, la majorité d'entre elles ont considéré les répercussions économiques des dommages matériels et en pertes de vie. Les aspects sociaux et biologiques ont été, sauf en de rares occasions, ignorés.

Le niveau de connaissances de l'influence d'un changement climatique sur les phénomènes climatiques extrêmes est TRÈS FAIBLE car

aucune étude n'est disponible au Québec sur les changements à la fréquence, à l'intensité et à la durée des événements extrêmes sous un scénario 2xCO₂

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : très bon, bon, moyen, faible et très faible

6. SENSIBILITÉ DU QUÉBEC AUX CONDITIONS PASSÉES, PRÉSENTES ET FUTURES DU CLIMAT

Le but du présent chapitre est de résumer les connaissances scientifiques actuelles sur les interactions existant entre le climat et 10 secteurs bien déterminés. Chacun des secteurs constitue un sous-chapitre et, à l'intérieur de chacun d'eux, on retrouvera:

- une brève description des caractéristiques du secteur en relation avec le climat;
- un résumé de nos connaissances sur la **sensibilité** du secteur face aux conditions passées et actuelles du climat;
- un résumé de nos connaissances sur les **répercussions** potentielles des conditions futures du climat, telles que ces dernières sont perçues par les scénarios de changement climatique (2xCO₂), sur le secteur considéré.

Comme on pourra le constater, l'ampleur des connaissances scientifiques varie énormément selon les secteurs.

6.1. Ressource en eau

Le réseau hydrographique du Québec est composé de trois grands bassins versants : l'Ungava (492 000 km²), les baies de James et d'Hudson (plus de 518 000 km²) et le Saint-Laurent (673 000 km²). La portion québécoise du bassin versant du Saint-Laurent compte 350 affluents (Environnement Canada, 1997a).

Sur le Saint-Laurent, la période durant laquelle la température de l'air se maintient constamment sous zéro s'étend du début décembre au début avril, selon les secteurs. Ce régime de température influe directement sur la formation de glaces de rive, alors que la dérive de ces dernières est fortement influencée par l'action conjuguée des vents, des marées et des courants. L'ensemble de ces facteurs fait en sorte que les conditions de glace du Saint-Laurent sont très variables, allant de zones complètement libres (éclaircies) à des zones présentant des amoncellements compacts. Des éclaircies importantes sont souvent visibles sur la Côte-Nord, dans le bassin de la Kamouraska, à l'embouchure du Saguenay, ainsi que dans les ports de Pointe-au-Pic, Québec, Trois-Rivières et Montréal. Des zones d'amoncellement de glace les plus courantes sont situées au lac Saint-Pierre, au pont de Québec, dans le chenal de l'île d'Orléans, à Pointe-des-Monts et dans la région de Montréal (Gouvernement du Québec, 1989).

6.1.1. La sensibilité au climat de la ressource eau

A) Débits et niveaux d'eau

La Commission Mixte Internationale (CMI), organisme canado-américain, a le mandat, depuis 1909, d'assurer la régularisation des eaux du bassin Grands Lacs-Saint-Laurent. Le premier plan de gestion 1958-D, adopté en 1963, a été modifié, depuis les 5 dernières années, en fonction des différentes situations et des besoins. Le tableau 6.1 donne une chronologie de l'implantation des ouvrages sur le fleuve et des plans de régularisation des niveaux à la sortie du lac Ontario. Les débits du fleuve Saint-Laurent sont intimement liés à la construction des divers ouvrages et d'un plan de gestion des débits.

Le débit annuel moyen en provenance des Grands Lacs est de 6 964 m³/s (fig. 5.3) avec des écarts moyens de 699 m³/s depuis 1861 (Slivitzky, 1997 - comm. pers.). L'importance des variations des niveaux d'eau avant l'implantation des barrages Moses-Saunders⁹, Les Cèdres et Beauharnois était synchrone avec les quantités de précipitations annuelles reçues dans les Grands Lacs (Bergeron, 1995). Depuis 1861, les années 1916-20, 1931-35 et 1961-65 correspondent aux années de faibles quantités de précipitation et de faibles niveau d'eau (Changnon & al., 1994). Les fortes précipitations de deux périodes récentes, 1972-75 et 1981-85, ont maintenu de hauts niveaux d'eau dans le fleuve.

L'augmentation du débit le long du parcours du Saint-Laurent provient principalement de quelques grands tributaires comme l'Outaouais (27%), le Saguenay (19%), la Manicouagan (12%), le Saint-Maurice (10%) et la Moisie (6%) - (Gouvernement du Québec, 1989).

Depuis 1984, les niveaux d'eau au lac Saint-François sont maintenus artificiellement entre 46,71 et 46,82 m au-dessus du zéro des cartes, afin de faciliter la navigation maritime et la production d'hydroélectricité. Au port de Montréal, le débit des eaux est fortement influencé par les apports d'eau de la rivière des Outaouais, dont le débit moyen est de 2 000 m³/s, avec des écarts pouvant atteindre 6 500 m³/s durant les crues printanières. Un débit maximum de 9 230 m³/s a été atteint en avril 1951. Les variations des niveaux d'eau, au port de Montréal, sont plus grandes pour la période précédant 1963 (Labrecque, 1994). La moyenne annuelle est passée de 7,39 m avant 1963 à 6,77 m après 1964. Labrecque (1994) précise que, depuis 1964, les niveaux en période d'étiage ont une tendance à la hausse et les moyennes mensuelles sont généralement plus élevées. Par contre, les hauts niveaux d'eau survenaient en hiver (janvier et février) au lieu de se produire pendant les crues printanières.

⁹ Ceci fait référence à 2 séries de barrages : le barrage R.H. Moses (New York) et W.B. Saunders (Ontario)

Tableau 6.1 - Résumé des ouvrages et des activités de régularisation sur le fleuve Saint-Laurent

1779	Construction du chenal de Côteau-du-Lac, en amont du lac Saint-François
1825	Construction du canal Lachine
1844	Première canalisation du lac Saint-Pierre
1854	Première intervention du gouvernement fédéral sur le chenal maritime du Saint-Laurent qui était d'une profondeur de 4,9 m et d'une largeur de 76,2 m
1907	Profondeur du chenal maritime passe de 8,4 à 9,1m et la largeur de 90 à 140 m
1909	Naissance de la Commission Mixte Internationale sous l'égide du « Traité relatif aux eaux limitrophes Canada-États Unis »
1924	Barrage et centrale Les Cèdres
1929	Barrage et centrale Rivières-des-Prairies
1931	Digues submergées entre les îles de Sorel
1933	Barrage et centrale de Beauharnois (faits en plusieurs étapes sur 25 ans)
1941	Barrages régulateurs de l'île Juillet
1943	Barrage des Rapides-du-Côteau
1952	Profondeur du chenal maritime passe de 9,1 à 10,7 m et la largeur de 140 à 150 m
1956	Création du Conseil international de contrôle du fleuve Saint-Laurent
1958	Barrage et centrale Moses-Saunders (Ontario)
1959	Voie maritime du Saint-Laurent
1963	Adoption du plan de régularisation 1958D
1964	Barrage de Carillon
1965	Barrage de Saint-Timothée
1967	Fin de l'aménagement des îles d'Expo 67
1967	Estacade de protection des glaces au Bassin de la Tortue (Laprairie)
1968	Début de la navigation commerciale permanente en hiver sur le Saint-Laurent
1970	Largeur du chenal maritime passe de 150,0 à 245,0 m
1979	Barrage de l'île du Moulin (restauré)
1992	Début des travaux visant à faire passer la profondeur du chenal maritime entre Deschaillons et Montréal de 10,7 à 11,0 m
1994	Les plans IS4 (Interest Satisfaction Model) et 35P sont mis à l'essai en parallèle avec le plan 1958D
1997	Le plan 35P devient le plan 1998 et remplace le plan 1958D

Sources : Bergeron (1995), Gouvernement du Québec (1989), Procéan (1996), Robichaud (1997), Slivitzky (1997, comm. pers.)

À l'entrée du lac Saint-Pierre, le débit moyen annuel est de 10 930 m³/s (Langlois & al.,1992) et le niveau d'eau moyen subit des changements cycliques dont l'amplitude saisonnière est de l'ordre de 2 m (Hudon & Armellin,1995).

B) Érosion des berges

L'érosion des berges contribue de façon importante à la charge sédimentaire du Saint-Laurent. Desrosiers & Bégin (1992) discutent de l'importance des décennies 1920 et 1970 sur le comportement érosif des hauts niveaux d'eau sur la morphologie du Saint-Laurent. Bertrand (1996) indique qu'entre Boucherville et le lac Saint-Pierre, il se perd annuellement de 1 à 2 m de rives, conséquence de l'érosion générée par les hautes eaux. Côté (1989) et Dionne (1986) rapportent l'effet des hauts niveaux d'eau sur le recul de la bordure forestière et des marées sur l'érosion des marais intertidaux dans l'estuaire maritime.

Les facteurs climatiques contribuent aussi à amplifier le phénomène d'érosion des berges. Les observations concernant l'érosion des berges dans les Grands Lacs par Kreutzwiser (1988) et Angel (1995) précisent que les dommages aux berges causés par les tempêtes furent 2,5 fois plus élevés en 1985 que pour la période 1972-73. De ce fait, Meadows & al. (1997) mentionnent que l'érosion des berges dépend des interactions entre les niveaux du plan d'eau considéré et l'intensité des vagues générées par les tempêtes heurtant la rive.

Il devient donc nécessaire de s'attarder aux variations dans la fréquence, la durée et l'intensité des vents de tempêtes responsables de la génération des vagues responsables des dommages. Brennan & Smith (1978) et Zishka & Smith (1980) ont montré que la distribution spatio-temporelle des déplacements ainsi que l'intensité des dépressions météorologiques sont directement liées à la quantité de précipitation mesurée à une station représentative. Wood & al. (1995) examinèrent les trajectoires des dépressions de 1950 à 1994 sur la région des Grands Lacs et démontrèrent un déplacement vers le nord d'environ 100 km dans la trajectoire des dépressions frappant le lac Michigan. Selon Meadows & al. (1997), les mécanismes de génération des vagues, sous un régime de vents différent, peuvent être ainsi plus importants dans l'ampleur des dommages riverains causés par les vagues de tempête, que la hausse effective des niveaux d'eau.

C) Qualité et disponibilité de l'eau

L'eau du fleuve Saint-Laurent est d'une qualité acceptable pour les fins d'alimentation des usines de traitement des eaux de consommation domestique. Le fleuve est la source d'approvisionnement en eau brute de 42 municipalités riveraines qui alimentent 45 % de la population du Québec en eau potable. Quotidiennement, 2 milliards de litres d'eau sont puisés dans le fleuve (Gouvernement du Québec, 1989). Les impacts environnementaux suscités par la présence humaine sont un indicateur de la pression sociale sur la ressource

(Environnement Canada, 1997a). Le bassin versant des Grands Lacs/Saint-Laurent, avec sa densité de 26 habitants/km², ne subit qu'une faible pression sur le ressource (tableau 6.2). L'indice de disponibilité de la ressource représente le ratio annuel du débit par rapport au nombre d'habitants. Ainsi, le Saint-Laurent se caractérise par un indice de 12 735 m³/an/hab¹⁰, révélateur d'une grande disponibilité pour les différents usages quotidiens.

Tableau 6.2 - Le Saint-Laurent et les grands fleuves du monde

<u>Fleuve</u>	<u>Population</u> (en millions)	<u>Densité</u> (habitant/km ²)	<u>Pression</u> (habitant/m ³ /s)	<u>Disponibilité</u> (m ³ /an par hab)
Amazone	7	1	40	787 904
Danube	90	110	13 700	2 300
Fraser	2	9	500	63 100
Gange	469	270	15 100	2 100
Huang He	81	107	62 100	500
Mackenzie-Paix	0,2	< 1	19	1 665 000
Mékong	100	126	6 700	4 700
Mississippi	63	20	3 522	8 953
Murray	2	2	5 100	6 100
Niger	107	48	17 500	1 800
Nil	155	54	54 600	600
Parana	104	34	4 200	7 600
Rhin	55	297	22 000	1 400
Grands lacs/Saint-Laurent	43	26	3 400	9 300
Seine	17	227	42 500	700
Sénégal	11	33	15 700	2 000
Tamise	12	896	184 600	200
Yang-Tsé-Kiang	351	194	10 300	3 000
Zaire	46	12	1 200	26 600

Tiré d'Environnement Canada, 1997a

¹⁰ Si on considère le bassin versant des Grands lacs / Saint-Laurent dans sa totalité, on arrive à une disponibilité de 9 300 m³/an/hab tel qu'indiqué au tableau 6.2

Depuis le début des années 1970, le problème de la consommation de l'eau potable est devenu de plus en plus important d'un point de vue économique et de développement durable. Un québécois sur deux s'approvisionne à même les eaux du Saint-Laurent et plus de 95 % de la population entre Montréal et Valleyfield puise son eau potable dans le fleuve.

L'augmentation croissante des besoins en eau potable a suscité de la part des municipalités l'élaboration de campagnes d'économie de l'eau potable servant à des fins d'arrosages des pelouses. En effet, cette activité entraîne, durant la période estivale, une demande en eau potable qui occasionne souvent des conditions critiques, voire même un rationnement de l'eau (Lamothe & Périard, 1988). Par ailleurs, non seulement l'approvisionnement peut être critique à certaines périodes, mais il y a un coût important relié aux arrosages de pelouses. En 1979, certains journaux titraient que l'eau utilisée pour arroser les pelouses dans l'agglomération urbaine de Québec coûte 2,5 M\$ par année. L'arrosage de pelouses est équivalent à la consommation d'eau liée à tous les autres usages quotidiens d'une famille de cinq personnes, soit 1 mètre cube (Lamothe & Périard, 1988). Cette activité requiert des quantités d'eau très différentes d'une année à une autre. À titre d'exemple, en 1978, les quantités d'eau nécessaires pour l'entretien des pelouses (d'arrosages légers et abondants) furent 5 fois supérieures aux quantités de 1976 pour la station de Montréal-Dorval et 3 fois supérieures pour la station de Québec.

6.1.2. Les ressources en eau sous un environnement 2xCO₂

La variabilité de la ressource en eau est fortement liée aux conditions climatiques. Pour évaluer les impacts d'un changement climatique sur la ressource en eau, il faut commencer par examiner ce que prévoit les modèles de circulation générale. Les résultats, entre autres, de trois de ces modèles (GFLD, GISS et OSU¹¹), indiquent que les caractéristiques saisonnières climatiques d'un réchauffement au Québec (Météoglobe, 1989) pourraient correspondre à:

- une température moyenne mensuelle pour un scénario 2xCO₂ toujours plus élevée que la normale ;
- des températures moyennes mensuelles supérieures à la normale;
- des précipitations supérieures ou comparables;
- un printemps plus hâtif que la normale.

11 OSU : Oregon State University

L'analyse des températures et des précipitations du Nord québécois suggère que le nouveau climat issu du modèle GFLD donnera des étés plus secs et plus chauds, des printemps beaucoup plus doux et humides. Il en va de même pour le modèle GISS qui annonce les mêmes tendances pour l'été, mais un réchauffement moins grand, et des hivers avec plus de précipitations. La proportion liquide, solide ou mixte des précipitations dans un scénario $2xCO_2$ comporte toutefois une grande incertitude. Les résultats du modèle OSU prévoient un réchauffement plus uniforme à l'année et une augmentation significative des précipitations (Météoglobe, 1989).

Les impacts de tels changements climatiques sur les usages et la disponibilité de la ressource hydrique ont été largement estimés tant pour les rivières du Québec, qui ont un intérêt concernant la production hydroélectrique, que pour le fleuve Saint-Laurent. CMI (1993), Slivitzky (1993), Changnon & al. (1994), Mortsch & Quinn (1996) et Slivitzky (1997) ont précisé les conséquences d'un réchauffement sur les débits anticipés du fleuve. Des projets d'études réalisés par Singh (1987), Météoglobe (1989), Singh & al. (1990), Morin & Slivitzky (1992) et Slivitzky & Morin (1996) portent sur l'apport net en eau, sous des conditions de $2xCO_2$, des bassins versants de la Baie James, du sud-ouest du Québec et de la Côte-Nord.

A) Fleuve Saint-Laurent

Dans le cadre du projet Canada/États-Unis du bassin versant des Grands Lacs/Saint-Laurent portant sur l'adaptation à la variabilité et au changement climatique, Mortsch & Quinn (1996) ont arrimé les sorties climatologiques et météorologiques à divers scénarios $2xCO_2$ aux modèles hydrologiques et écosystémiques actuellement disponibles. À partir du scénario $2xCO_2$ du modèle canadien (CCC-GCM2) donnant, sur une base annuelle et pour le tronçon allant du lac Ontario au Haut Saint-Laurent, un réchauffement des températures de l'ordre de $4\text{ }^\circ\text{C}$ et une baisse des précipitations inférieure à 10 %, Mortsch et Quinn (1996) ont conclu que le débit moyen annuel et le niveau moyen des eaux de la région de Montréal baisseraient respectivement de 40 % et de 1,3 m. Ceci modifierait de façon substantielle l'équilibre eau-douce/eau salée le long du fleuve et du golfe du Saint-Laurent. Ces réductions substantielles des valeurs annuelles de débit et du niveau d'eau ne se retrouveront possiblement pas en hiver et au début du printemps avec une fonte printanière plus précoce et plus de précipitations liquides au cours de la saison hivernale. Les auteurs s'entendent cependant sur les débits bas au cours de l'été.

Des estimations plus fines prévoient que les débits annuels moyens, à la sortie du lac Saint-Louis, seraient d'environ $5\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$, plus bas que le débit actuel de $5\ 900\ \text{m}^3/\text{s}$. En période de sécheresse, le débit pourrait descendre à $3\ 100$

m³/s. Il y aurait réduction des débits de 8 % de la rivière des Outaouais, de 10% dans la section fluviale en aval de Montréal et les débits à la hauteur de Québec passeraient de 10 800 m³/s à 7 250 m³/s (Slivitzky, 1993).

Cette baisse pourrait avoir comme effet de diminuer la qualité des eaux de consommation (moindre dilution des polluants) et de provoquer la progression du littoral au détriment de l'assèchement des terres humides adjacentes (Jean,1990 ; Hudon & Armellin,1995). La réduction des débits entraînera une diminution de certains usages d'eau pour des fins domestique, commerciale, industrielle et agricole (Slivitzky,1997). Par ailleurs, l'augmentation de CO₂ pourrait provoquer une baisse du pH de l'eau (Jean,1990).

B) Autres rivières du Québec

Au niveau des rivières du Québec, l'impact des variations et du changement climatique à prévoir semble moins radical. Les estimations pour le bassin versant de la rivière Moisie, tout comme celles des bassins versants des baies James et d'Hudson, démontrent que les précipitations annuelles seraient pratiquement inchangées (Singh,1990 ; Morin & Slivitzky,1992). L'augmentation des températures annuelles moyennes de 4 °C favoriserait l'évaporation et compenserait l'apport de l'augmentation des précipitations (Singh,1987 ; Météoglobe,1989).

Les résultats des modèles de circulation générale et des régimes hydrauliques appliqués à la rivière Moisie, par exemple, prévoient une augmentation des débits annuels moyens de 5 % avec un écart-type de 15 % (Morin & Slivitzky,1992). Les changements climatiques entraîneraient des modifications importantes de la distribution annuelle des écoulements dans l'année. Les débits moyens des mois d'été seraient réduits d'environ 35 % tandis que, pour ceux des mois d'hiver, les écoulements moyens seraient soutenus par la fonte de la neige. Les quantités d'eau liées à la période de fonte de neige (avril à juin) seraient relativement peu modifiées, passant de 48 % à 49 %. L'écoulement total, pour les mois d'hiver, passerait de 17 % à 24 % de la lame annuelle (Morin & Slivitzky,1992). Par contre, durant les mois d'été (juillet à octobre), les débits diminueraient d'environ 10 %.

De plus, les résultats de l'ensemble des modèles de simulation démontrent que le ruissellement moyen annuel à long terme varierait entre -1,5 et 11,3 % et que les apports par ruissellement ne devraient pas être affectés de façon significative, tant sur le bassin versant de la Moisie que sur l'ensemble de la Côte Nord (Slivitzky et Morin, 1996).

Sous un scénario de doublement de CO₂ atmosphérique, tel que projeté par les modèles GFDL et GISS, l'apport net en eau des rivières du bassin versant de la

Baie James, soit La Grande, Caniapiscau et Opinaca-Eastmain, devrait augmenter de 6,7 % à 20,2 % pour les trois rivières (Singh & al.,1990).

Mysak (1993) précise que la variabilité naturelle des précipitations (± 25 % pour les fluctuations interannuelles et ± 15 % à l'échelle interdécennale) dominera la série temporelle des précipitations, autant à court terme qu'au milieu du prochain siècle. Il en résultera que le cycle interdécennal de grandes amplitudes, présentement observé, dominera le cycle hydrologique. Ceci implique que les temps de remplissage des réservoirs varieront considérablement d'une décennie à l'autre.

C) Usage et disponibilité de la ressource

De façon générale, l'adéquation entre les besoins et les disponibilités de la ressource en eau variera beaucoup sur une base régionale (Slivitzky,1997).

Lamothe & Périard (1988) ont estimé les impacts socio-économiques des nouveaux besoins hydriques du sol et de la capacité de production des usines de filtration, pour l'arrosage des pelouses, dans les deux grands pôles urbains que sont Montréal et Québec, face à un éventuel changement climatique causé par une augmentation du CO₂ atmosphérique. Ils rapportent que les conditions climatiques actuelles nécessitent environ 12 arrosages légers à Québec et 17 à Montréal, pour des quantités d'eau respectives de 146 mm et 209 mm et ce, afin de maintenir le niveau d'eau du sol à des conditions optimales pour les pelouses. Pour l'évaluation des impacts dûs à un éventuel changement climatique, ils ont considéré les résultats issus de deux modèles de circulation générale (GFDL et GISS).

Ainsi, les modèles GFDL et GISS prévoient des augmentations de températures plus fortes au début et à la fin de la saison estivale. Cependant, les quantités de précipitation estimées pourraient varier entre -30 % et +15 % respectivement. Les conditions déterminées selon les scénarios entraîneraient des hausses de l'usage variant entre 20 et 30 % à Québec et entre 20 et 25 % à Montréal (tableaux 6.3 et 6.4). L'augmentation des quantités d'eau nécessaires pour l'arrosage des pelouses, causée par la combinaison d'un réchauffement et la croissance des banlieues, entraînerait indéniablement, pour les municipalités, des coûts supplémentaires liés aux infrastructures et à la production d'eau potable.

Tableau 6.3 - Quantités d'eau requises pour l'arrosage des pelouses selon les conditions actuelles et futures (scénarios A et B) pour Québec, 1975-1984

	CONDITIONS ACTUELLES				SCÉNARIO A (GFDL)				SCENARIO B (GISS)			
	Arrosage léger		Arrosage abondant		Arrosage léger		Arrosage abondant		Arrosage léger		Arrosage abondant	
	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)
1975	15	193	7	229	20	250	10	311	19	234	9	299
1976	4	46	2	63	7	83	4	129	5	63	3	97
1977	14	175	6	198	17	211	8	262	16	190	7	229
1978	19	226	9	287	24	278	9	292	22	266	9	296
1979	13	155	6	190	17	206	9	289	16	184	8	257
1980	8	94	5	156	11	134	6	190	10	120	6	189
1981	9	103	6	193	13	157	7	225	12	150	8	262
1982	14	164	6	193	17	205	7	231	15	184	8	260
1983	17	208	7	221	21	263	10	323	19	239	8	262
1984	8	95	5	158	13	149	6	190	10	116	5	162
Moy.	12	146	6	189	17	194	8	244	14	175	7	231
Pourcentage d'augmentation					33 %	33 %	33 %	29 %	17 %	20 %	17 %	22 %

Adapté de Lamothe & Périard (1988)

Tableau 6.4 - Quantités d'eau requises pour l'arrosage des pelouses selon les conditions actuelles et futures (scénarios A et B) pour Montréal, 1975-1984

	CONDITIONS ACTUELLES				SCÉNARIO A (GFDL)				SCENARIO B (GISS)			
	Arrosage léger		Arrosage abondant		Arrosage léger		Arrosage abondant		Arrosage léger		Arrosage abondant	
	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)	fréquence	quantité (mm)
1975	20	242	11	348	22	288	11	367	23	289	11	366
1976	8	101	5	160	12	151	6	197	10	123	8	161
1977	17	213	8	260	25	295	10	324	22	263	10	315
1978	24	310	12	400	31	383	13	427	29	367	12	392
1979	17	201	8	249	22	269	11	352	22	270	10	324
1980	17	208	8	252	21	259	9	289	20	243	10	317
1981	9	106	5	160	13	168	7	229	11	139	6	197
1982	22	265	9	296	26	311	11	353	26	315	12	373
1983	22	274	9	289	28	337	11	351	25	311	11	353
1984	14	168	7	225	20	245	9	297	19	233	10	334
Moy.	17	209	8	264	22	271	10	319	21	255	10	313
Pourcentage d'augmentation					30 %	30 %	25 %	20 %	24 %	22 %	25 %	19 %

Adapté de Lamothe & Périard (1988)

Toujours selon Lamothe et Périard (1988), il est difficile de chiffrer avec exactitude de tels coûts pour le traitement d'eau potable. Par contre, les investissements récents par certaines municipalités sont révélateurs. Ainsi, pour une production quotidienne de 4 500 m³, les coûts de construction d'une usine d'assainissement des eaux sont passés de 46\$ (1965) à 262\$ (1987) du mètre cube soit une augmentation des coûts, six fois plus élevés. La Ville de Laval, entre 1982 et 1983, a construit une usine au coût de 29 M\$ pour une capacité de production journalière de 114 000 m³. Les coûts totaux de production annuelle d'eau, en 1987, pour l'usine de Sainte-Foy, en banlieue de Québec, s'élevaient de 16 à 21\$ pour arroser une pelouse. Cependant, dans la région de Montréal, ces coûts variaient entre 23 et 29\$. Dans le contexte des scénarios de changement climatique, les coûts d'arrosage des pelouses varieraient entre 19\$ et 27\$ pour la région de Québec et de 28 à 35 \$ pour la région de Montréal (tableau 6.5).

Tableau 6.5 - Évaluation des coûts d'arrosage par terrain de 420 m² (15 avril au 15 octobre) pour les conditions actuelles et futures

	CONDITIONS ACTUELLES		SCÉNARIO A (GFDL)		SCÉNARIO B (GISS)	
	Arrosage		Arrosage		Arrosage	
	léger	abondant	léger	abondant	léger	abondant
<u>Québec (1975-1984)</u>						
quantité d'eau moyenne (en mm)	146	189	194	244	175	232
coût d'arrosage par terrain (1987\$)*	16	21	21	27	19	25
Augmentation (en %)			31%	29%	19%	19%
<u>Montréal(1975-1984)</u>						
quantité d'eau moyenne (en mm)	209	264	271	319	255	313
coût d'arrosage par terrain (1987\$)	23	29	30	35	28	34
Augmentation (en %)			30%	21%	22%	17%
* Coûts = quantité d'eau moyenne x 0,42 m ³ x 0,26\$/m ³ pour une superficie moyenne de 420 m ² (Gorse, 1987)						
Tiré de Lamothe & Périard (1988)						

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat du secteur RESSOURCES EN EAU au Québec est BONNE* car

on peut compter sur des études spécifiques et ponctuelles, principalement sur le Saint-Laurent, liant les variations des niveaux d'eau aux usages, à l'évolution des écosystèmes riverains et aux cycles vitaux de la faune aquatique.

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur les RESSOURCES EN EAU est MOYEN car

une estimation quantitative a été faite seulement pour les besoins futurs en eau sur le sud de la province, les variations sur les niveaux et débits d'eau dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent ainsi que l'apport net en eau par bassin dans le nord du Québec.

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : *très bon, bon, moyen, faible et très faible*

6.2 Santé humaine et aspects sociaux

Les grandes variations climatiques observées au Québec affectent indirectement l'état de santé de la population. Les changements rapides de température, des précipitations et les tempêtes hivernales peuvent entraîner divers désagréments pour les personnes de tout âge. Une étude canadienne menée en 1984 (Phillips & Crowe, 1984) a même tenté de classer les principales villes du pays ayant le moins d'inconvénients climatiques par le biais d'un "indice de rigueur du climat (IRC)" allant de 1 (climat le moins rigoureux) à 100 (le pire climat). Basée sur les données recueillies aux stations météorologiques du pays, l'étude démontre que:

- la Ville de Victoria (C.B.), avec un IRC de 13, vient au premier rang;
- Montréal, avec son IRC de 44, vient au 11^e rang, suivi de Québec (IRC de 52) et de Chicoutimi-Jonquière avec un IRC de 54;
- le pire endroit est Isachsen, dans les Territoires du Nord-Ouest, avec un IRC de 99.

Les études canadiennes dans le domaine du lien climat-santé ou en biométéorologie/santé environnementale sont peu nombreuses comparativement aux recherches faites en Europe et aux Etats-Unis. Malgré tout, la recherche dans ce domaine d'activité est en pleine expansion, le nombre de publications a augmenté ainsi que la crédibilité des travaux et des résultats (Miranda, 1993).

Les premières études qui mettent en relief les possibles implications des facteurs climatiques ou météorologiques sur l'état de la santé contiennent beaucoup de lacunes et d'interrogations (Miranda, 1993). A cet effet, Jendritzky (1992) précise la qualité et les lacunes des études épidémiologiques et météopathologiques des 40 dernières années.

Cependant, le nombre de parutions permet de constater que cette science sort actuellement de l'anonymat. La recherche réalisée au Québec porte sur les effets nocifs des polluants d'origine anthropique (environnement et santé) et sur les effets saisonniers de l'adaptation humaine aux conditions extrêmes de température ou à des conditions particulières locales. Le chapitre 5 sur les extrêmes climatiques fait plusieurs références aux répercussions importantes que ce type de phénomènes anormaux du climat a sur la santé et le comportement social de la population.

De manière générale, la santé humaine est affectée par les variations et les changements des conditions climatiques. Les personnes qui souffrent d'asthme ou de problèmes cardio-respiratoires chroniques seront plus sensibles aux variations brusques de température, d'humidité et de concentrations de polluants atmosphériques.

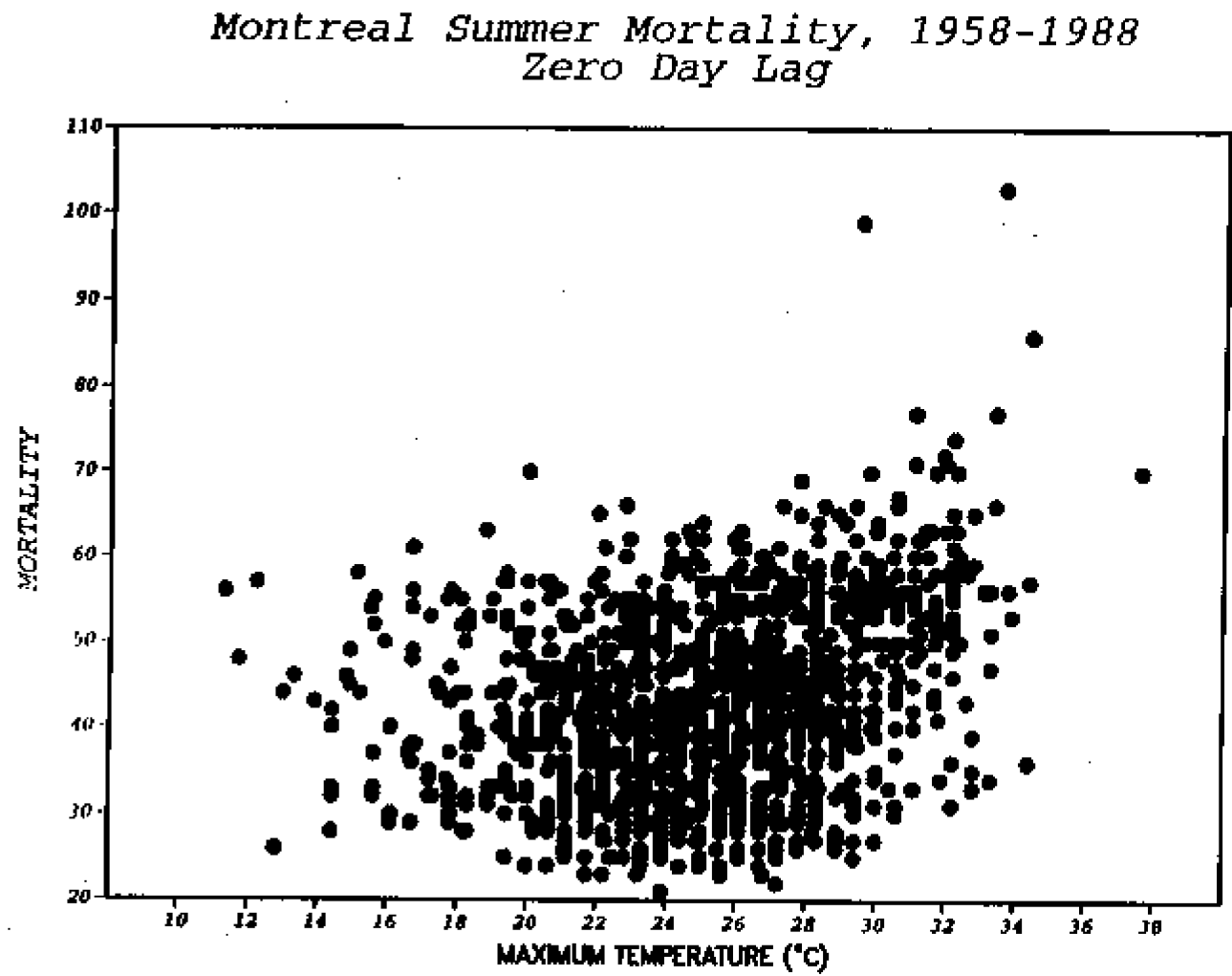
6.2.1. La sensibilité climatique de la santé et des aspects sociaux

Les études de Burnett & al.(1997, en cours) et Delphino & al.(1994) portent sur la relation entre les concentrations d’ozone et les fréquences d’admission dans les hôpitaux en Ontario et au Québec. Burnett & al.(1997, en cours) mettent en évidence que la pollution de l’air, surtout durant la période critique de mai à août, affecte davantage les fonctions respiratoires chez les enfants que chez les personnes âgées. Delphino & al.(1994) précisent que, pour les maladies respiratoires, il existe une relation étroite entre les admissions dans les hôpitaux et les maximums, sur 8 heures, des concentrations d’ozone au sol, surtout pour les mois de juillet et août.

Dans le cadre d’une campagne de mesures dans la vallée du fleuve Fraser, en Colombie-Britannique, Brauer & Brook (1997) montrent également que l’exposition à des concentrations d’ozone troposphérique inférieures aux valeurs-seuils canadiennes (82 ppb) ou américaines (120 ppb) pouvait avoir un effet néfaste sur la capacité pulmonaire de personnes ayant à travailler à l’extérieur pendant plusieurs heures.

Kalkstein & Smoyer (1993) précisent la relation significative entre la température et la mortalité, à Toronto et à Montréal. Selon eux, les seuils critiques des températures autour de 29 °C et 33 °C à Montréal et Toronto, respectivement, sont des facteurs qui augmentent l’incidence de la mortalité (figure 6.1).

Figure 6.1 - Températures maximales versus le nombre de décès à Montréal (1958 - 1988)



Une évaluation des variables potentielles affectant le taux de mortalité au-delà d'un seuil de température, à Montréal et Toronto, montre que les populations de plusieurs villes réagissent de façon similaire aux températures très élevées (Kalkstein & Smoyer,1993). Ainsi, dans plusieurs villes, dont Toronto, la température explique plus de 30 % de la variance existant avec la mortalité au-delà d'un certain seuil. À Montréal, selon ces auteurs, sur 11 jours de forte mortalité, 9 surviennent lors de journées chaudes et humides, tandis que pour Toronto, les journées de forte mortalité apparaissent 8 jours sur 15 avec les mêmes conditions.

Goldberg (1996) recommande, quant à lui, une méthodologie qui peut être utilisée pour mettre en relation les causes de l'augmentation du taux de mortalité humaine avec la chaleur estivale. L'étude vise les individus qui sont décédés pendant la période 1984 à 1993 inclusivement et qui sont bénéficiaires du programme de l'assurance-maladie du Québec et inscrits au fichier des mortalités au Québec.

La sévérité des conditions climatiques hivernales au Québec a également des répercussions directes ou indirectes sur la santé et la sécurité de la population. La corrélation existant entre l'occurrence d'accidents sur la route et les mauvaises conditions climatiques est significative. En effet, des études ontariennes (Mende,1992) et albertaines (Andrey & Yagar,1993) indiquent clairement que le taux d'accidents augmente de 40 % à plus de 300 % lors de précipitations (tableau 6.6). Plus les précipitations sont fortes, plus les dommages matériels sont élevés ; par contre, les pertes de vie sont moindres.

Tableau 6.6 - Nombre d'accidents automobile en 1995 en fonction des conditions météorologiques

<u>Conditions météorologiques</u>	<u>Collisions amenant des pertes de vie</u>	<u>Collisions amenant des blessures corporelles</u>
Ciel ensoleillé ou nuageux	2 302	127 306
Brouillard, brume, fumée ou poussière	48	1 582
Pluie	232	19 433
Neige, verglas, grêle	221	13 396
Autres	48	2 382
TOTAL	2 851	164 099

(Source: Transports Canada, 1995 cité dans Andrey & Snow, 1997)

6.2.2. La santé et les aspects sociaux sous un climat 2xCO₂

Dans un contexte de changement climatique où les concentrations de CO₂ atmosphérique doublent, les modèles de circulation générale prévoient de nouvelles conditions climatiques pour le Québec. Les travaux actuels au Québec précisant les liens de cause à effet entre le climat anticipé au milieu du prochain siècle et l'apparition de problèmes de santé, ne permettent qu'une vision très sommaire des répercussions futures. L'étude réalisée par Kalkstein & Smoyer (1993), la première du genre au Québec, précise les effets d'un éventuel changement climatique sur la santé humaine, selon un scénario de 2xCO₂ et sert de tremplin pour de futurs projets d'étude. Cette étude démontre une relation significative entre des conditions de chaleur particulière et la mortalité dans des villes comme Toronto, Montréal et Ottawa.

Ainsi, Kalkstein & Smoyer (1993) notent que l'augmentation des mortalités est fortement corrélée lorsque les températures atteignent les valeurs de 29 °C et 33 °C à Montréal et à Toronto. Durant un été normal, 13 % des jours de la saison estivale à Montréal dépassent le seuil thermique de 29 °C; sous un scénario de 2xCO₂, ce nombre augmenterait à 55 %. À partir de ces évaluations, les auteurs prévoient que, sous les conditions climatiques anticipées et pour une population non-acclimatée, le taux de mortalité par chaleur excessive serait 20 fois plus élevé que le taux actuel de décès liés à la chaleur. Dans l'optique où la population incorporerait, au moins partiellement, une certaine forme d'acclimatation, le taux de décès relié à la chaleur pour les villes de Toronto et de Montréal serait considérablement plus bas que dans le scénario d'une non-acclimatation. Cependant, le taux de mortalité excéderait d'environ quatre fois le taux actuel. Ce taux de décès serait similaire aux taux actuels de décès quotidiens associés et combinés à la bronchite, à l'emphysème et à l'asthme.

L'ampleur de la mortalité liée à la chaleur, sous des conditions de 2xCO₂, serait analogue à celle que l'on retrouve actuellement dans plusieurs villes de l'Est et du Centre-Ouest des États-Unis. Cependant, les répercussions d'un réchauffement global sur la mortalité au Canada seraient moindres que dans des pays en voie de développement comme la Chine et l'Égypte. Le U.S. Bureau of Census (1991)¹² indique que le taux de mortalité par chaleur excessive serait considérablement plus élevé que le taux combiné actuel lié au cancer du poumon (34,4 pour 100,000), au suicide (13,9 pour 100,000) et aux accidents routiers (15,6 pour 100,000).

¹² Cité dans Duncan (1997, en cours)

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat du secteur SANTÉ HUMAINE ET ASPECTS SOCIAUX au Québec est FAIBLE* car

Très peu d'études sont disponibles liant les répercussions des fluctuations climatiques extrêmes sur la santé humaine et les comportements sociaux au Québec, sauf dans des cas indirectement associés au climat ou à des contaminants spécifiques

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur les SANTÉ HUMAINE ET ASPECTS SOCIAUX est TRÈS FAIBLE car

à l'exception d'une étude estimant le nombre de décès causés par l'augmentation des vagues de chaleur accablante à Montréal, tout reste à faire

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : *très bon, bon, moyen, faible et très faible*

6.3. Agriculture

En termes de potentiel agricole, le Québec possède deux zones latitudinales: une marginale au Nord du 48^{ième} parallèle, avec très peu de ressources agroclimatiques pour la production et, une favorable au Sud du 48^{ième}. Cette dernière compte sept (7) régions agricoles: le Sud-Ouest de Montréal, le Nord de Montréal, l'Outaouais, l'Abitibi-Témiscamingue, Québec, le Lac Saint-Jean et le Bas-Saint-Laurent.

On dénombrait, en 1991, un total de 38 076 fermes au Québec, représentant un revenu agricole brut de 3,9 milliards de dollars. Le secteur a subi une diminution du nombre de fermes de 5 777 fermes depuis 1961. Par contre, la superficie moyenne par ferme est passée de 60 ha en 1961 à 84 ha en 1992. La superficie totale des terres agricoles est de 3 429 600 ha et, de cela, la somme des superficies cultivées en grandes cultures, fruits, légumes, gazons et en produits de pépinières représente 1 638 457 ha (Environnement Canada, 1997b).

Dans les basses terres du Saint-Laurent, on observe depuis 30 ans une nette progression de la culture du maïs (augmentation des superficies de 400 % entre 1971 et 1991 - 350 000 ha), du soya et des cultures en ligne, au détriment du foin et des céréales. Les principales cultures demeurent le maïs-grain, la luzerne et l'orge (tableau 6.7). La région du sud-ouest de Montréal est caractérisée par les meilleurs sols de la province et d'excellentes conditions climatiques, diversifiée au plan de la production, de la transformation et des services agricoles, et de plus concentrée dans les productions céréalières et maraîchères (MAPAQ, 1993). La région de Québec, soumise à un climat généralement moins favorable aux cultures commerciales telles le maïs et le soya, demeure diversifiée et dynamique.

Tableau 6.7 - Superficies (ha) des grandes cultures au Québec en 1991

<u>Avoine</u>	<u>Blé</u>	<u>Luzerne</u>	<u>Maïs ensilage</u>	<u>Maïs grain</u>	<u>Mélange céréales</u>	<u>Orge</u>	<u>Pommes de terre</u>	<u>Soja</u>	<u>Autre foin cultivé</u>
96 348	37 461	217 548	31 756	293 758	25 668	157 387	17 515	25 271	644 106
6,2 %	2,4 %	14,1 %	2,1 %	19,0 %	1,7 %	10,2 %	1,1 %	1,7 %	41,6 %

Tiré d'Environnement Canada 1997a - Source : Statistique Canada 1991

Les principales productions animales sont les poules, les poulets, les porcs, les bovins et les veaux de boucherie ainsi que les vaches laitières. Les recettes monétaires du secteur agricole en 1992 représentaient 3,8 milliards de dollars, soit 16 % des recettes en agriculture au Canada.

En terme de gestion de la production et des activités, il est important de noter que la variabilité climatique n'est qu'une des sources de stress auxquelles l'agriculture doit faire face. Dans le cadre d'une étude sur l'adaptation au changement climatique avec deux groupes d'agriculteur ciblés, Bryant & al. (1997) notent que l'exploitant paraît peu préoccupé par d'éventuels changements climatiques. Cette faible préoccupation s'explique par le fait qu'il a appris au cours des dix, voir des 50 dernières années, à s'adapter à de nombreux changements successifs.

Du point vue de la variabilité climatique, les deux groupes rencontrés ont constaté, depuis dix ans, des hivers moins sévères, un manque d'eau et des sécheresses pendant certaines saisons, ainsi qu'une tendance à avoir des écarts et des variations plus importantes de température. Leurs craintes par rapport aux changements climatiques sont liées à l'intensité de certaines conditions comme les précipitations et la chaleur. Ils craignent également les impacts des conditions changeantes sur le développement des insectes et des maladies.

L'adaptation aux changements climatiques se traduit plus souvent qu'autrement par des solutions technologiques: choix de cultivars, adoption de meilleures techniques d'irrigation ou de drainage, etc...

6.3.1. Les cultures et la sensibilité au climat

Le climat est un facteur dont les conséquences sont difficiles à prévoir d'une année à l'autre sur la production végétale. Certains faits historiques, non exhaustifs, permettent d'en préciser l'ampleur. Les 2 et 3 août 1986, une gelée meurtrière avec des températures minimales atteignant les -3 à -6 °C a détruit la moitié des jeunes plants de maïs, de tabac, de pommes de terre et de fraises dans la vallée du Saint-Laurent et les Cantons de l'est. Au lac Saint-Jean, le gel a causé des pertes de 3 millions de \$(1986) dans les bleuetières (Environnement Canada, 1996a).

La pomoculture est une autre exemple de la fragilité du secteur agricole. Suite aux conditions climatiques particulières durant l'hiver de 1980-1981, la mortalité des pommiers observée dans les vergers au printemps 1981 et dans les années qui ont suivi fut une véritable catastrophe. Le taux moyen de mortalité au printemps 1981 se situait à 15% pour un total de 236 563 arbres morts (Centre météorologique du Québec,

1983). Un rapport provincial publié en juillet 1981 conclut que 35% des pommeraies furent endommagées avec des pertes évaluées à 300 millions (\$1981) échelonnée sur 10 ans (Environnement Canada,1987a).

Le Centre Météorologique du Québec (CMQ,1983) a précisé les causes de la mortalité du pommier pour la période de 1917 à 1981. Les résultats confirment que le froid intense, durant l'hiver, est un facteur commun aux cinq années (1918,1934,1957,1976,1981) réputées pour avoir été des périodes de mortalité du pommier dans le sud-ouest du Québec. Parmi les paramètres météorologiques qui affectent la mortalité du pommier, les degrés-jours de froid ressortent comme l'indicateur de mortalité qui offre la meilleure corrélation (tableaux 6.8 et 6.9).

Tableau 6.8 - Corrélation entre les températures et les années de dégâts

	<u>Temp. moy.</u>	<u>Pluie</u>	<u>Neige</u>	<u>Temp. min.</u>	<u>Temp. max</u>
Mars	- 0,13	- 0,07		- 0,14	- 0,11
Avril	- 0,08	+ 0,12		0,00	- 0,14
Mai	+ 0,01	+ 0,15		- 0,04	+ 0,04
Juin	- 0,04	- 0,12		+ 0,01	- 0,08
Juillet	- 0,02	+ 0,21		0,00	- 0,03
Août	+ 0,03	- 0,05		+ 0,02	+ 0,04
Septembre	- 0,12	+ 0,13		- 0,11	- 0,10
Octobre	- 0,06	- 0,10	+ 0,06	- 0,07	- 0,04
Novembre	- 0,14	- 0,11	+ 0,13	- 0,18	- 0,09
Décembre	- 0,25	- 0,06	+ 0,04	- 0,29	- 0,18
Janvier	- 0,28	- 0,02	+ 0,08	- 0,31	- 0,22
Février	+ 0,12	+ 0,40	- 0,09	+ 0,10	+ 0,14
Mars			- 0,08	+ 0,03	+ 0,07

Source : Centre Météorologique du Québec(1983)

Tableau 6.9 - Corrélacion entre les degrés-froids et les années de dégâts

	<u>-26 °C</u>	<u>-22 °C</u>	<u>-18 °C</u>	<u>-14 °C</u>	<u>-10 °C</u>	<u>-6 °C</u>	<u>-2 °C</u>	<u>+2 °C</u>	<u>+6 °C</u>	<u>+10 °C</u>	<u>+14 °C</u>
Mar											
Avr											
Mai								- 0,07	+0,04	+0,03	+0,02
Jun										+0,15	+0,14
Jul											-0,02
Août										-0,06	-0,16
Sept									-0,04	+0,05	+0,11
Oct							+0,06	+0,01	+0,02	+0,03	+0,04
Nov					+0,15	+0,22	+0,24	+0,24	+0,20	+0,16	+0,14
Déc	+0,52	+0,47	+0,49	+0,42	+0,35	+0,30	+0,27	+0,25	+0,25		
Jan	+0,50	+0,52	+0,43	+0,37	+0,33	+0,30	+0,29	+0,28	+0,28		
Fév	+0,34	+0,23	+0,16	+0,09	+0,03	-0,04	-0,08	-0,10	-0,12		
Mar	-0,02	-0,04	-0,06	-0,07	-0,06	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04	-0,05	

Source : Centre Météorologique du Québec(1983)

Selon l'étude, les pluies et les vagues de chaleur en février affichent des corrélations avec les dégâts aux pommiers pouvant atteindre 40 %. La régression linéaire multiple appliquée aux paramètres les mieux corrélés confirme l'importance du froid de décembre et de janvier en expliquant jusqu'à 79 % des variations observées. Ce pourcentage augmente à 82 % lorsqu'on ajoute les pluies de février. Les minimums quotidiens les plus bas enregistrés durant l'hiver(de -35 à -42 °C) contribuent aussi aux années de dégâts.

Dans la même veine, CMQ (1983) a tenté de déterminer, par un modèle statistique intégrant plusieurs régressions multiples, la probabilité régionale d'occurrence de la mortalité des pommiers pour une année donnée. Bien que certains aspects de la simulation statistique méritent d'être considérés avec une certaine prudence (tableau 6.10), elle montre bien le lien direct existant entre un dégel/gel hivernal d'importance et les dégâts aux pommeraies.

Tableau 6.10 - Années de fortes probabilités de mortalité du pommier

Années	Probabilité d'occurrence de mortalité (%)
1981	110*
1934	90
1918	58
1976	55
1968	46
1924	33
1943	24
1957	21
1925	20

Source : Centre Météorologique du Québec(1983)

Les résultats d'analyse de chacune des années de dégâts ont permis de mettre en évidence deux patrons climatiques distincts affectant le pommier. Un premier patron est celui d'un hiver continuellement froid pour les années 1917-18 et 1933-34. Le second patron est celui de l'année 1980-81 avec des mois de décembre et janvier très froids suivis d'un mois anormalement chaud et pluvieux en février.

6.3.2. L'agriculture sous un environnement 2xCO₂

De façon générale, les agriculteurs sont peu sensibles à la perspective d'un changement climatique important (Couillard,1990). Ils s'attendent à ce qu'il y ait un impact mais, en agriculture ils gèrent le quotidien plutôt que le futur (Bryant et al.,1997 ; Castonguay,1990). Leurs priorités actuelles sont surtout axées vers une régularisation de leur environnement, ils cherchent à apporter des ajustements à court terme pour minimiser les impacts des fluctuations interannuelles climatiques.

Les préoccupations des agriculteurs, en relation avec les changements climatiques, ont été soulevées par Couillard (1990). Leur plus grande inquiétude des agriculteurs tient au fait d'avoir à modifier de façon draconienne certaines de leurs habitudes de gestion d'entreprises. Ils

s'interrogent sur les effets d'une saison de croissance plus longue dans l'ensemble des zones agricoles au Québec, d'une augmentation des degrés-jour de croissance, d'un climat beaucoup plus chaud et sec qui amènerait une modification dans leur façon de gérer la ressource eau. Finalement, Couillard (1990) s'interroge sur l'impact d'un tel changement climatique sur les érablières à sucre et la production de sirop d'érable au Québec. La production du sirop d'érable étant en étroite relation avec les phénomènes de gel et de dégel, un accroissement des températures pourrait amener une importante modification dans le volume de production du sirop d'érable. Castonguay (1990) mentionne qu'un réchauffement du climat entraînerait une relocalisation de certaines cultures de même que l'abandon et la création de certaines autres.

Les effets d'un changement climatique sur diverses plantes agricoles ont été analysés en fonction de deux approches différentes et complémentaires. La première, basée sur le scénario classique des modèles de circulation générale, présente les répercussions potentielles d'un doublement de CO₂ dans l'atmosphère sur les ressources agricoles au Québec. La seconde, simulant un changement climatique artificiel, vise à déterminer l'importance de l'adaptation de familles végétales et la croissance des plantes sous des conditions contrôlées de CO₂ et de températures.

PREMIÈRE APPROCHE - Résultats basés sur les scénarios classiques

Singh & al. (1995) et Singh & Stewart (1991) ont examiné les impacts que pourrait engendrer un changement climatique au niveau des régions agricoles du Québec, notamment sur la production de légumineuses, de céréales et de fruits (pommes et raisins). Certaines régions telles que l'Outaouais, la région Nord de Montréal et Sud de Montréal ainsi que les Bois-Francs connaîtraient les rendements les plus élevés (Singh & al., 1995). La région du Bas Saint-Laurent serait la plus désavantagée. En regard aux conditions actuelles, Singh & Stewart (1991) estiment que les régions de l'Abitibi-Témiscamingue et du lac Saint-Jean seraient favorisées.

En utilisant les variables agroclimatiques, ces auteurs prévoient une augmentation de la saison de croissance d'environ 37 jours. Les unités thermiques-maïs et les degrés-jours de croissance s'accroîtraient durant la saison de croissance de 53 et de 59 % respectivement en moyenne. Les précipitations seraient de 25 %

plus abondantes et l'évapotranspiration actuelle et potentielle augmenterait d'environ 7,7 % et de 16,4 % (Singh & al.,1995). Singh & Stewart (1991) mentionnent que l'augmentation des précipitations se situerait autour de 92 mm pour Montréal et de 148 mm pour l'Outaouais. Les conditions agroclimatiques futures seraient semblables à celles qui prévalent le long de la frontière canadienne dans la partie Nord-Est des Etats-Unis (Singh,1987).

La période de maturation des cultures serait plus ou moins importante selon la région et la culture (Singh & al.,1995). En effet, elle pourrait atteindre 25 jours de plus pour la culture de pois-vert et ne dépasserait pas les 5 jours de plus pour l'orge dans la région du Saguenay/Lac-Saint-Jean (Singh & al.,1995). Le rendement serait bénéfique pour la culture du maïs et du sorgho, céréales de types C₄, tandis que le rendement diminuerait pour les céréales de type C₃ comme le blé, l'orge et l'avoine (Singh & al.,1995).

En ce qui a trait à la production de pommes, les résultats de Singh & Stewart (1991) montrent que cette dernière serait très bonne dans la plupart des régions du Québec, là où le terrain est propice pour la plantation des pommiers. Par contre, la production pour les raisins serait moins favorable (tableau 6.11).

DEUXIÈME APPROCHE - Résultats sous des conditions contrôlées de CO₂ et de températures

Au cours du prochain siècle, les plantes tant naturelles qu'agricoles, devront s'adapter à de nouvelles concentrations de CO₂ atmosphérique et à des températures plus élevées de 4 °C environ. Les niveaux d'adaptation seront possiblement fort variés (Potvin, 1993).

Tousignant & Potvin (1996) et Potvin & Tousignant (1996) ont simulé des changements climatiques en vue de quantifier l'importance relative des réponses génétiques et phénotypiques de deux populations de moutarde joncée (*Brassica juncea*).

Tableau 6.11 - Production actuelle et future de pommes et de raisin pour les régions agricoles au Québec

Région agricole	Scénario 2xCO ₂	Catégories d'opportunités de production (en pourcentage de la région)				
		<u>Improbable à la culture</u>	<u>Pauvre</u>	<u>Adéquat</u>	<u>Bon</u>	<u>Très bon</u>
<i>Pommes</i>						
Montréal sud	1951-80	61 %	26 %		12 %	1 %
	GISS	-	-	16 %	5 %	79 %
Montréal nord	1951-80	38 %	62 %	-	-	-
	GISS	-	-	5 %	7 %	88 %
Outaouais	1951-80	58 %	21 %	20 %	1 %	-
	GISS	-	-	-	37 %	63 %
Abitibi-Témiscamingue	1951-80	47 %	41 %	12 %	-	-
	GISS	-	-	-	30 %	70 %
Québec	1951-80	48 %	48 %	1 %	3 %	-
	GISS	-	-	-	-	100 %
Lac Saint-Jean	1951-80	21 %	79 %	-	-	-
	GISS	1 %	4 %	-	24 %	71 %
Bas Saint-Laurent	1951-80	8 %	52 %	40 %	-	-
	GISS	-	-	-	-	100 %
<i>Raisins</i>						
Montréal sud	1951-80	100 %	-	-	-	-
	GISS	61 %	26 %	-	2 %	11 %
Montréal nord	1951-80	100 %	-	-	-	-
	GISS	50 %	50 %	-	-	-
Outaouais	1951-80	100 %	-	-	-	-
	GISS	58 %	41 %	-	1 %	-
Abitibi-Témiscamingue	1951-80	100 %	-	-	-	-
	GISS	67 %	33 %	-	-	-
Québec	1951-80	100 %	-	-	-	-
	GISS	48 %	49 %	-	-	3 %
Lac Saint-Jean	1951-80	100 %	-	-	-	-
	GISS	87 %	13 %	-	-	-
Bas Saint-Laurent	1951-80	100 %	-	-	-	-
	GISS	8 %	92 %	-	-	-

Source : Singh & Stewart (1991)

Leurs résultats ont démontré que les changements graduels et directionnels de l'environnement ont exercé une pression sélective sur *Brassica juncea*. La réponse de la biomasse du système reproducteur a diminué au cours des sept dernières générations (figure 6.2). L'environnement simulé aurait pour effet l'extinction locale de *Brassica juncea* par l'échec reproductif. Cette espèce n'a pas su s'ajuster de façon évolutive ou phénocopique aux changements simulés.

Par ailleurs, Stewart & Potvin (1996) ont mis en évidence l'effet de l'enrichissement de CO₂ sur l'interaction entre deux communautés végétales: *Trifolium repens*, une légumineuse fixatrice d'azote et la seconde *Poa partensis*, une herbacée de type C₃. Ainsi, le nombre de plants de *Trifolium* augmente de l'ordre de 200 % sous des conditions de CO₂ élevé. Cependant, le pâturin (*Poa*) n'augmente, lui, que de 40 %.

On peut également mentionner les études de El Maayar & al. (1997) sur l'effet fertilisant du CO₂ sur les rendements agricoles et de Singh & al. (1997) sur l'accélération de la maturation et du déficit hydrique sous un régime de 2xCO₂ et de la problématique des substitutions de cultivars.

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat du secteur AGRICULTURE au Québec est MOYEN* car

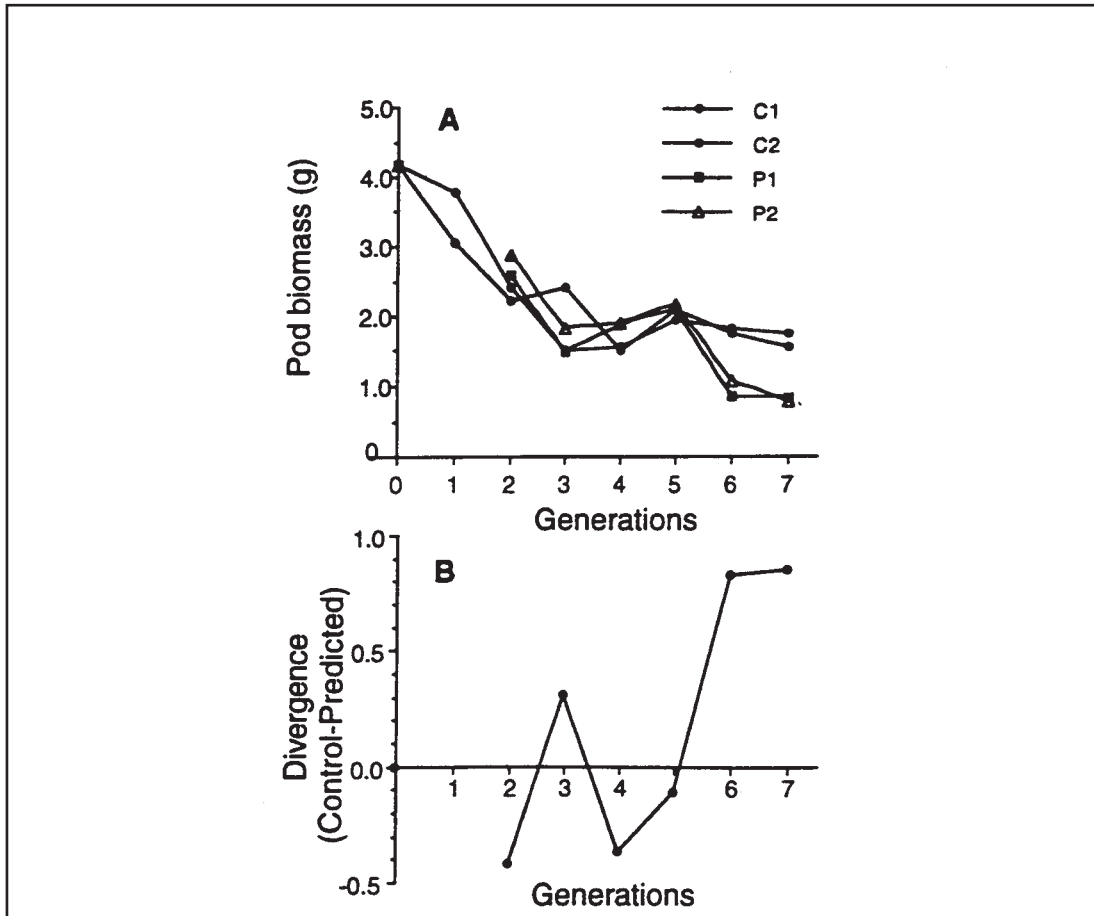
les effets positifs et négatifs des fluctuations quotidiennes du climat sont connus du milieu agricole à un niveau local ou régional. Sa capacité d'adaptation à court terme est grande

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur l'AGRICULTURE est MOYEN car

un bon nombre d'études quantitatives de qualité existent traitant des conséquences d'un doublement de CO₂ sur les rendements de plusieurs cultures au Québec et la réponse de quelques plantes

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissance sur le sujet selon 5 catégories : très bon, bon, moyen, faible et très faible.

Figure 6.2 - Poids moyen de biomasse Brassica juncea pour sept générations (a) et la divergence entre la biomasse estimée et obtenue sous des conditions (b) artificielles



Source : Tousignant & Potvin, 1996

6.4. Écosystèmes / milieux humides

Les écosystèmes peuvent être regroupés selon trois entités : aquatiques, forestiers et agricoles. La présente section traite davantage des écosystèmes aquatiques et des milieux humides du Saint-Laurent. Les informations concernant les écosystèmes forestiers et agricoles ont été intégrées à l'intérieur des sections agriculture (section 6.3) et foresterie (section 6.7).

En définition, les milieux humides constituent des zones de transition entre l'eau et la terre qui sont, soit saturées d'eau, soit inondées par les marées ou les crues printanières. Outre leur importance écologique largement reconnue, les milieux humides jouent un rôle non négligeable dans la régularisation des régimes hydrologiques et sédimentaires du fleuve, de même que pour le transfert des contaminants dans la chaîne alimentaire (Bouchard & Millet, 1993).

Il existe trois types de milieux humides:

- herbier aquatique (végétation flottante submergée ou émergente);
- marais (herbier inondé périodiquement jusqu'à une profondeur de 2 m);
- marécage (présence d'arbres et d'arbustes adaptés aux inondations prolongées).

La superficie totale des milieux humides le long du Saint-Laurent est de 79 700 ha dont 79 % se trouvent dans le tronçon fluvial (Gratton & Dubreuil,1990), la moitié sont des herbiers aquatiques. Le lac Saint-Pierre regroupe la portion la plus élevée de terres humides du Saint-Laurent (Harvey,1996). Près de 2 500 espèces de plantes vasculaires sont présentes au Québec, dont la moitié dans le corridor du Saint-Laurent (Gratton & Dubreuil,1990).

La perte de milieux humides sur le fleuve, entre 1950 et 1978, totalise 3 643 ha, soit 6,2 % de la superficie totale des milieux humides inventoriés en 1950 sur le Saint-Laurent (Environnement Canada,1991). Cette perte est attribuable à l'empiètement anthropique et aux variations des niveaux d'eau (Jean & al.,1992).

6.4.1. La sensibilité au climat des écosystèmes et des milieux humides

Concernant l'aspect d'un changement climatique, les scientifiques ont peine à imaginer les conséquences d'un tel événement sur les écosystèmes aquatiques. Au Québec, certaines observations ponctuelles ainsi que des scénarios hypothétiques permettent d'en préciser l'ampleur. La répartition des espèces dépend, dans une large mesure, des conditions climatiques qu'elles peuvent supporter.

Bertrand & Doré (1994) rapportent que de nombreuses espèces végétales ont atteint leur limite de distribution sur le territoire québécois et sont en situation précaire à un endroit ou l'autre de l'aire de répartition. Dans le cas d'une variation climatique, les écosystèmes les plus résistants aux changements climatiques prendront le plus de temps pour s'adapter ou migrer (Mercier, 1993).

Par contre, les écosystèmes du Saint-Laurent sont aussi largement dépendants des variations des niveaux d'eau. Par le biais d'études trop peu nombreuses (Jean et Bouchard,1996 ; Arsenault,1995), des pistes nous indiquent que l'alternance des fluctuations extrêmes périodiques et saisonnières des niveaux d'eau est essentielle à la productivité des habitats naturels et au maintien de la diversité des espèces végétales et animales (Hudon & Armellin,1995; Keddy & Reznicek,1986).

Dans les milieux humides, le changement est la règle ; c'est la variabilité qui est importante à la survie (Robichaud, 1997 - en cours).

Les variations de niveaux d'eau sur de longues périodes entraînent une migration vers le haut ou le bas de la végétation riveraine (Environnement Canada, 1997b). La stabilisation des eaux à des niveaux élevés au lac Saint-François, depuis le début des années soixante, expliquerait les changements de composition, de distribution et d'abondance des plantes aquatiques entre 1960 et 1973 (Owen & Wile, 1975).

Les premières observations écologiques sur le Saint-Laurent en période de bas niveau d'eau à Montréal proviennent du Frère Marie-Victorin (1943) notamment durant l'épisode de l'été de 1931. Il rapporte qu'à Montréal, l'étiage était, au 1^{er} juillet, à un niveau qui n'avait pas été atteint depuis 1860 (à 147,5 cm au-dessous du niveau moyen pour le mois de juin) et la baisse a continué graduellement jusqu'à l'automne. Les observations écologiques précisent un bouleversement au niveau de la répartition de la flore riparienne des îles en face de Longueuil et Boucherville

La courte période de 1972 à 1976 constitue également une période charnière dans notre connaissance du lien entre les écosystèmes et les hauts niveaux d'eau. Jean & Bouchard (1991), Jean & al. (1992) et Centre Saint-Laurent (1994) mentionnent les répercussions négatives sur les milieux humides de la région du lac Saint-Louis durant cette période où le niveau était de 0,5 m supérieur aux niveaux moyens de 20 ans.

Armellin & al. (1994) attribuent à cette période la dégradation majeure du couvert forestier et arbustif, le déplacement d'herbiers émergents et la perte d'habitats fauniques terrestres. Lemieux (1993) a noté les mêmes impacts négatifs de la période 1972-1976 sur le périmètre forestier de l'île de Dowker et la perte de forêts riveraines dans la région de Montréal. Couillard & al. (1985) firent les mêmes constatations pour l'Érable argenté autour du lac Saint-Louis. Desrosiers & Bégin (1992) et Bertrand (1996) vont dans la même direction. Lemieux (1993) attribue la cause du dépérissement des forêts riveraines à la montée des eaux qui aurait eu comme effet de réduire l'accessibilité d'oxygène au système racinaire des arbres et arbustes.

Les bas niveaux d'eau extrêmes, s'ils se maintiennent pendant plusieurs années consécutives, peuvent entraîner des conséquences négatives sur les milieux humides (Dumont & Léveillé, 1995).

Le sol laissé à nu devient vulnérable à l'érosion. L'action mécanique des vagues, de la glace et des courants notamment sur les hauts-fonds et les berges en pente douce, peut diminuer, annuler ou amplifier en fonction des variations annuelles ou saisonnières (Environnement Canada, 1997b).

De telles conséquences extrêmes ont été observées durant la période de juillet à octobre 1995. Pour retrouver des conditions similaires, il faut remonter au début des années 1960 et il n'existe pas de source de référence documentant les effets de cette période historique de très faible hydraulité (Dumont & Léveillé, 1995).

La reproduction, l'alimentation et l'élevage de la sauvagine dépend des niveaux favorables dans les plaines de débordement en périodes critiques (Dumont & Léveillé, 1995). De plus, les habitats servant d'aire de reproduction pour la plupart des espèces de poissons du Saint-Laurent peuvent être difficilement accessibles en période de faibles niveaux d'eau (Cotton, 1995) et entraîner une baisse de la force des classes d'âge. Les frayères de la rivière Sainte-Anne en est un cas précis. Mailhot & al., (1988) et Fortin & al. (1992) ont démontré l'existence d'une relation étroite entre les fortes cohortes de Poulamon atlantique et les forts régimes hydrauliques du Saint-Laurent et de la rivière Sainte-Anne combinés. La formation de bancs de sable attribuée aux faibles débits du fleuve et de la rivière Saint-Anne, durant les mois de décembre et de février, rendent l'accès difficile au site de frayes par les géniteurs.

Au printemps et à l'été 1995, les habitudes de la faune ont été fortement modifiées, en particulier concernant les lieux et les périodes de reproduction ou de concentration dans les milieux d'eau lente comme dans les milieux d'eau vive (Dumont & Léveillé, 1995). Les principales observations rapportées par Dumont & Léveillé (1995) portent sur la non-utilisation de la frayère de la rivière aux Pins, plaine inondable généralement occupée par une vingtaine d'espèces; il y a eu une réduction des superficies des haltes migratoires avec des arrêts plus courts.

Si une telle situation devait persister, ses effets pourraient être majeurs à long terme. Dumont & Léveillé (1995) en résument les effets potentiels :

- une dégradation de la qualité de l'eau ;
- un vieillissement accéléré de la végétation aquatique et riparienne ;
- les plaines d'inondation passeraient de prairie humide à arbustaie ;

- un envahissement d'une certaine portion de la rive par des plantes indésirables ;
- un assèchement des marais et des marécages ;
- une intensification du processus d'exhaussement du lit de ces milieux.

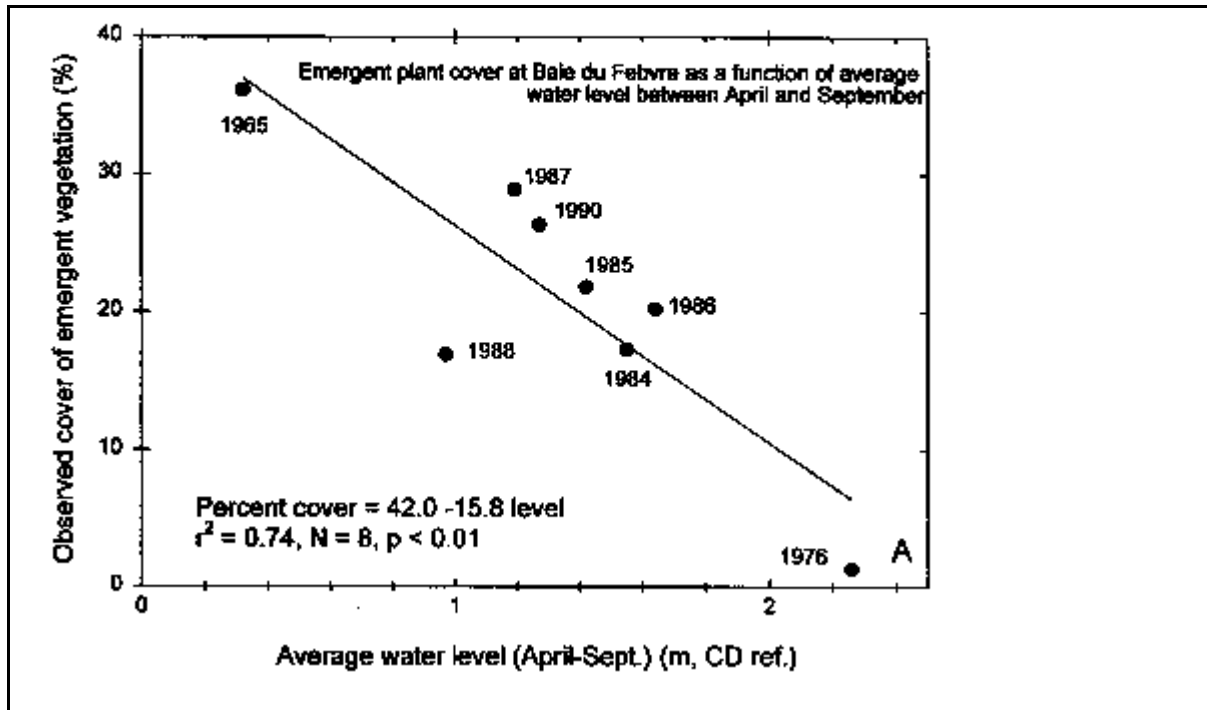
Ces auteurs mentionnent également que certains aménagements fauniques (canaux de fraie, passes migratoires, marais aménagés, haltes migratoires, etc.) comptent sur un apport d'eau du fleuve à un certain moment et perdraient leur efficacité ou nécessiteraient la mise en place d'équipements supplémentaires coûteux advenant la persistance de bas niveaux d'eau. De plus, dans les marais asséchés, il pourrait y avoir réduction des aires d'hivernage de certaines espèces de grenouille. En contrepartie, l'érosion des berges de certaines îles serait probablement moindre.

L'année 1995 est une période identifiée où les changements d'habitude de la faune ont été soulignés (Dumont & Léveillé, 1995). Les modifications du niveau d'eau, l'assèchement ou l'inondation des berges, ont également des conséquences importantes sur les populations de Rat musqué, particulièrement lorsque ces événements se produisent lors de la saison hivernale ou au printemps lors de la mise bas (Bélangier, 1986).

Suite à cette période de bas niveaux d'eau de 1995, Hudon (1997) a fait les observations suivantes concernant les herbiers aquatiques du secteur compris entre Montréal et Trois-Rivières:

- les niveaux d'eau observés sont demeurés sous le zéro des cartes et très loin de la frange habituelle de la végétation émergente;
- une large bande de la rive entre le marais et l'eau a été asséchée;
- dans le couloir fluvial, cet assèchement a entraîné une perte de 22 % des surfaces disponibles, pour la végétation submergée dense, soit une superficie de 2,7 à 3,5 km²;
- en fonction de la morphologie des côtes le long du fleuve Saint-Laurent, la perte de surfaces submergées a pu atteindre 70 %;
- une forte relation inverse linéaire existe (coefficient R² de 0,74), entre le couvert occupé par les plantes émergentes avec le niveau d'eau d'avril à septembre (figure 6.3).

Figure 6.3 - Pourcentage du couvert occupé par les plantes émergentes à Baie du Febvre en fonction des niveaux d'eau (avril - septembre)



Source: Hudon (1997)

L'analyse de la répartition de la végétation aquatique localisée à des endroits spécifiques dans le tronçon fluvial, un an après la période de bas niveaux d'eau, démontre que la distribution et l'abondance de la végétation émergente n'ont pas été affectées par la période sèche (Hudon, 1997).

Cependant, pour les plantes submergées, Hudon (1997) constate que la période de faible hydraulité observée durant l'été 1995 a eu comme conséquence une diminution des peuplements de *Vallisneria americana* en faveur de *Alisma gramineum*, alors que les surfaces occupées par *Myriophyllum sp.* ne semblent pas avoir été affectées. Cette observation suggère que les espèces submergées ont différents niveaux de tolérance à la sécheresse et confirme les implications sur le maintien de la diversité des communautés de plants sous un stress environnemental.

En dehors du contexte aquatique, Morneau & al. (1997) ont examiné l'influence du climat sur la distribution des oiseaux nicheurs du Québec tout en tentant d'identifier les espèces montrant une grande sensibilité. L'approche méthodologique consistait à déterminer le degré d'association entre la répartition de 65 espèces d'oiseaux nicheurs et des variables climatiques en supprimant statistiquement l'effet de l'affectation

du sol. Quelque 601 parcelles de l'Atlas des oiseaux nicheurs du Québec (Gauthier & al.,1995) ont été associées à 212 stations climatologiques.

Les résultats préliminaires suggèrent que les facteurs climatiques à eux seuls expliquent 11,4 % de la variance de la matrice des espèces et que les paramètres associés aux températures sont prédominants sur ceux décrivant les précipitations. Les espèces les plus sensibles semblent être des migrateurs néotropicaux insectivores. Parmi les espèces résidentes, seule la sittelle à poitrine blanche possède une répartition particulièrement liée aux variables climatiques.

6.4.2. Les écosystèmes et les milieux humides sous un environnement 2xCO₂

Les études concernant les répercussions d'un éventuel changement climatique sur les écosystèmes aquatiques visent principalement les impacts que pourraient engendrer une réduction du débit d'eau du Saint-Laurent.

Les résultats issus des modèles de circulation générale permettent d'estimer les quantités de précipitation et les apports net en eau pour les Grands Lacs ainsi que les débits anticipés. Dans un contexte de 2xCO₂, l'augmentation des températures de 4 °C et la baisse des précipitations entraîneront une réduction de 40 % des débits en provenance des Grands Lacs (CMI,1993). Une telle baisse des débits aurait le plus de conséquences négatives à l'intérieur du tronçon fluvial du Saint-Laurent. Elle aurait comme effet de diminuer la qualité des eaux et de provoquer la progression du littoral au détriment de l'assèchement des terres humides adjacentes (Jean,1990).

L'essentiel du débit du fleuve Saint-Laurent est concentré dans le canal de navigation. Du lac Saint-Louis à Trois-Rivières, en raison de la topographie même du fleuve, il est probable que les herbiers actuels disparaîtraient également et que ces milieux seraient remplacés par d'étroites bandes en bordure des chenaux profonds (naturels ou entretenus). L'importance de ces bandes serait alors fonction du régime d'écoulement au cours du cycle annuel. La perte de milieux humides pourrait être chiffrée selon diverses hypothèses de réduction du débit du fleuve et de ses principaux tributaires. La topographie du fleuve et de ses rives est bien connue, des courbes de remous sont disponibles et des modèles hydrodynamiques ont été développés pour certaines sections du fleuve, notamment pour le lac Saint-Pierre (e.g. INRS-EAU)

Les effets de bas niveaux d'eau comme ceux de 1995, sur plusieurs années, pourraient entraîner sans doute le vieillissement accéléré de la végétation aquatique et riparienne: celle des plaines d'inondation passerait de prairie humide, propice à la faune aquatique, à arbustaie (Cotton,1995 ; Dumont & Léveillé,1995; Hudon,1997).

Les petits marais sont, règle générale, plus importants que les grands pour la sauvagine (Diamond & Brace,1991). Or, la vulnérabilité au changement des niveaux d'eau (assèchement ou inondation) est plus grande dans les petits marais, la réduction de leur superficie ou leur disparition complète aura un effet notable sur la sauvagine (Bertrand & Doré, 1994). La diminution du nombre d'amphibiens serait due à la perte d'habitat suite à l'assèchement de la plaine inondable, car ces vertébrés sont étroitement associés aux milieux où ils trouvent les conditions environnementales favorables à leur reproduction, leur croissance et leur alimentation (Benoît & al., 1987).

Certains aménagements fauniques (canaux de fraie, passes migratoires, etc.) comptent sur un apport d'eau du fleuve à un certain moment et perdraient leur efficacité ou nécessiteraient la mise en place d'équipements supplémentaires coûteux (Cotton,1995).

Une augmentation des températures et des taux d'évaporation pourrait favoriser une hausse de la décomposition de la matière organique dans les sols au profit d'une réduction de la superficie des terres humides (Lapel groupe-conseil,1989). La hausse des températures favoriserait la remontée dans le golfe de certaines espèces dont la distribution actuelle se situe au sud du golfe du Maine (Jean,1990). Par ailleurs, la direction et la force des vents dominants, de même que la dynamique des glaces, sont des paramètres susceptibles de varier en fonction des changements climatiques anticipés et susceptibles d'avoir un impact non négligeable dans l'écosystème du Saint-Laurent.

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat du secteur ÉCOSYSTÈMES ET MILIEUX HUMIDES au Québec est MOYEN^{*} car

Pour des événements spécifiques et ponctuelles de bas niveaux d'eau sur le Saint-Laurent, on connaît assez bien l'ampleur des impacts sur les écosystèmes et les milieux humides. Peu de choses ont été faites ailleurs au Québec (à l'exception de la faune avienne) et quasiment rien dans le Grand Nord Québécois

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur les ÉCOSYSTÈMES ET LES MILIEUX HUMIDES est FAIBLE car

On ne peut trouver que des évaluations qualitatives des impacts potentiels d'un changement climatique sur les écosystèmes et les milieux humides

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : très bon, bon, moyen, faible et très faible

6.5 Les pêcheries

Le Saint-Laurent se classe au quatrième rang mondial pour la diversité d'espèces de poissons avec un total de 185 espèces cohabitant dans le Saint-Laurent contre 2 000 dans l'Amazone, 318 pour l'Orénoque, 306 pour le Mississippi et 141 pour le Gange (tableau 6.12). De ce nombre, on retrouve 87 espèces d'eau douce, 80 espèces marines et 18 espèces diadromes présentes en eau douce ou en eau salée selon leur stade d'évolution (Ouellette, 1990).

Tableau 6.12 - Estimation du nombre d'espèces de poissons par grand fleuve

	<u>Nombre d'espèces de poissons</u>	<u>Eau salée</u>	<u>Eau douce</u>	<u>Espèces commerciales</u>
Amazone	2 000			
Orénoque	318			
Mississippi	306	46	260	10
<i>Saint-Laurent</i>	185	98	87	47
Gange	141			
Sénégal	113		113	
Colorado	100			
Danube	100			30
Volga	88			
Fraser	83	36	47	14
Rhône	70			
Rhin	61			
Mackenzie	53			
Murray	50			

Adapté d'Environnement Canada(1997a)

A) Activité de pêche sportive

L'importance de la pêche sportive dans le fleuve comme activité sociale et économique n'est pas à négliger. Mailhot (1990) et le MLCP (1987a) résument les principales caractéristiques de la pêche sportive au Québec. En 1985, près de 21 % des Québécois âgés de 15 ans et plus ont pratiqué au moins 1 fois la pêche sportive au Québec avec une estimation, pour l'année 1994, de 1 082 827 pêcheurs sportifs (Environnement Canada,1997a). Cet effort de pêche totalise 15 288 000 jours-pêcheurs. Dans le fleuve Saint-Laurent, la pression de pêche exprimée en nombre de jours-pêcheurs par hectare est de 29 dans la région de Montréal, 7 dans le secteur Trois-Rivières et de moins d'une journée dans le secteur de Québec. Les captures de pêche sportive au Québec sont d'environ de 35 403 tonnes/an en 1992 (Gouvernement du Québec, 1995).

Entre 1983 et 1988, il y avait en moyenne annuellement plus de 200 000 pêcheurs représentant un effort de pêche de 2,4 millions de jours et qui ont récolté 3260 tonnes de poissons (Mailhot,1989). Par rapport à l'ensemble des activités liées à la pêche sportive au Québec, cela représente 18 % du nombre de pêcheurs, 16 % de l'effort de pêche mais seulement 9 % des prises (Centre Saint-Laurent,1996). C'est dans le tronçon fluvial, notamment au lac Saint-Louis, que l'effort de pêche est le plus important. Le secteur de Montréal, représente 85 % du nombre de pêcheurs, 83 % de l'effort de pêche et 80 % de la récolte effectuée en eaux douces dans le fleuve.

L'importance économique de cette activité est difficile à chiffrer. Par contre, en 1986, les activités concernant la pêche sportive représentent dans la seule région du lac Saint-Pierre, des dépenses directes de cinq millions de dollars (MLCP,1987a) et des retombées économiques globales de 70 millions de dollars (MLCP, 1988). En aval du lac Saint-Pierre, entre Grondines et l'Île d'Orléans, la pêche sportive est très peu développée pour des raisons d'accès, de configuration du fleuve et d'amplitude des marées.

Sur les plans d'eau intérieur (lacs et rivières) la pêche sportive occupe une place importante. Les salmonidés constituent la base de la pêche sportive au Québec, une activité pratiquée principalement dans la ceinture verte au nord du fleuve (Dumont, 1997). Cette ceinture regroupe la majorité des parcs, réserve, zones d'exploitation contrôlée et pourvoiries au Québec. Une étude sur la pêche sportive au saumon de la région de la Gaspésie et de la Baie des Chaleurs indique que, de 1990 à 1995, une moyenne annuelle de 6 500 saumons ont été capturés dans 12 rivières pour un effort moyen de pêche de 25 000 jours-pêche (Gagnon, 1997).

Malgré la difficulté d'accès au fleuve, la pêche à partir de quais est importante. La fréquentation totale dans la baie des Chaleurs est de 577 000 jours-pêcheurs (Gagnon, 1997) ce qui représente moins de 4 % de la fréquentation totale au Québec. Jadis, la pêche sportive à l'Éperlan arc-en-ciel (*Osmerus mordax*) dans l'estuaire du Saint-Laurent était abondante. Aujourd'hui, peu d'endroits sont propices à cette pêche dans le secteur du fleuve délimité en amont par le pont de Québec et le quai de Rimouski, surtout à cause de sa faible abondance. L'estimation globale de l'effort de pêche à l'éperlan pour 1991 était de 33 695 heures, pour une récolte de 6,6 tonnes métriques (Robitaille & al.,1994).

Dans l'estuaire maritime et le golfe, la cueillette de mollusques est considérée comme très importante dans les secteurs coquilliers. Dans l'estuaire maritime et le golfe, 52 % des 174 secteurs sont ouverts à la cueillette ; les mollusques des autres secteurs sont considérés comme impropres à la consommation (Centre Saint-Laurent, 1996).

La pêche hivernale, lorsque les plans d'eau sont recouverts de glace, est une activité très populaire, importante et bien organisée. Sur le Saguenay, le nombre de cabanes est passé de 227 en 1979 à 1521 en 1991 (André Talbot et associés, 1989).

Elle est très populaire dans la région du lac Saint-Pierre, notamment à l'embouchure de la rivière Sainte-Anne, pour la pêche aux petits poissons des chenaux, le poulamon. Dans l'archipel de Montréal, le nombre de sites de pêches sous la glace répertoriés est passé de 72 au début des années 1970 à 125 en 1985. La perchaude constitue la principale espèce pêchée avec plus de 90 % des captures et des retombées économiques annuelles dépassant probablement les 15 millions de dollars (Tremblay & Dumont, 1990).

L'importance du développement économique et social le long des berges du fleuve, depuis le début du 20^{ième} siècle, a contribué à freiner l'essor de la pêche sportive. Les multiples contraintes touchant cette activité sont principalement liées à la destruction des habitats et des frayères, la bio-accumulation des substances toxiques dans la chaîne alimentaire et l'accessibilité réduite au milieu fluvial pour les adeptes de la pêche sportive (Centre Saint-Laurent, 1996).

B) Activités de pêche commerciale

Le Saint-Laurent compte parmi les fleuves dont les débarquements de la pêche commerciale sont les plus importants: **52 457 t/an** pour le Saint-Laurent, contre 12 000 pour l'Orénoque, 819 pour le Rhone, 10 818 pour le Mississippi, 605 100 pour le Mékong et 26 772 pour le Danube (tableau 6.13).

Tableau 6.13 - Pêche commerciale dans le Saint-Laurent en comparaison avec les grands fleuves du monde

	<u>Débarquements (tonnes/an)</u>
Mékong (1991)	605 100
Niger (1985)	108 000
Saint-Laurent* :	
eau salée (1994)	51 222
eau douce (1994)	1 235
Danube (1981)	26 772
Orénoque (1984)	12 000
Parana (Brésil) (1945-1984)	11 120
Mississippi (1978-1985)	10 818
Rhône (1985)	819
* <u>Note</u> : ces chiffres doivent tenir compte du fait que la pêche commerciale de l'estuaire et du golfe Saint-Laurent (eau salée) est pris en compte	
Tiré d'Environnement Canada (1997a)	

L'activité de la pêche commerciale en eau douce et maritime, sur le fleuve, prend son importance économique au niveau local.

Le territoire de pêche en eau douce s'étend de Cornwall à la pointe est de l'Île d'Orléans. En 1991, 108 permis de pêches commerciale ont été émis, dont 42 seulement pour la région du lac Saint-Pierre. Le nombre de pêcheurs commerciaux est en déclin depuis 1948. L'importance économique de cette activité est difficile à quantifier. Les retombées économiques pour la région du lac Saint-Pierre sont évaluées à 5,7 millions de dollars permettant de générer du travail équivalent à 135 personnes-années.

De Cornwall à l'Île d'Orléans, les pêcheurs ont capturé et débarqué 965 tonnes de poissons en 1992, en baisse de 180 tonnes depuis 1986. C'est dans le secteur du lac Saint-Pierre que les débarquements sont les plus importants avec 575 tonnes en 1992, soit 60 % des captures totales en eaux douces (tableau 6.14). La valeur des débarquements des espèces dulcicoles capturées dans le fleuve Saint-Laurent est estimée en 1992 à 3,3 millions de dollars.

Tableau 6.14 Valeurs des débarquements par secteur de pêche commerciale en eau douce, 1992.

Secteur de pêche	Captures (tonnes)	Valeur économique
Lac Saint-Pierre	575	1 742 002\$
Trois-Rivières	221	794 149\$
Québec	57	266 773\$
Lac Saint-François	56	217 312\$
Bassin de La Prairie	36	136 186\$
Lac Saint-Louis	20	80 713\$

Source : MAPAQ (1993) et CSL (1996)

Par rapport à la pêche commerciale en eau douce, la pêche maritime a une importance économique locale majeure et demeure tributaire des facteurs qui affectent la ressource. Le territoire caractérisé par la pêche commerciale maritime s'étend de l'Île d'Orléans à Blanc-Sablon sur la rive nord et englobe la baie des Chaleurs sur la rive sud (Centre Saint-Laurent, 1996). Même si le secteur de la pêche maritime est marginal dans l'économie du Québec, avec moins de 1 % du produit intérieur brut, il demeure extrêmement important au niveau régional.

Le tableau 6.15 présente l'importance régionale des quatre secteurs de pêche commerciale en milieu marin au Québec. Sur le plan de la répartition spatiale, le secteur de la Gaspésie est de loin le plus important pour le nombre de pêcheurs commerciaux, l'importance des captures et la valeur économique des débarquements.

Tableau 6.15 - Caractéristiques économiques de la pêche commerciale maritime en 1994

	<u>Secteur Saint- Laurent</u>	<u>Secteur Côte Nord</u>	<u>Secteur Gaspésie</u>	<u>Secteur Îles de la Madeleine</u>	<i>TOTAL</i>
Nombre pêcheurs	94 (2%)	1460 (29%)	2150 (43%)	1290 (26%)	4994
Nombre bateaux québécois actifs/immatriculés	18/31	339/649	482/687	401/419	1209 sur 1786
<u>Débarquements :</u>					
Quantité - tonnes métriques	746 (1%)	11 395 (22%)	24 783 (48%)	14 298 (28%)	51 222
Valeur en millions \$ CAN	2,2 (2%)	34,8 (27%)	64,3 (49%)	28,7 (22%)	130,0 M
Nombre maximal d'employés dans les usines et poissonneries	221 (5%)	1035(26%)	1697 (42%)	1109 (15%)	4062
Production des usines (en tonnes métriques)	7788 (22%)	5462(15%)	13 197 (37%)	9041(26%)	35 488
<u>Mollusques/crustacés</u>					
- en tonnes métriques	10 (-)	10 300 (32%)	18 026 (56%)	3863 (12%)	32 189
- valeur en millions \$	-	34,2 (29%)	57,7 (49%)	25,9 (22%)	117,8
<u>Poissons de fond :</u>					
- en tonnes métriques	-	355 (4%)	3911(44%)	4622(52%)	8888
- valeur en millions \$	-	0,5 (7%)	6,0 (75%)	1,3 (17%)	7,8
<u>Poissons pélagiques :</u>					
- en tonnes métriques	608 (6%)	911(9%)	1823 (18%)	5873 (58%)	10 126
- valeur en millions \$	1,8 (40%)	0,5 (11%)	0,8 (18%)	1,4 (31%)	4,4
Espèce la plus importante en quantité (% de la région)	Anguille (33%)	Crabe neige (56%)	Crevette (40%)	Sébaste (31%)	Crabe neige (29%)
Espèce la plus importante en valeur (% de la région)	Anguille (58%)	Crabe neige (79%)	Crabe neige (57%)	Homard (59%)	Crabe neige (56%)

Source : Environnement Canada, 1997a

Ainsi, cette activité regroupe au total de 4 994 pêcheurs et 4 062 employés en usines ou poissonneries. La flotte de pêche active compte 1 209 embarcations. Pour l'année 1994, les débarquements totalisaient 51 222 tonnes métriques, soit une valeur de 130 millions de dollars (Environnement Canada, 1997a; Pêches & Océans, 1995). Des statistiques de 1986 font référence à 7 000 pêcheurs et à une centaine d'industries de transformation dont la production se chiffrait à 207 millions de dollars (Gouvernement du Québec, 1989).

Le secteur de la transformation est d'une importance primordiale. En 1992, ce secteur employait 4 698 personnes et la valeur des 42 000 tonnes de produits marins transformés atteignait près de 200 millions de dollars (Pêches et Océans, 1992). Pour cette même année, la région maritime comprenait 103 usines de transformation dont 43 usines étaient localisées à Montréal et à Québec (Pêches et Océans, 1993b).

Sur le plan de la répartition spatiale, c'est en Gaspésie que les débarquements sont les plus importants (tableau 6.15) avec des captures de 33 568 tonnes, suivie des Îles-de-la-Madeleine avec 23 608 tonnes, de la Côte-Nord avec 12 505 tonnes et, loin derrière, du Saint-Laurent avec 746 tonnes.

Une trentaine d'espèces compose le stock des débarquements. Le volume total des débarquements de mollusques et crustacés est de loin le plus important avec de 32 000 tonnes métriques (63 % des débarquements annuels) en 1994 pour une valeur brute de 117 millions de dollars.

L'industrie des pêches québécoises faisait face à une ressource à la baisse en 1992 (Centre Saint-Laurent, 1996). Le volume débarqué a chuté de 28 % depuis 1987 pour atteindre les 70 143 tonnes. Cette diminution provient essentiellement des poissons de fond dont les débarquements ont baissé de près de 26 000 tonnes depuis cinq ans. Suite à cette baisse, certaines entreprises de pêche ont cessé leur activité, d'autres ont abandonné l'espèce de fond et orienté leurs efforts vers d'autres espèces. Ainsi, entre 1987 et 1991, le nombre d'entreprises de pêche tirant leur principal revenu des débarquements de poisson de fond est passé de 786 à 404, soit une baisse de 49 % (Centre Saint-Laurent, 1996). Le secteur de la transformation des produits de la pêche en régions maritimes subit les contrecoups de la diminution de la ressource. MAPAQ (1993) affirme que la surcapacité est évidente et estime que le taux moyen d'utilisation se situe aux environs de 45 % de la capacité des installations.

Il est important de noter

que, parmi les poissons de fond, les stocks de Morue Atlantique se sont effondrés et la fermeture de cette pêche dans le sud du golfe a été décrétée le 1^{er} septembre 1993. Cette décroissance pourrait s'expliquer par plusieurs facteurs dont les plus probables sont : la surpêche, une surestimation de la biomasse par de fausses déclarations des entreprises de pêches, une température de l'eau inhabituellement froide ou d'autres facteurs environnementaux (MAPAQ, 1993).

6.5.1. La sensibilité au climat des pêcheries

L'aspect économique de la pêche sportive et commercial ainsi que l'abondance de la ressource du secteur des pêcheries demeurent sensibles aux variables abiotique et biotique. Les sections suivantes sur les pêcheries en eau douce et en eau salée mettent en relief l'influence des facteurs environnementaux (température, niveaux d'eau et vents) ainsi que les conséquences des variations climatiques sur certains traits du cycle vital de quelques espèces.

La force des classes d'âge des cohortes des diverses espèces de poissons d'eau douce comme d'eau salée est affectée par les variations plus ou moins sévères des conditions climatiques. La température est, sans l'ombre d'un doute, un facteur déterminant à toutes les étapes du cycle vital des poissons, qu'il s'agisse:

- de la reproduction;
- de l'incubation;
- de la survie des larves;
- de la disponibilité des ressources alimentaires;
- du synchronisme nécessaire entre l'abondance de ces ressources et le passage de certaines étapes critiques de la croissance, de la maturation sexuelle ou de la migration.

Pêcheries en eau douce

L'abondance et la productivité d'une population de poissons en eau sont également dépendantes du volume d'eau et de ses composantes (profondeur et surface). Lavoie & Talbot (1988) soulignent l'importance des diverses combinaisons de ces paramètres dans sa classification des modes de reproduction des poissons d'eau douce du Québec. En effet, dans les eaux douces du Saint-Laurent, des dizaines d'espèces de poissons se reproduisent au printemps et au début de l'été, dans la plaine inondable ou dans les herbiers littoraux (Massé & al., 1993, 1991, 1986). Ces milieux « à risque » bénéficient d'une température plus élevée et d'une plus grande abondance d'invertébrés zooplanctoniques et benthiques. Des dizaines d'autres se reproduisent à la même période dans les eaux vives, mieux oxygénées et libres de sédiments fins. Les caractéristiques physiques de ces lieux de reproduction, en termes de vitesse, de profondeur ou de substrat, sont fonction des débits. De même, la dispersion des larves vers les lieux de développement est, pour certaines étapes, passive et dépendante de ces débits (P. Dumont, 1997 - comm. pers.).

Les régimes thermique et hydrologique tant sur le fleuve et les plans d'eau intérieur ont une influence très nette sur certaines composantes du cycle vital des poissons (Fortin & al., 1992). La synchronie dans le déclenchement du processus de fraie et la force des classes d'âge observées pour trois milieux différents soit la rivière aux Pins, dans le Haut-Richelieu et au lac Champlain, témoignent que les mêmes facteurs, régissant ces variables pourraient être de l'ordre macrogéographique (Fortin & al., 1982 ; Anderson, 1987 ; Massé & al., 1991 ; Massé & Dumont, 1993). L'influence du climat a été invoquée pour expliquer cette synchronie dans les différents plans d'eau d'une région donnée.

Cependant, il semble difficile de départager l'influence de variables hydrologiques de celle des variables climatiques clairement sur la montaison des géniteurs et l'avalaison des adultes et des jeunes de l'année pour le Grand Brochet (Massé & al., 1991 ; Massé & Dumont, 1993).

Malgré le fait que le processus de montaison dans la rivière aux Pins a eu lieu à des températures inférieures à 6 °C en 1975 et en 1976, l'analyse factorielle des correspondances multiples de Massé & al. (1991) suggèrent que la crue printanière constitue un déterminant majeur de ce processus. Par contre, certaines valeurs limites de température journalière de l'eau (16,5 °C) traduisant un réchauffement de l'eau, expliqueraient le déclenchement de l'avalaison des adultes à la rivière aux Pins. L'influence de ce facteur apparaît plus clairement en 1976, alors qu'un pic d'émigration a été observé après une forte hausse de la température, et ce, malgré le contrôle du niveau de l'eau.

Massé & al. (1988) ont précisé que le taux de croissance des jeunes brochets de l'année était étroitement corrélé au nombre de degrés-jours cumulés au-dessus de 5 °C. En agissant sur la croissance, la température de l'eau a donc une influence déterminante sur le moment où les jeunes seraient prêts à reprendre l'avalaison. Toutefois, l'influence du facteur température sur le déroulement même de l'avalaison, une fois la taille atteinte, est moins nette (Massé & al., 1991).

Des travaux réalisés par le ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche (MLCP) sur le Grand Brochet ont démontré que des niveaux d'eau élevés au printemps favorisent l'accès aux prairies inondées et assurent le développement des oeufs et des larves, alors que des niveaux d'eau élevés en été dans le Haut-Richelieu permettent la production d'une forte cohorte de Grands Brochets (Massé & Dumont, 1993).

Le Poulamon atlantique, une espèce qui fraye dans certains tributaires du Saint-Laurent, est particulièrement sensible aux variations des débits d'eau du fleuve. Il existe une relation étroite entre les débits du fleuve et de la rivière Sainte-Anne et l'abondance de la population de Poulamon (Fortin & al., 1982).

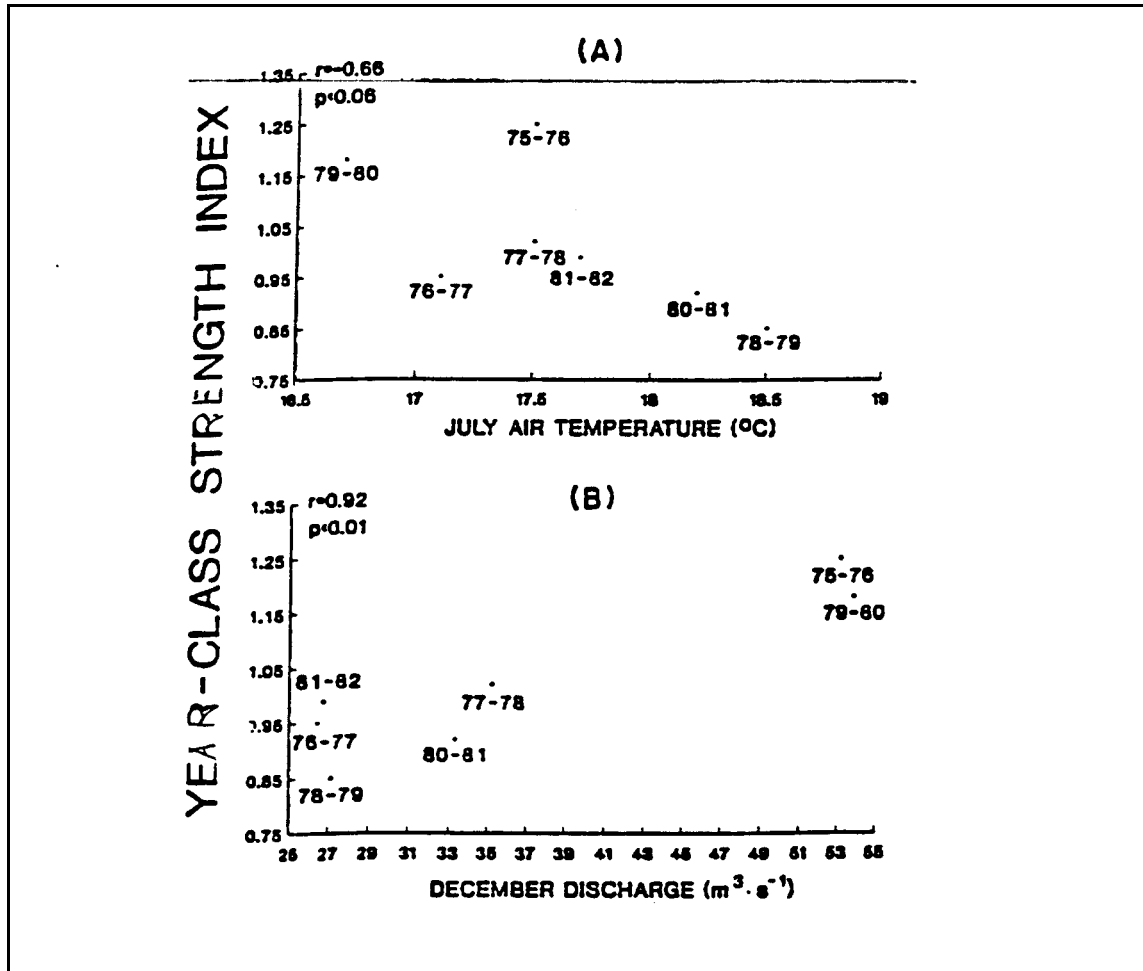
À la fin de la décennie 80, le Poulamon Atlantique du fleuve Saint-Laurent a montré d'importantes modifications de paramètres de population et de ses effectifs. Les structures de taille et d'âge des mâles et femelles étaient déséquilibrées et la croissance des Poulamons a augmenté (Mailhot & al., 1988). Plusieurs facteurs environnementaux expliqueraient ces variations des classes d'âge du Poulamon:

- le débit et le niveau du fleuve en hiver (décembre et janvier) au cours de la montaison du Poulamon et
- la température de l'eau en juillet dans l'habitat estival, situé dans le moyen estuaire, des larves et des jeunes.

De plus, Fortin & al., (1989) rapporte que la composition en longueur et en âge du stock de géniteurs de la rivière Sainte-Anne est demeurée relativement stable entre les saisons de 1980-1981 et 1983-1984. Des classes d'âge plus fortes furent produites les années de forte hydraulité pendant la période de fraie.

Les études sur le Poulamon Atlantique (Mailhot & al., 1988; Fortin & al., 1989) précisent que, plus il y a d'eau dans le Saint-Laurent et dans la rivière Sainte-Anne en décembre et janvier, plus il serait aisé pour le Poulamon Atlantique d'avoir accès à une meilleure frayère, d'où la production d'une forte cohorte (figure 6.4).

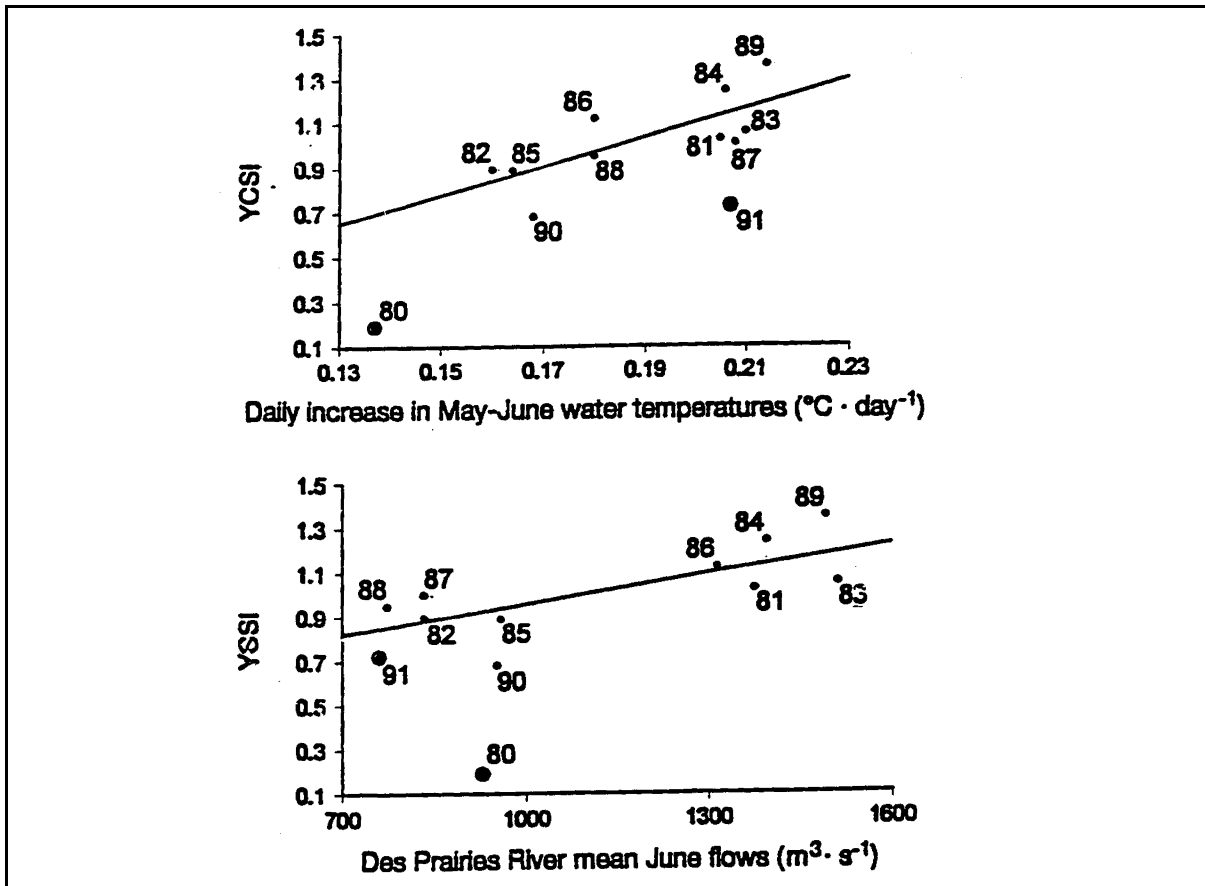
Figure 6.4 - Force de classe d'âge du Poulamon atlantique en fonction des températures, rivière Malbaie (A) et des débits (m^3/s) moyens en décembre de la rivière Sainte-Anne (B)



Source : Fortin & al. (1992)

Un certain nombre d'auteurs ont examiné plus en détail l'esturgeon jaune (LaHaye 1990 ; LaHaye & al.,1992 ; Nilo & al.,1996). Nilo & al.(1996), entre autres, ont rapporté que la force des classes d'âge paraît établie durant les premiers mois de vie et que les conditions climatiques et hydrologiques en juin, pendant lequel la dérive larvaire et le début de l'alimentation exogène ont lieu, semblent être critiques pour le recrutement chez l'Esturgeon jaune du Saint-Laurent. Des corrélations positives et significatives ont été observées entre la force des classes d'âge des Esturgeons et l'augmentation journalière de la température de l'eau du fleuve Saint-Laurent en mai et juin et avec le débit moyen de la rivière des Prairies en juin, la principale frayère du système (figure 6.5).

Figure 6.5 - Relation entre l'indice de force de classe d'âge, la température de l'eau et le débit (m³/s) pour l'Esturgeon jaune



Source : Nilo & al. (1996)

L'importance des variations interannuelles des niveaux d'eau est déterminante sur le déroulement du cycle vital de chacune des espèces aquatiques et le maintien d'une abondance et d'une diversité. L'ampleur d'un phénomène climatique extrême sur la reproduction peut être catastrophique pour la reproduction de l'ensemble des espèces ichthyennes sur le fleuve. Suite aux bas niveaux d'eau survenus au printemps 1995, Dumont & Léveillé (1995) ont noté que certaines frayères du fleuve Saint-Laurent n'ont pu être accessibles. Ces derniers donnent comme exemple la rivière aux Pins qui, retenue dans son lit, n'a pu être utilisée pour la fraye de plusieurs d'espèces. Le flux de larves d'esturgeon en aval de la frayère de la rivière aux Pins semble avoir été inférieur à celui des années précédentes.

La réduction du débit dans le fleuve aura aussi des répercussions sur la biodiversité mondiale car plusieurs espèces migratrices de poissons circulent entre l'océan Atlantique et les eaux intérieures du continent via le fleuve Saint-Laurent afin de compléter leur cycle de vie (Cotton,1995). À titre d'exemple, l'alose savoureuse migre de l'Atlantique à chaque année pour frayer dans le fleuve et les tributaires. Le succès de reproduction de l'alose savoureuse est expliqué à 77 % par la précipitation, le débit et la température de l'air à certaines périodes de l'année (Cotton,1995).

Les résultats d'une étude menée par Dumont (1996) montrent qu'au lac Saint-Louis, par contre, l'indice négatif pour la force de la classe d'âge antérieure et positive pour la température printanière contribue, dans les deux secteurs (nord et sud), à expliquer plus de 60 % de la variabilité observée chez la Perchaude. Du point de vue statistique, ces facteurs sont prépondérants au Sud mais pas au Nord. Dans ce secteur, c'est la vitesse maximale du vent en mai qui est la variable la plus fortement corrélée (Dumont,1996). Cette relation négative, qui n'est pas observée au sud, peut être le fruit du hasard. Elle est cependant plausible puisque les frayères et aires d'alevinage du secteur Nord sont beaucoup plus exposées aux vents dominants (Ouest, Nord-Ouest ou Sud-Ouest) que celles du Sud, bien abritées par l'archipel des Îles-de-la-Paix (Dumont,1996).

Selon les données de Dumont (1996), seulement les variables indépendantes sont significativement corrélées à l'indice de la force des classes d'âge (IFCA). Les relations mises en évidence sont négatives (tableau 6.16) et concerne uniquement le lac Saint-Louis : l'IFCA de la classe d'âge précédente dans les secteur nord et sud du lac et la vitesse maximale des vents en mai dans le secteur nord. L'influence des variables indépendantes sur l'IFCA est différente au lac Saint-Pierre. L'étude réalisée par Guénette & al. (1994) démontre que l'indice de la force des classes d'âge (IFCA) de la Perchaude est corrélé à des facteurs thermiques seulement. En juin, on note les corrélations suivantes : la moyenne des températures maximales journalières (rang de Spearman de 0,74), le nombre moyen de degrés-jours au-dessus de 14 °C (rang de Spearman de 0,81) et la température mensuelle moyenne (rang de Spearman de 0,81).

Tableau 6.16 - Corrélations entre l'IFCA des Perchaudes du lac Saint-Louis et de la rivière aux Pins et différents paramètres biotiques et abiotiques

<u>Paramètre</u>	Lac St-Louis portion nord	Lac St-Louis portion sud	Riv. Aux Pins
IFCA de la classe d'âge précédente	- 0,56*	- 0,71*	-0,18
Temp. min. moy. au printemps (°C)	0,17	0,20	-0,01
Temp. moy. au printemps (°C)	0,06	0,15	-0,08
Temp. max. moy. au printemps (°C)	0,22	0,29	-0,02
Nombre de degrés-jours > 10 °C au printemps	0,19	0,08	-0,26
Temp. min. moy. d'avril à octobre (°C)	-0,22	-0,10	0,02
Temp. moy. d'avril à octobre (°C)	-0,08	0,0	0,00
Temp. max. moy. d'avril à octobre (°C)	0,03	0,11	0,00
Nombre de degrés-jours > 10 °C d'avril à octobre	-0,07	-0,03	0,00
Temp. moy. de l'eau au printemps(°C)	-0,12	0,1	0,26
Temp. moy. de l'eau d'avril à octobre(°C)	-0,31	-0,02	0,29
Vitesse max. du vent en avril (km/h)	0,35	0,40	Non disp.
Vitesse max. du vent en mai (km/h)	-0,61*	-0,19	Non disp.
Niveau minimum au printemps (m)	-0,07	-0,06	-0,50
Niveau moyen au printemps (m)	-0,07	-0,04	-0,45
Niveau maximum au printemps (m)	-0,28	-0,21	-0,45
Baisse quotidienne moyenne du niveau entre le 15 avril et le 31 mai (mm)	-0,40	-0,44	-0,04

Adapté de Dumont (1996)

Concernant le Meunier noir, Duchesne & Magnan (1997) rapportent que certains traits du cycle vital peuvent être prévus à partir de la classification numérique des climats, basée sur la température moyenne annuelle, les précipitations et l'indice de continentalité, plutôt que par régression simple avec la latitude ou la température moyenne annuelle. Trois caractéristiques du cycle vital du Meunier noir sont significativement associées à la température moyenne annuelle des lacs à l'étude (tableau 6.17):

- la longueur à l'âge de 4 ans ;
- la longueur à maturité des femelles qui augmente avec la température moyenne (coefficient de corrélation R^2 de 0,11 et 0,16 respectivement);
- la longévité diminue avec l'augmentation de la température moyenne annuelle (coefficient R^2 de 0,14) .

Tableau 6.17 - Corrélation entre les températures moyennes annuelles de l'air et divers traits vitaux du Meunier noir

<u>Variables</u>	<u>Ordonnée à l'origine</u>	<u>Pente</u>	<u>Coefficient de corrélation R²</u>	<u>degrés de liberté</u>	<u>p</u>
Longévité (ans)	1,30	-0,02	0,14	45	0,009
Longueur maximale (mm)	456,47	-1,21	0,01	44	0,747
Longueur à 2 ans (mm)	2,11	0,01	0,02	44	0,375
Longueur à 4 ans (mm)	141,00	11,05	0,11	47	0,022
<u>Longueur à maturité (mm)</u>					
- mâle	108,99	9,34	0,12	23	0,090
- femelle	100,92	11,98	0,16	24	0,046
<u>Âge à maturité (ans)</u>					
- mâle	0,91	-0,03	0,14	25	0,058
- femelle	6,18	-0,16	0,04	28	0,286

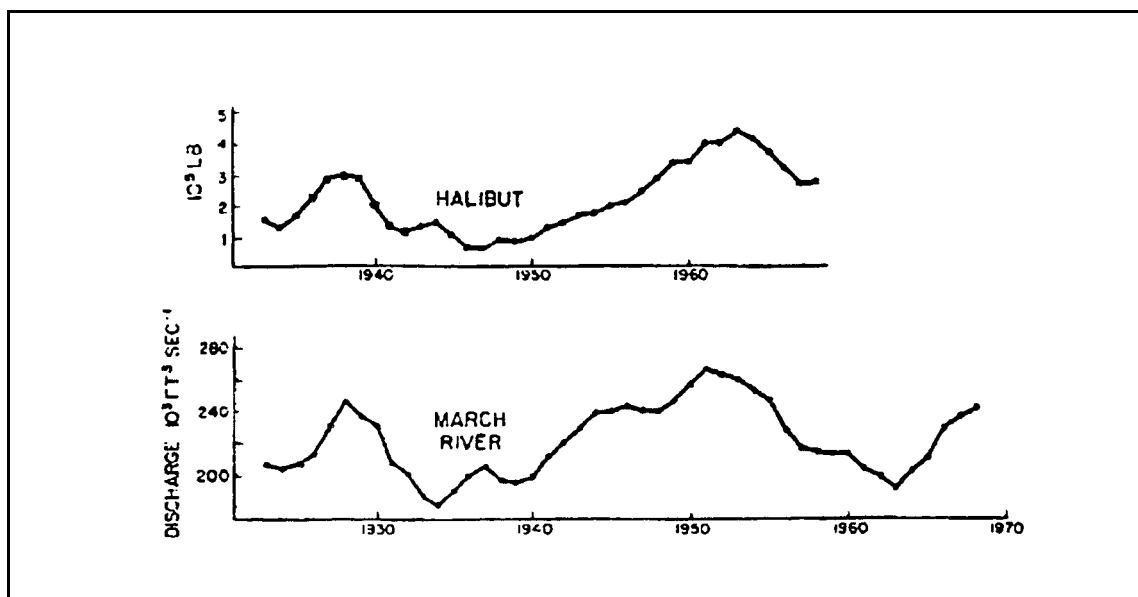
Adapté de Duchesne & Magnan (1997)

Pêcheries en eau salée

Dans le secteur des pêcheries en eau salée, plusieurs études mettent en lumière l'influence réelle des phénomènes hydrologiques et climatiques sur les traits du cycle de vie des espèces marines d'importance commerciale. L'interaction de ces phénomènes reste difficile à départager. L'ensemble des études concernant la ressource halieutique du golfe du Saint-Laurent est un bon exemple.

Bugden (1982) et Stutcliffe (1973) ont examiné l'implication des changements de débits d'eau douce sur les écosystèmes maritimes et certaines espèces commerciales du golfe Saint-Laurent. Les forts débits d'eau douce au Golfe semblent avoir un impact sur le degré de salinité des eaux, le brassage vertical des eaux, la température et le recrutement de certains stocks. À cet effet, Stutcliffe (1973) précisent l'influence directe des débits de la rivière Miramichi sur la production de larves de stade I de homard américain (*Homarus americanus*). De plus, il met en relation, pour le mois d'avril, le débit mensuel du fleuve Saint-Laurent et les prises commerciales de homard américain et de flétan (*Hippoglossus hippoglossus*), à l'âge à maturité de 9 ans pour le homard et 10 ans pour le flétan, dans la région du golfe Saint-Laurent.

Figure 6.6 - Les captures commerciales du flétan en fonction des débits d'eau douce dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent



Source : Sutcliffe (1973)

Par contre, l'analyse de la fluctuation des stocks de morue, pour les années 80, par Chouinard & Fréchet (1994) n'ont pu déterminer de lien direct entre l'indice de survie des larves de morue et l'apport d'eau douce dans le Golfe. Les changements brusques et prolongés de la température des habitats aquatiques est rapporté comme étant un facteur non négligeable sur le développement et le maintien de l'abondance ainsi que sur la distribution des poissons. Il ne faut pas exclure l'importance d'autres facteurs tels la variation naturelle des quantités d'oxygène dissous.

La variabilité de la température de l'eau au niveau de la Couche Intermédiaire Froide (CIF), définie comme la strate où les températures de l'eau sont inférieures à 3 °C dans le golfe du Saint-Laurent, semble avoir un impact sur le recrutement des larves de morue et le maintien de la population de morue. L'analyse des températures estivales au coeur de la couche intermédiaire froide du Golfe, depuis 1948, démontre que les températures ont été sous la normale de 1986 à 1994 (figure 5.5 dans la section sur les extrêmes climatiques) et que cette période froide fut plus intense de 1990 à 1994 (Gilbert & Pettigrew, 1996).

De ce fait, Ouellet (1997) fait ressortir d'une part, que de telles conditions de température semblent avoir peu d'effet sur la force des classes d'âge, l'abondance des poissons de 3 ans et d'autre part, que les faibles niveaux de recrutement causés par les températures anormalement basses de la couche intermédiaire froide auraient eu un impact majeure sur l'effondrement du stock de morue du nord du Golfe. De plus, il précise que la pauvre qualité de l'état du stock reproducteur et les conditions climatiques sévères à la fin de l'hiver et tôt au printemps peuvent avoir contribué à réduire les chances d'un recrutement annuel élevé, et ralentir ainsi le rétablissement du stock de morue dans le nord du Golfe.

Selon l'opinion de certains scientifiques, ces conditions rigoureuses de la CIF auraient pu contribuer à l'effondrement des stocks commerciaux de morue et à la détérioration de la condition physiologique des morues adultes vers le début des années 1990 (Gilbert & Pettigrew, 1996).

Il en est autrement pour le Sébaste dans la région de la baie des Ha ! Ha !, située dans la partie amont du fjord du Saguenay. Cette espèce semble être plus fragile aux périodes prolongées de basses températures. Gilbert & Couillard (1995) et Gilbert (1996) précisent que le principal facteur des mortalités des sébastes observées, en 1993 et 1994, serait associé à un choc thermique causé par les conditions estivales anormalement plus froides dans la masse d'eau profonde de cette région. Ces deux hivers correspondent en effet aux conditions climatiques les plus froides observées depuis trente ans dans le Golfe (Gilbert & Couillard, 1995).

Les conclusions d'une étude réalisée par Aiken & Waddy (1992) soulignent l'importance particulière des basses températures hivernales dans l'habitat du Homard américain. Ces basses températures permettent d'éviter toute perturbation dans le cycle entre la smoltification et la reproduction. L'absence de basses températures augmente l'incidence de la smoltification, l'échec de reproduction devient courant et la fraie n'est pas synchronisée à l'intérieur de la population.

La distribution et le déplacement des espèces sont, dans un large part, affectés par les conditions physiques et climatiques particulières. Sans être exhaustive, la littérature précise cette relation avec la morue, le maquereau et le homard.

La température et le taux d'oxygène dissous jouent un rôle plus important dans la distribution des bancs de morue en période estivale.

Ainsi, la distribution des bancs de morue est fortement influencée par les températures variant entre 2 et 4 °C dont la teneur en oxygène dissous est supérieure à 3,4 mg/L (D'Amours, 1993). Le déplacement des masses d'eau par les vents soutenus affectent le profil thermique des masses d'eau et la distribution d'espèces aquatiques.

L'augmentation de la densité du maquereau bleu, de 1985 et de 1986, a été conditionnée par le mouvement advectif d'eau chaude en surface vers la côte, dans la baie de Brador sur la basse Côte-Nord du golfe Saint-Laurent, d'eau chaude de surface (Castongauy & al., 1992).

De plus, Hudon & al. (1991) rapportent, pour les larves de homard et de crabe, qu'il existe une importante interaction entre les facteurs climatiques et le régime hydrodynamique local, lesquelles ont des effets potentiels importants sur l'advection et la survie des larves de Homard américain (*Homarus americanus*) durant leur phase planctonique.

La température de la surface locale apparaît comme un facteur critique du succès du recrutement larvaire lors de l'advection des larves (Hudon & Fradette, 1993; Hudon & al., 1991). La température de l'eau, les apports en eau douce (éléments nutritifs) des tributaires et le transport des larves par les courants seraient les principaux facteurs influençant le recrutement et, par conséquent, les débarquements de homard (Mann & Drinkwater, non publié, cité dans Hudon & al., 1991).

Les résultats de Drinkwater & al. (1996) remettent en question la validité de la relation entre les prises annuelles de Homard américain et la température de l'eau comme valeur prédictive de l'abondance de la ressource. Les conclusions précisent que l'augmentation des captures de homard, dans les années 1980, n'est pas directement liée au changement de température des océans. Les auteurs soulèvent l'importance d'examiner d'autres mécanismes qui pourraient influencer l'augmentation des stocks telle qu'un changement dans le patron des vents et une diminution possible.

Les vents semblent donc être un mécanisme non négligeable dans l'abondance et le recrutement des larves de certaines régions du golfe du Saint-Laurent. Ainsi, les vents provoquent la remontée d'eau froide le long de la Côte-Nord du Québec, y engendrant des températures faibles et contribuant à l'exportation des larves vers Terre-Neuve.

L'abondance des stades larvaires des 3 espèces (homard américain, crabe tourteau, crabe araignée) augmentait de façon marquée à la suite d'une période de vents supérieurs à 30 km/h passant du Nord au Sud-est, provoquant l'apport de larves de l'extérieur et leur concentration dans la Baie-de-Plaisance (Îles-de-la-Madeleine) (Hudon & Fradette,1993). Ces résultats indiquent que l'advection des masses d'eau, particulièrement sous l'influence des vents, pourrait déterminer l'abondance et la distribution générale des larves de décapodes dans la Baie-de-Plaisance (Hudon & al.,1991).

6.5.2. Les pêches au Québec sous un environnement 2xCO₂

L'impact du changement climatique global sur les pêches en eau douce, tout comme sur les pêches maritimes, est très peu connu. À la lumière de la sensibilité des espèces aquatiques, quelques scénarios ont été anticipés concernant un réchauffement des eaux.

Meisner (1990) attire l'attention vers les salmonidés indigènes sensibles à un éventuel réchauffement ou à des changements d'hydraulicité. Le Québec est sans doute le plus grand mandataire du patrimoine génétique mondial d'omble de fontaine et d'omble chevalier d'eau douce (populations méridionales). Pour le touladi, il partage cette responsabilité avec l'Ontario. Une extinction accélérée, dans le cas de l'omble chevalier, et un recul vers le nord, dans le cas du touladi et l'omble de fontaine, sont prévisibles en cas de réchauffement important.

Ainsi, il pourrait se produire des déplacements géographiques de communautés entières de poissons de même que des changements dans l'abondance relative de différentes espèces à l'intérieur de ces communautés (Environnement Canada,1991). Des changements se produiraient aussi dans la répartition, l'abondance, la diversité et les voies migratrices des espèces de poissons et, des déplacements régionaux des zones de pêches seraient à prévoir (Conseil du programme climatologique canadien,1991).

Dans l'hypothèse d'un réchauffement du climat, le volume et la configuration de l'écoulement des eaux devraient changer au Québec. Mortsch & Quinn (1996) conclut que le débit moyen annuel et le niveau moyen des eaux au port de Montréal baisseraient respectivement de 40 % et de 1,3 m. La tentation serait alors sans doute très grande de stabiliser les niveaux d'eau par une série d'ouvrages régulateurs, au détriment des espèces de poissons migratrices, déjà hypothéquées par la fragmentation contemporaine de leur habitat. On pense, entre autres, à l'esturgeon jaune et noir, l'anguille, le bar rayé, le poulamon, etc.. (Robitaille & Mailhot,1989). Le fleuve prendrait alors l'allure d'une succession de lacs Saint-François, lequel est caractérisé par une structure de communauté ichtyologique peu diversifiée, homogène et reposant sur des

espèces associées au milieu lentique (perchaude, crapet, achigan, grand brochet, quelques cyprins, etc..) au détriment du doré, de l'esturgeon jaune, du maskinongé et du suceur.

Minns & al. (1995) ont évalué les conséquences d'un réchauffement sur l'habitat du saumon dans l'est du Canada. Le réchauffement du climat pourrait avoir une influence autant sur la quantité que sur la qualité de l'habitat du saumon ce qui pose des défis importants pour les gestionnaires de pêcheries. Une augmentation moyenne de la température de l'air touchera directement les conditions thermiques de l'habitat du saumon pendant l'année, affectant ainsi tous les stades du cycle vital, de l'incubation de l'oeuf à la période de fraie (Minns & al.,1995). Le changement potentiel dans l'habitat du saumon, calculé en fonction des scénarios des changements climatiques, est variable selon les régions. Les résultats prévoient une réduction de 42 % à un gain de 16 % dans les habitats de saumon. La perte nette en habitat du saumon pour l'est du Canada sera tout au plus de 4 %.

Sous des conditions de $2xCO_2$ la population de l'Ombre de l'Arctique diminuerait (Power, 1989). Ces populations habitant de petits lacs, une disparition de la plupart des populations méridionales est probable (Dumont, 1007 - comm. pers.). Les populations reliques du sud survivraient seulement si la zone de l'hypolimnion est suffisamment grande pour convenir comme habitat (Power,1989).

De plus, la température est un facteur qui affecte la distribution des espèces de poissons (Power,1989). Les conséquences d'un environnement plus chaud pourraient être favorables à la remontée dans le Golfe de certaines espèces dont la distribution actuelle se situe au Sud du golfe du Maine (Jean,1990). La réduction du couvert de glace ainsi qu'une hausse des températures de l'eau pourraient augmenter l'aire de distribution et la densité de certaines espèces commerciales (Bertrand & Doré, 1994). Les effets du réchauffement seraient plus prononcés entre les latitudes 30° Nord et 60° Nord, avec des augmentations de température estimées de l'ordre de $1,5^\circ C$ à $4,5^\circ C$ d'ici l'an 2000 (Power,1989).

L'ensemble des études suggère une production accrue de poissons sous des conditions plus chaudes et un remplacement graduel par des espèces d'eau plus chaude dans le bassin des Grands Lacs (Power,1989). Étant ouvert à l'Atlantique et aux Grands lacs, le Saint-Laurent possède également des entrées indirectes sur les bassins du Mississipi et de l'Hudson ce qui pourrait, dans un scénario $2xCO_2$, profiter à l'insertion de nouvelles espèces.

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat du secteur des PÊCHERIES au Québec est MOYEN* car

On connaît bien les facteurs climatiques qui influent sur les populations d'eau douce mais essentiellement sur le sud de la province . Ce n'est guère le cas en ce qui concerne l'ensemble des espèces en eau salée.

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur les PÊCHERIES est FAIBLE car

L'évaluation des impacts sur les espèces d'eau douce est faite indirectement en utilisant les connaissances actuelles liées aux niveaux d'eau extrêmes. Aucune analyse quantitative sous un environnement 2xCO₂ n'est disponible, surtout pour les populations marines ou nordiques

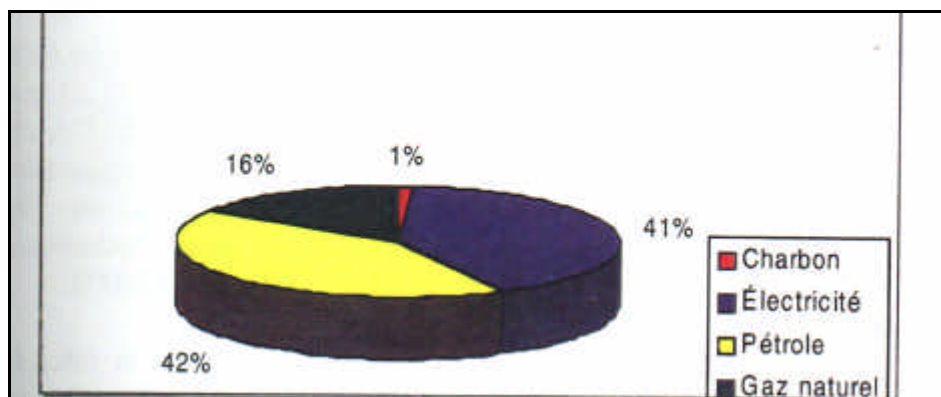
* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : *très bon, bon, moyen, faible et très faible*

6.6. Énergie

Des quatre composantes du bilan énergétique au Québec, l'hydroélectricité demeure la plus sensible à toute variation climatique et contribue dans une faible proportion à l'incidence des gaz à effet de serre. En raison de l'importance économique de la production d'hydroélectricité et de sa sensibilité aux variations climatiques, la section touche spécifiquement cette forme d'énergie.

L'importance de la production hydroélectrique agit sur la production des types d'énergies compétitives, complémentaires ou substituées (gaz et autres combustibles fossiles, nucléaires). Au niveau bilan énergétique du Québec (figure 6.7), l'électricité et le pétrole occupent une part importante (Gouvernement du Québec, 1995). Cependant, le Québec est essentiellement un importateur de pétrole brut et de gaz naturel. En 1992, les importations de pétrole brut et gaz naturel atteignaient 96,3 millions de barils et 6,2 milliards de m³ respectivement. La consommation de pétrole était en baisse de 3,2% par rapport à 1991 (Gouvernement du Québec, 1995).

Figure 6.7 - Bilan énergétique du Québec, 1992



Que ce soit à cause de l'abondante disponibilité en eau, utilisée pour la production hydroélectrique ou pour le refroidissement dans les centrales thermiques, les réserves qu'offrent les plans d'eau du Québec sont associés à un ensemble d'activités dans le secteur de l'énergie hydroélectrique.

Principal producteur et distributeur d'énergie au Québec, la société d'État, Hydro-Québec, est l'une des plus grandes entreprises d'électricité en Amérique du Nord en termes d'actif et de ventes. Elle produit, transporte et distribue la quasi-totalité de l'électricité consommée au Québec. À cette fin, elle exploite un parc de production de près de 31 000 MW; ses livraisons annuelles dépassent les 166 milliards de kWh. Aujourd'hui, la Société réalise des ventes annuelles de 7,6 milliards de dollars et cumule 43,3 milliards en immobilisations (Hydro-Québec, 1997).

En raison de sa capacité de production, le Québec est un exportateur important d'électricité: les exportations représentent 7,2 % de la production totale d'électricité. La consommation québécoise d'électricité continue de croître en 1992 pour atteindre 153,4 milliards de kWh, soit une augmentation de 2,7 % par rapport à 1991 (Gouvernement du Québec, 1995). Le potentiel hydroélectrique de base restant encore à aménager au Québec est estimé à 48 000 MW.

La force hydraulique des principaux plans d'eau sont activement exploitées pour la production d'électricité. Sur le Saint-Laurent, en 1991, les 17 centrales aménagées en bordure du fleuve et du Saguenay atteignent une puissance installée de 4 489 mégawatts (MW), ce qui représente 13 % de la puissance électrique disponible au Québec (Centre Saint-Laurent, 1996). Treize de ces centrales appartiennent à Hydro-Québec et six à des compagnies privées.

6.6.1. La sensibilité du climat présent et futur sur la production hydroélectrique

La production hydroélectrique de chaque centrale est sensible aux variations des débits d'eau (Changnon & al., 1994; Sanderson & al., 1986). Pour le système Grands Lacs/Saint-Laurent, une corrélation étroite a été établie entre les variations des débits d'eau antérieurs et la capacité de production hydroélectrique à Niagara (Changnon & al., 1994). L'analyse de régression effectuée par ICF (1987) démontre qu'à Niagara, une modification de 1 % du débit d'eau entraîne un changement de 1,43 % de la production. Cependant, pour une même variation de 1 % du débit, la production hydroélectrique des infrastructures sur le Saint-Laurent ne sera affectée que de 0.74 %.

Ce sont les éléments du bilan hydrique, notamment la précipitation et l'évaporation, qui sont les plus importants pour la production d'énergie. Les conditions climatiques qui seront induites par les gaz à effet de serre pourraient avoir un effet sur la gestion et la production hydroélectrique au Québec (Singh, 1990; Mysak, 1993). Compte tenu de l'importance de la production hydroélectrique québécoise, plusieurs études ont précisé l'impact des scénarios anticipés sur la production des centrales hydroélectriques du Nord québécois. Entre autres, Singh (1987), Singh (1990), Météoglobe (1989) et Morin & Slivitzky (1992) ont estimé l'apport net en eau pour les bassins versants les plus importants au Québec sous de conditions de 2xCO₂.

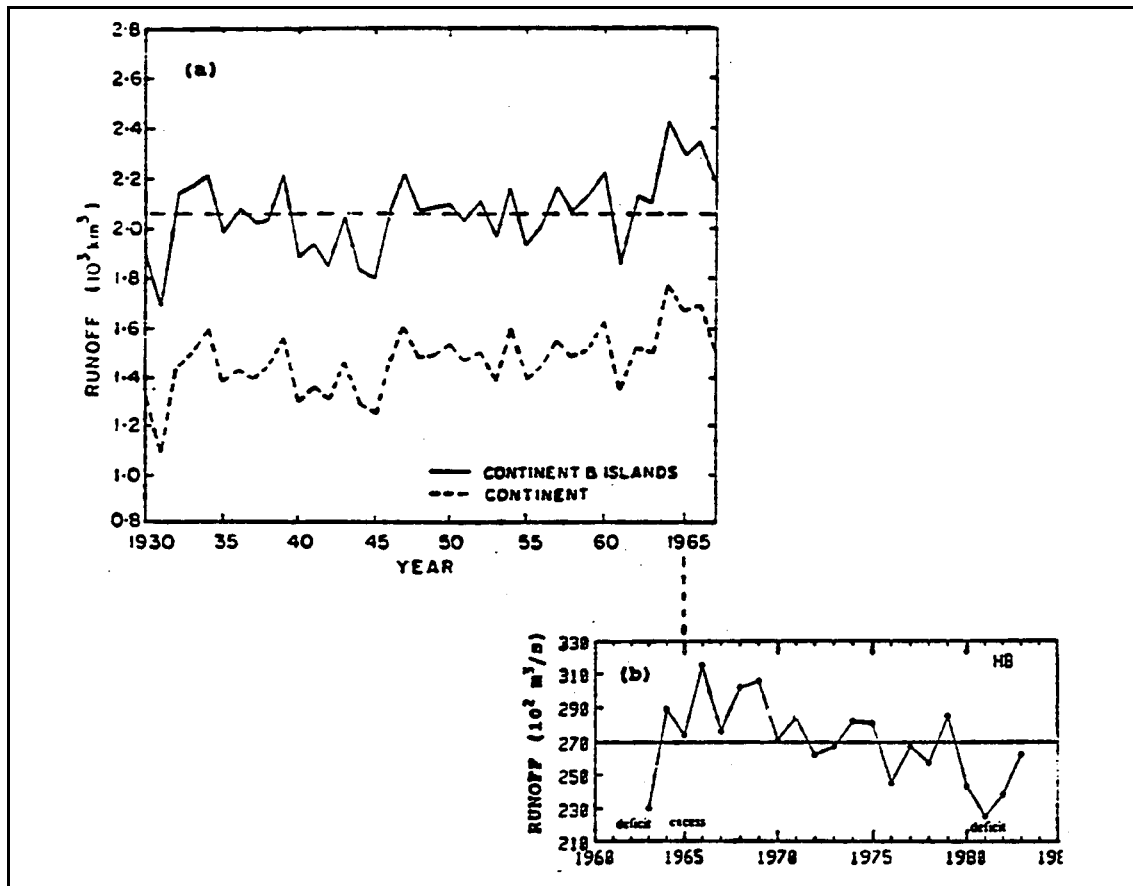
Dans un cadre général, les modèles de circulation générale prévoient pour les régions du Nord québécois des étés plus secs et plus chauds, des printemps beaucoup plus doux et humides ainsi que des hivers avec plus de précipitations Météoglobe (1989). Ces nouvelles conditions se traduiront par une fonte au

printemps plus hâtive, un évaporation en été plus forte et le gel automnal plus tardif. Cependant, la densité des points de grille étant trop faible, une interprétation prudente doit-être faite avec ces résultats, ces derniers variant en fonction de la localisation des points de grille des modèles et du secteur étudié (Singh, 1990).

Dans un tel scénario, Singh (1990) conclut que l'apport net en eau sera, de toute évidence, faiblement perturbé car l'augmentation des précipitations sera compensée par la hausse du taux d'évaporation. Mysak (1993) mentionne qu'un éventuel réchauffement climatique dû à l'accumulation des gaz à effet de serre implique que la saison d'englacement des tributaires de la région de la baie d'Hudson sera raccourcie de quelques semaines et que les changements dans l'écoulement fluvial dans la baie d'Hudson seront peu importants. De plus, il anticipe que la variabilité naturelle des précipitations ($\pm 25\%$ pour les fluctuations interannuelles et $\pm 15\%$ à l'échelle interdécennale) dominera la série temporelle des précipitations (figure 6.8), autant à court terme qu'au milieu du prochain siècle (Mysak, 1993). Il en résultera que le cycle interdécennal de grande amplitude présentement observé dominera le cycle hydrologique. Ceci implique que les temps de remplissage des réservoirs varieront considérablement d'une décennie à l'autre (Mysak, 1993).

Un tel changement dans l'apport net en eau par bassin entraînerait nécessairement une révision de la gestion hydroélectrique des barrages dans le Nord du Québec pour satisfaire à une demande accrue d'électricité pour les climatiseurs en été et une demande moins forte pour le chauffage en hiver (Météoglobe, 1989).

Figure 6.8 - Série temporelle de l'écoulement dans la baie d'Hudson (m^3/s)



Source : adapté de Prinsenber & al. (1987) par Mysak (1993)

Malgré les nouvelles conditions climatiques, Singh (1987) a estimé la production électrique totale, des trois bassins versants : La Grande, Caniapiscou et Opinaca-Eastmain, devrait augmenter de 9 TWh* (tableau 6.18).

* 1 TWH = 10^{12} Wh

Tableau 6.18 - Apport net en eau pour trois bassins versants et la capacité de production des centrales hydroélectriques

	BASSIN VERSANT			
	La Grande	Caniapiscau	Opinaca (Eastmain)	TOTAL
<u>Apport net en eau (m³/s)</u>				
Actuel	1 761	788	851	3 400
Écart selon le scénario GFDL (1980)	2 052 (+16,5%)	912 (+5,7%)	908 (+6,7 %)	3 872 (+13,9 %)
Écart selon le scénario GISS (1984)	2 035 (+15,6%)	891 (+13,0 %)	1 023 (+20,2%)	3 948 (+16,1 %)
<u>Capacité génératrice (TWh)</u>				
Actuel	32,2	20,9	9,0	62,2
Écart selon le scénario GFDL (1980)	37,6 (+5,4 %)	24,2 (+3,3 %)	9,6 (+0,6 %)	71,4 (+9,2 %)
Écart selon le scénario GISS (1984)	37,3 (+5,1 %)	23,6 (+2,7 %)	20,2 (+11,2 %)	71,7 (+9,5 %)

Source : Singh (1987)

6.6.2. La sensibilité du climat présent et futur sur la demande électrique

Le doublement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et le changement climatique associé modifieront à la fois la demande d'électricité et la production hydroélectrique. Les résultats des modèles de circulation générale mettent en évidence une baisse liée au chauffage en hiver et un accroissement de la demande en électricité pour la climatisation en été (Singh, 1987; Météoglobe,1989).

Les résultats des modèles démontrent que les degrés-jours de chauffage devraient s'abaisser de l'ordre de 21 à 29 % pour la région de Montréal et de 28 à 37 % pour la ville de Québec (tableau 6.19), ce qui implique une redistribution mensuelle de l'énergie à produire des mois d'hiver vers les mois d'été ainsi qu'une modification de la pointe de chaque mois (Météoglobe,1989). En se basant sur les résultats du MCG d'Oregon State University, Météoglobe (1989) prévoit une augmentation de la disponibilité en énergie des sites déjà en opération en 1988 d'environ 4,4 %, soit 6,3 TWh. Cependant, l'énergie disponible pour les sites prévus d'être mis en production entre 1988 et 2015 augmenterait de 7,7 %, soit 7.0 TWh.

Tableau 6.19 - Changement de la consommation d'électricité en chauffage et en climatisation (en %) pour les villes de Montréal, Québec et Trois-Rivières

	Scénario OSU			Scénario GISS			Scénario GFDL		
	Mtl	Qué	Tr.Riv	Mtl	Qué	Tr.Riv	Mtl	Qué	Tr.Riv
Chauffage*	-21	-20	-20	-28	-27	-27	-39	-37	-37
Climatisation	86	141	119	88	120	105	234	360	311

* Le signe négatif signifie une baisse de consommation

Source : Météoglobe (1989)

L'effet du réchauffement pourrait induire une augmentation de la demande d'électricité de l'ordre de 3,5 % (Météoglobe,1989). Il serait possible d'observer un affaissement des ventes domestiques et de la production au cours des mois d'hiver (de novembre à mars) et une hausse durant l'été (de juin à août).

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat du secteur ÉNERGIE au Québec est BON* car

Bien que l'on saisit très bien l'importance du climat sur l'offre et la demande énergétique, les indicateurs climatiques habituellement utilisés sont généraux et peu développés.

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur l'ÉNERGIE est MOYEN car

les études existantes se sont limitées à estimer les variations en apport d'eau dans les réservoirs hydro-électriques et les bassins versants les plus importants du Nord du Québec

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : *très bon, bon, moyen, faible et très faible*

6.7. Foresterie

L'industrie forestière est un élément important de l'économie du Québec surtout dans le secteur des pâtes et papier et du bois. Le produit intérieur brut du secteur forestier atteint 849 millions de dollars en 1991, soit 0,63 % du PIB du Québec (Gouvernement du Québec, 1995). Le Québec détient une grande partie des terres boisées du Canada: sur un total de 940 000 km², on recense 655 382 km² de terres forestières inventoriées, et 524 920 km² de forêt productive accessible. Au sud du 52^{ième} degré de latitude nord, le Québec méridional a une superficie forestière de 660 283 km² dont 60,4 % est couverte par la pessière, 27,3 % par la sapinière et 12,2 % par les feuillus. En comparaison, le Canada compte 417,6 millions d'hectares de forêts, soit 42 % de la superficie totale au pays (Saporta & al.,1997) avec 119 millions d'hectares exploités et 50 millions protégés.

Le paysage végétal du Québec est subdivisé en neuf grands domaines bioclimatiques. Le tableau 6.20 présentent les principales caractéristiques, soit les températures moyennes annuelles, les degrés-jours de croissance, la longueur de la saison de croissance, les précipitations totales et le pourcentage de la fraction nivale (Ordre des ingénieurs forestiers,1996). Les conditions climatiques deviennent de moins en moins favorables à la végétation selon un gradient sud-nord.

Tableau 6.20 - Zones bioclimatiques du Québec

<u>Zones forestières</u>	<u>Superficie (km²)</u>	<u>Température moyenne annuelle (°C)</u>	<u>Longueur - saison de croissance (jours)</u>	<u>Degrés-jours de croissance (supérieur à 5°C)</u>
Toundra arctique	229 224	-10,0 à -5,0	40 à 100	250 à 500
Toundra forestière	224 720	-7,5 à 0,0	80 à 140	500 à 1000
Pessière noire à lichens	308 598	-5,0 à -2,5	100 à 140	500 à 750
Pessière noire à mousse	433 645	-2,5 à 0,0	120 à 140	750 à 1 250
Sapinière à bouleau blanc	123 736	0,0 à 1,0	140 à 160	1 100 à 1 500
Sapinière à bouleau jaune	94 768	1,0 à 2,5	160 à 170	1 250 à 1 500
Érablière à bouleau jaune	65 630	2,5 à 4,0	170 à 180	1 500 à 17 50
Érablière à tilleul	35 468	4,0 à 5,0	180 à 190	1 750à 2 000
Érablière à caryer	9 694	5,0 à 7,0	190 à 200	2 000 à 2 500

Source : adapté de l'Ordre des ingénieurs forestiers (1996).

La gestion des forêts Québécoise dépend à 86,8 % du gouvernement provincial; à 0,6 % du gouvernement fédéral, et à 12,6 % de particuliers (Gouvernement du Québec,1995).

En 1994-95, les activités de gestion forestière ont permis de procéder au reboisement de 69 100 ha, de dégager mécaniquement ou chimiquement une surface équivalente à 55 300 ha, de drainer une surface de 5 030 ha et de faire des éclaircies précommerciales sur 32 000 ha (Gouvernement du Québec, 1996b). Les forêts conifériennes (sapinières et pessières) ont fait l'objet d'une récolte importante de la matière ligneuse et de mesures de protection contre certaines perturbations majeures, autrefois non contrôlées (feux, épidémies d'insectes). Ces interventions ont modifié et continuent de modifier ces forêts quant à la structure d'âge et à l'abondance relative des espèces.

Les forêts de la vallée du Saint-Laurent ont probablement subi plus de modifications par l'activité humaine que bien d'autres forêts du continent (Gouvernement du Québec, 1996b). La superficie occupée originalement par les forêts de feuillus s'est notablement rétrécie pour faire place à l'agriculture et l'urbanisation.

6.7.1. La sensibilité au climat des forêts du Québec

Les diverses études concernant la sensibilité à la variabilité climatique du secteur forestier portent sur la problématique de l'accumulation de CO₂, l'adaptation des peuplements des forêts aux variations climatiques depuis les 500 dernières années et les feux de forêts.

A) La forêt, le cycle du carbone et le climat

La concentration atmosphérique du CO₂ à travers le monde est passée de 280 ppmv avant l'ère pré-industrielle à 360 ppmv avec une augmentation annuelle de 1,5 ppmv. Cette hausse du gaz carbonique correspond à une accumulation annuelle de carbone dans l'atmosphère de 3,2 +/- 0,2 gigatonnes de carbone (GtC/an). Cette accumulation est pourtant inférieure à la quantité émise par les activités humaines qui totalisent 7,1 +/- 1,1 GtC/an. Selon IPCC (1995a), cette disparition d'environ 3,9 GtC/an serait principalement le fruit de l'absorption de carbone par les forêts et les océans. D'après Hendrickson (1990), le Canada aurait un entreposage de carbone d'environ 31 tonnes métriques par hectare comparé à une moyenne mondiale de 14,5 tonnes métriques par hectare (Saporta & al, 1997). La forêt tempérée, à elle seule avec ses 26,8 millions d'hectares, en accumule 3,9 pétagrammes (Pg)¹³, (Heath & al., 1993).

¹³ 1 Pg = 10¹⁵ g

Le CO₂ atmosphérique suit un cycle annuel avec un maximum en hiver et un minimum au printemps et en été (Vitousek,1994). Waring & Schlesinger (1985) mentionnent que la baisse des concentrations de CO₂ atmosphérique observée chaque printemps, est attribuée à la consommation de CO₂ par la photosynthèse durant la période de croissance. Jarvis (1989) mentionne que les oscillations annuelles des concentrations de CO₂ sont plus fortes dans l'hémisphère nord dû à la présence de forêts tempérées et boréales que dans l'hémisphère sud.

Les forêts couvrent environ le tiers de la surface des continents (Kramer,1981) et assurent environ 2/3 de la photosynthèse globale (Watson & al.,1990). Les forêts influencent donc grandement le cycle de carbone via trois (3) processus d'échange avec l'atmosphère soit la photosynthèse, la respiration végétale et la respiration hétérotrophe dans le sol permettant de transformer le matériel organique en CO₂ (Watson & al.,1990).

La photosynthèse, activée par le rayonnement solaire, permet à une plante ou un arbre de capter le CO₂ atmosphérique et de synthétiser les glucides. Les facteurs climatiques qui influent sur le taux de photosynthèse sont (Kozlowski & al.,1991):

- l'intensité de la lumière;
- la température de l'air;
- la disponibilité en eau;
- la concentration atmosphérique de CO₂;
- la présence de polluants atmosphériques et
- les conditions du sol.

La forêt libère du CO₂ dans l'atmosphère par le biais de la photorespiration et la respiration. Peu d'informations permettent de lier les conditions climatiques particulières à la photorespiration mais Waring & Schlesinger (1985) indiquent que la respiration d'entretien (i.e. celle requise pour maintenir l'état de l'arbre) double à toutes les augmentations de température de 10 °C. Tout au long de sa vie, une forêt mature a libéré autant de CO₂ qu'elle en a fixé (Kozlowski & al., 1991).

Une forêt en croissance constitue un puits de carbone alors qu'une forêt mature ou une vieille forêt est en équilibre avec l'atmosphère sur le plan des échanges de carbone. Selon Harmon & al. (1990), le remplacement d'une vieille forêt par un peuplement plus jeune libère du carbone dans l'atmosphère même si le peuplement cadet est aménagé intensivement et a une production primaire nette supérieure à celle d'une vieille forêt. Morrison & al. (1993) précisent le contenu en carbone des divers com-

posantes constituant les arbres et les sols forestiers pour trois forêts naturelles matures au Québec (tableau 6.21). Le bois de tige constitue le plus important réservoir de carbone chez l'arbre pour tous les peuplements étudiés. Le feuillage des résineux, les racines et la souche forment le deuxième plus gros réservoir de carbone tandis que, pour l'érable à sucre, ce sont les branches vivantes. Chez l'érable à sucre, le sol minéral peut contenir 61 % du carbone de l'ensemble des composantes contenant du carbone.

Tableau 6.21 - Contenu en carbone des diverses composantes constituant les arbres et les sols forestiers.

<u>Caractéristiques</u>	<u>Pinède à pin gris (Chapeau)</u>	<u>Pessière noire (lac Nipigon)</u>	<u>Érablière (Sault Sainte-Marie)</u>
Âge nominal	62 ans	110 ans	250 ans
Volume total brut (m ³ /ha)	222,9	178,3	238,2
Volume marchand brut (m ³ /ha)	184,4	164,6	219,8
<u>CONTENU EN CARBONE (kg/ha)</u>			
Arbres en vie			
Feuillage	2 200	4 600	1 800
Fruits	500	1 700	200
Branches vivantes	4 800	7 800	22 300
Branches mortes	1 200	3 000	900
Bois de tige	48 000	44 500	61 000
Écorce de tige	4 900	7 000	9 500
Souches et racines	10 000	20 400	16 100
TOTAL (arbres en vie)	71 600	89 000	111 800
Végétation au sol	400	700	600
Arbres morts, troncs au sol	19 800	1 800	5 400
Horizons organiques du sol	20 300	69 600	16 100
Sol minéral	48 900	90 200	214 300
GRAND TOTAL	161 000	251 300	348 200

Tiré de Campagna (1996) et adapté de Morrison et al. (1993)

Le tableau 6.22 fait ressortir des différences marquées sur le plan de l'allocation de carbone pour le pin gris et l'érable à sucre. Selon Melillo & al. (1990), l'accumulation de biomasse est spécifique à chaque espèce et est reliée aux conditions environnementales. Kurz & al. (1992) et Kurz & Apps (1993) ont montré que le bilan de carbone associé à la forêt boréale canadienne est grandement influencé par l'ampleur et la fréquence des perturbations naturelles (feux, épidémies, etc.) l'affectant périodiquement.

L'érable à sucre fixe une quantité totale de carbone plus importante que le pin gris mais ce dernier produit plus de biomasse ligneuse, d'où une plus grande séquestration de carbone. Cependant, l'érable à sucre produit moins de matière ligneuse car l'allocation du carbone favorise nettement les feuilles et les racines fines dont la durée de vie est d'une saison de croissance ou moins.

Tableau 6.22 - Quantités de carbone séquestré annuellement dans les diverses parties des arbres

<u>Composantes</u>	<u>Fixation nette de carbone (kg/ha/an)</u>	
	<u>Pinède à Pin gris</u>	<u>Érablière</u>
Arbres		
Biomasse ligneuse	1 790	1 190
Feuillage	731	1 756
Fleurs et fruits	150	134
Racines fines	529	2506
Total pour les arbres	3 200	5 505
Végétation secondaire	non disponible	75
TOTAL DE CARBONE FIXÉ	environ 3 200	5 800

Tiré de Campagna(1996) et adapté de Morrison et al. (1993)

B) Dynamique des populations

La dynamique des populations se définit comme les variations dans l'espace attribuées aux phénomènes d'extension, de réduction ou de déplacement d'aire de répartition des espèces. La plupart des études qui lient foresterie et climat, tant au Québec méridional que septentrional, examinent une espèce en un lieu donné par le biais de la régénération sexuée, de la comparaison des formes de croissance des espèces arborescentes à leurs limites de répartitions (Lavoie,1994) et des épisodes de dépérissement des forêts décidues du sud de la province (Auclair & al.,1996).

Le suivi de la régénération sexuée dans les habitats naturels est probablement un des meilleurs moyens pour détecter une réponse rapide de la part des écosystèmes forestiers à la suite de changements du climat (Lavoie,1994). Advenant un réchauffement sensible des conditions climatiques au cours du prochain siècle, la régénération sexuée de plusieurs espèces, qui atteignent au Québec leur limite nord de répartition, pourrait être favorisée.

Les études de Payette & al. (1990b) et Houle (1992) dans la réserve écologique de Tantaré, de Houle & Bouchard (1990) dans la forêt de micocoulier du lac Saint-Paul ainsi que Brisson & al. (1992) dans la forêt de Muir à l'ouest de Montréal, montrent que la relation entre le climat et la reproduction sexuée peut être nuancée par plusieurs facteurs. Il importe toutefois, comme le précisent les études précédentes, de bien connaître les cycles naturels de production de graines et l'impact des perturbations anthropiques et naturelles sur la régénération sexuée.

S'il est difficile, dans la partie méridionale du Québec, d'associer un phénomène climatique à un changement dans la reproduction, la situation est différente dans la partie septentrionale du Québec (Lavoie,1994). En effet, le climat est de loin le principal facteur pouvant affecter le potentiel reproducteur des arbres, en particulier près de la limite des forêts (Sirois,1995). Un réchauffement important des températures favoriserait le développement complet des graines dans les cônes des conifères et leur germination après dissémination (Lavoie,1994).

L'adoucissement récent du climat à la suite de la période du Petit Âge Glaciaire, révélée notamment par la croissance radiale des épinettes noires (*Picea mariana*) subarctiques, a permis à quelques espèces arborescentes une bonne régénération sexuée (Lavoie,1994). La structure d'âge des peuplements de mélèzes (*Larix laricina*) à la rivière aux Feuilles (Morin & Payette,1984) et des épinettes blanches (*Picea glauca*) au lac Guillaume-Delisle (Payette & Fillion,1995) durant le XXI^{ème} siècle, confirme l'abondante régénération de ces espèces.

Les plantules d'épinettes noires de la région de la rivière Boniface ont connu une régénération avec succès uniquement entre 1890 et 1910, période climatique plus clémente (Payette & al.,1985). Encore aujourd'hui, Lavoie & Payette (1994) ont observé très peu de plantules dans les pessières à lichens de cette région et plus de 99% des graines produites par l'épinette ne sont pas viables (Sirois, 1995).

C) Dépérissement des forêts

Il est difficile de préciser les causes exactes d'un dépérissement forestier, car il s'agit d'une maladie complexe (Dessureault, 1986). Il existe cependant tout un ensemble de preuves circonstanciées et d'indices suggérant que les facteurs climatiques pourraient être des facteurs de stress important pour les arbres.

L'histoire des forêts de bois franc du sud de l'Ontario, du Québec, des Maritimes ainsi que celles du nord-est des États-Unis, durant la période de 1910 à 1990, présentent trois grands épisodes de dépérissement depuis les 50 dernières années (Auclair & al., 1996). Au Québec, on rapporte plusieurs cas de dépérissement, entre autres le dépérissement du frêne noir dans les années 1927; de la pruche depuis 1975 et celui de plusieurs autres espèces dans l'Outaouais (Dessureault, 1986). Dans le sud de la province, les deux cas les plus importants retenus touchent celui du bouleau et des érables à sucre. Le climat semble avoir joué un rôle important dans ces deux cas (Robitaille, 1982; Auclair & al., 1996).

La pollution atmosphérique a longtemps été considérée comme le principal facteur responsable du dépérissement (via les processus expliqués plus haut). Néanmoins, le fait que le dépérissement des érablières :

- fut très subit (peu ou pas de dépérissement dans les années 1970, dépérissement sévère dès 1981) ;
- se soit limité dans la plupart des cas à la couronne des arbres ;
- n'a pas affecté la croissance des jeunes gaules et
- fut suivi d'une période de récupération (fin des années 1980, début des années 1990) ,

a fait douter certains chercheurs de l'importance de la pollution atmosphérique en tant que cause directe ou indirecte du dépérissement (Lavoie, 1997, comm. pers.).

Le dégel du mois de février 1981 accompagné de pluie et de la disparition du couvert de neige, le tout suivi d'un refroidissement intense en mars 1981, fut pointé du doigt au début des années 1990 à titre de principal responsable du dépérissement des érablières. Il manquait néanmoins toujours de véritables données quantitatives pour appuyer cette hypothèse. Une étude dendrochronologique (c'est-à-dire qui s'appuie sur la croissance radiale annuelle des arbres) récente (Payette & al., 1996) a montré que :

1. le phénomène du dépérissement dans les érablières n'en est pas un nouveau. En effet, des épisodes comparables de dépérissement dans les érablières québécoises ont eu lieu dans les années 1910 et 1950 avec une forte chute de la croissance radiale des arbres ;
2. la sécheresse lors de la saison de croissance est de loin le principal facteur climatique responsable des 19 années de faible croissance radiale qui ont été enregistrées depuis 1900 et
3. le dépérissement sévère des années 1980 serait dû à la combinaison de sécheresses estivales et d'épidémies de Livrée des forêts.

L'influence réelle du dégel de février 1981 reste encore à démontrer. Ces épisodes de dépérissement s'inscriraient donc dans la dynamique naturelle des écosystèmes forestiers et ne seraient pas reliés au phénomène des pluies acides (Lavoie,1997, comm. pers.)

La décadence du bouleau jaune et du bouleau à papier au Québec a débuté en 1937 et a atteint son paroxysme en étendue et en intensité dans les années de 1943-1944 (Ordre des ingénieurs forestiers,1996). Au début des années 50, il ne restait pratiquement plus de bouleaux pour l'exploitation commerciale dans l'est du Canada. Des changements climatiques mineurs, mais significatifs, seraient parmi les causes principales. Une élévation de la température d'un degré durant une dizaine d'années, alliée à quelques années de précipitations sous la normale, auraient provoqué une mortalité importante des racelles du bouleau (Ordre des ingénieurs forestiers, 1996).

L'autre cas de dépérissement important fut celui des érables à sucre, qui s'est généralisé dans tout le sud du Québec en 1982. Les dommages ont été particulièrement sévères pour les régions de Québec, Trois-Rivières et la Beauce. Une des causes principales avancées est liée au dégel important en février 1981 sur tout le sud du Québec, suivi d'une période de froid normal pour la saison (pour plus de détails, voir la section 5.3 sur les vagues de chaleur hivernale).

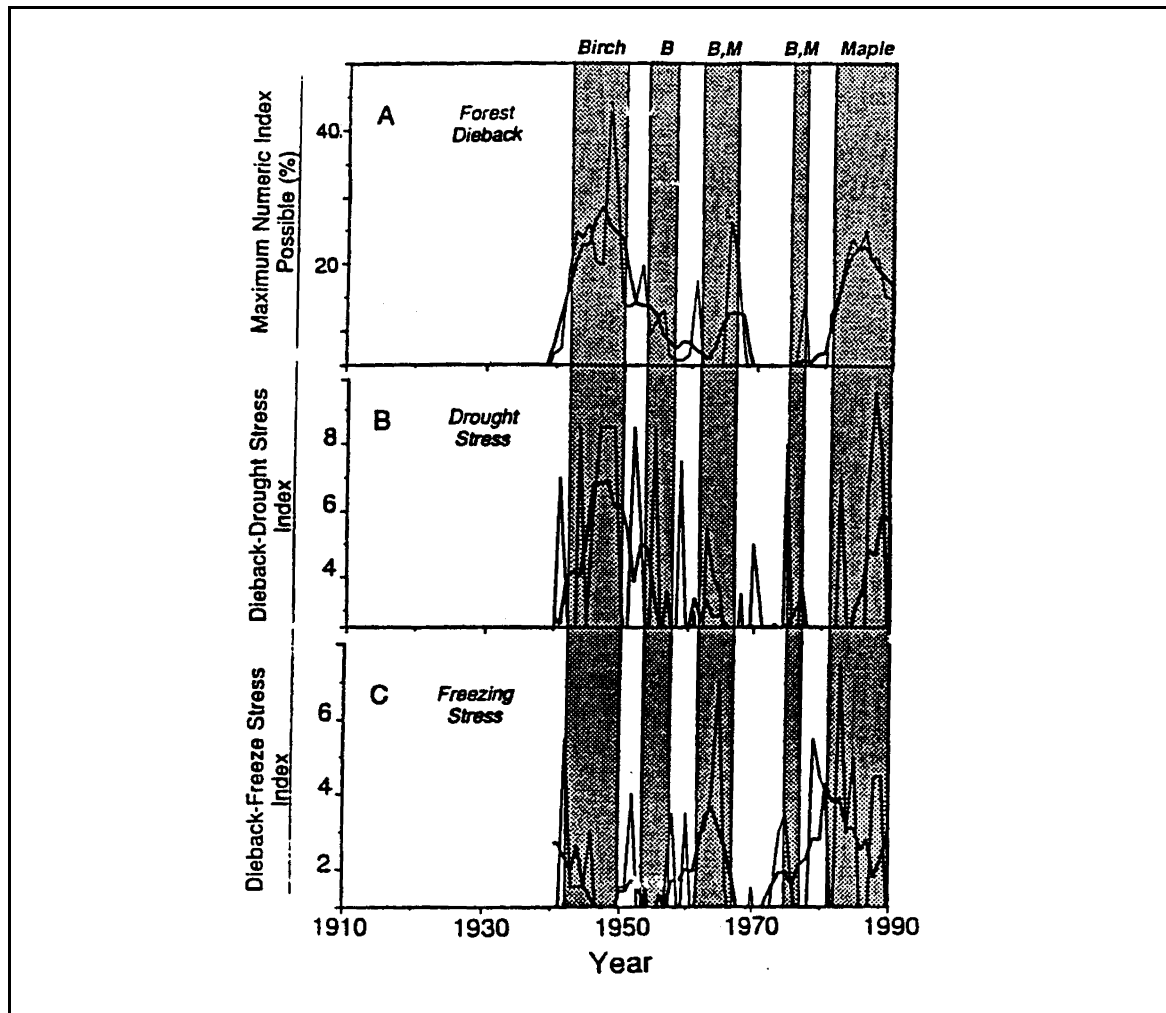
Cette période de dégel fut caractérisée par des températures moyennes au-dessus de 0 °C de 10 jours et des températures nocturnes égales ou supérieures à 0 °C de 6 jours (Robitaille,1982). Le nombre de degrés-jours de chaleur au-dessus de 5 °C, seuil de croissance des plantes, a atteint 20,5 °C à Sherbrooke et 16 °C à Montréal (Robitaille,1982).

Ces extrêmes de températures auraient permis la fonte totale de neige au sol et le débourrement et la coulée extrêmement hâtive des érables. Le gel sévère aurait engendré la mortalité des branches et le gel des racines. D'autres variations climatiques, telles des sécheresses survenues quelques années plus tard, auraient provoqué ou accentué des épisodes de dépérissement (Ordre des ingénieurs forestiers, 1996). Dans le nord des Appalaches, Johnson & al. (1988) ont précisé un lien entre un hiver plus chaud favorisant un développement hâtif des bourgeons sur certaines populations forestières et leur dépérissement éventuel suscité par le gel ultérieur de ces bourgeons.

Les dommages causés par le gel des bourgeons en hiver semblent donc indiquer que les changements subits dans la température ont une influence plus grande sur la végétation que les variations dans la précipitation (Starfield & Chaplin III, 1996). Une telle constatation devient donc fondamentale lorsqu'on tente de simuler l'évolution des populations forestières sous l'effet d'un changement climatique (Saporta & al., 1997).

La dynamique interne des populations forestières (e.g. vieillissement) pourrait être un facteur précurseur important au dépérissement des populations d'arbres. Des événements extrêmes tels le gel/dégel, le gel du système racinaire et des printemps sont des facteurs de stress importants pour les bouleaux et les érables (figure 6.9).

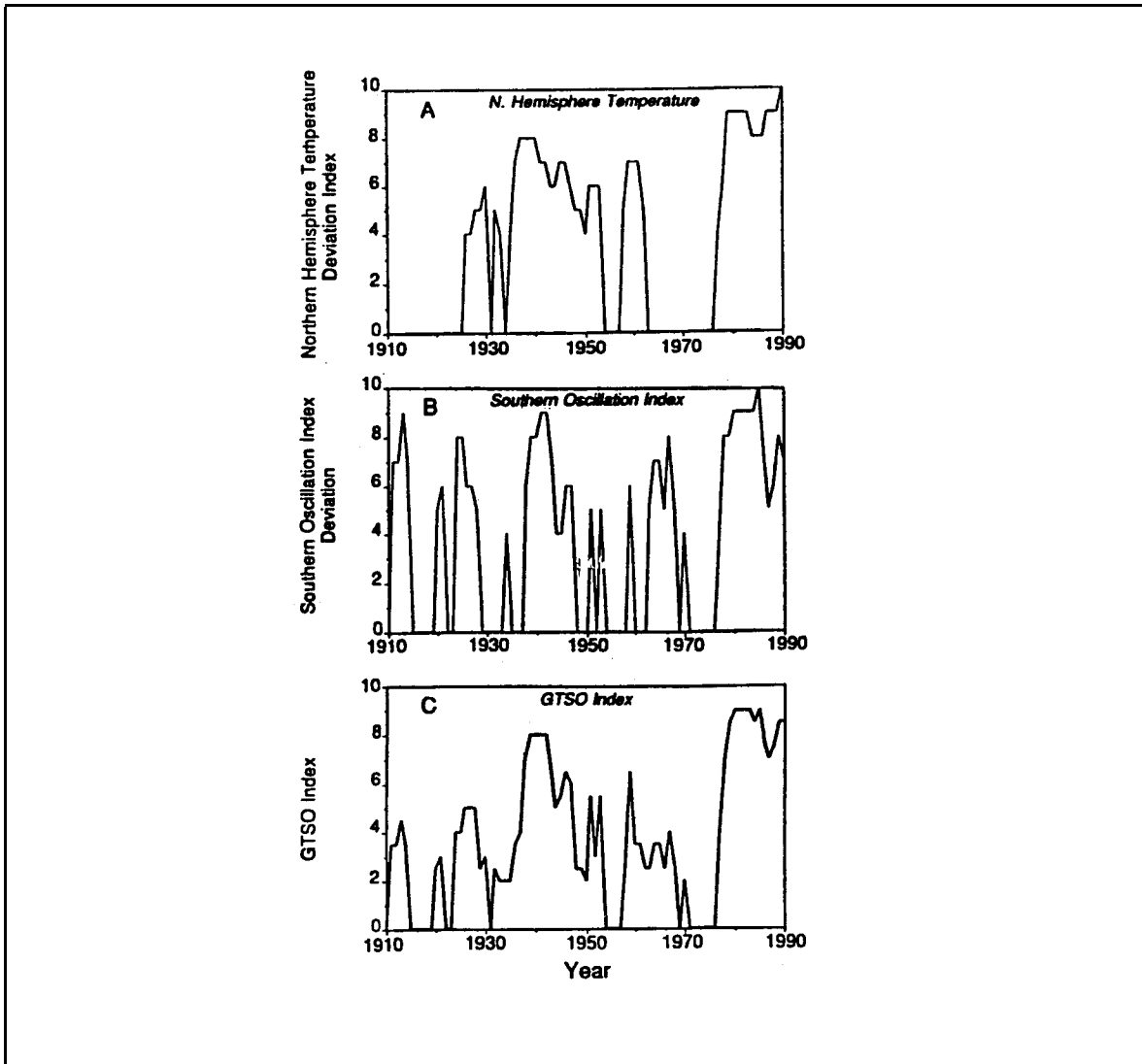
Figure 6.9 - Indice numérique de suppression (a), de stress de sécheresse (b) et de stress de gel (c) entre 1910 et 1990



Source : Auclair & al., 1996

Auclair & al. (1996) mentionnent que la population de bouleau a atteint l'âge de maturité au début des années 1930. Le début et la fin du phénomène de dépérissement est synchrone avec le début et la fin du réchauffement climatique observé entre 1930 et 1950. L'indice «*global temperature southern oscillation(GTSO)*» qui combine la température moyenne annuelle globale et l'indice d'oscillation tropicale présente (figure 6.10) une relation étroite avec la vague de suppression des forêts sur le sud du Québec (Auclair & al.,1996). Les auteurs précisent que le climat serait un des facteurs incitants et même contribuant aux épisodes majeurs du dépérissement des forêts lorsque celles-ci atteignent leur maturité, deviennent vulnérables au divers facteurs de stress.

Figure 6.10 - L'indice GTSO pour la période de 1910 à 1990



Source : Auclair & al.,1996)

D) La comparaison des formes de croissance

Quelques espèces d'arbres ont une plasticité phénotypique qui leur permet de modifier leur forme de croissance lorsque les individus sont soumis à de très rudes conditions climatiques (Lavoie, 1994). Ce sont principalement les conditions climatiques hivernales qui régissent les formes de croissance des arbres en milieu subarctique et subalpin. Payette (1974) a décrit cinq formes de croissance chez l'épinette noire et blanche (figure 6.11):

- arborescente symétrique: épinette ne montrant aucun signe d'érosion nivéo-éolien;
- bougeoir: épinette caractérisée par une tige constituée d'une partie basale densément branchée et feuillie, d'une partie médiane nue et d'une partie apicale légèrement branchée et feuillue. La forme en bougeoir résulte de la dégradation de la forme arborescente symétrique due à l'érosion nivéo-éolienne et à la dessiccation des tissus par le froid, processus particulièrement actifs à l'interface air-neige (Lavoie, 1997, comm. pers.);
- verticille: épinette constituée d'un ensemble de tiges centrées radialement sur un tronc principal;
- fruticoïde: épinette arbustive dont la hauteur, correspondant à l'épaisseur du couvert nival, n'excède pas 2 m;
- empétroïde: épinette prostrée au sol et dont la hauteur, excédant rarement 30 cm, correspond à celle du couvert de neige pendant la période la plus rigoureuse de l'hiver.

Au lac Bush, Filion & al. (1985) décrivent l'évolution de trois types de formes de croissance parmi les krummholz qui deviennent des indicateurs de conditions climatiques variables au cours des 500 dernières années. Ainsi, la croissance d'épinettes subarborescentes entre 1490 et la seconde moitié du XIV^{ème} siècle constitue une preuve directe de l'existence d'un climat clément à cette époque (figure 6.12). Les conditions du Petit Âge Glaciaire auraient précipité leur mort (Filion & al., 1985). Ces épinettes ont pu se régénérer sporadiquement par voie sexuée au cours de XVI^{ème} siècle, et probablement pendant la première partie du XVII^{ème} siècle pour donner naissance à des épinettes fruticoïdes.

Figure 6.11 - Formes de croissance de l'épinette noire et blanche

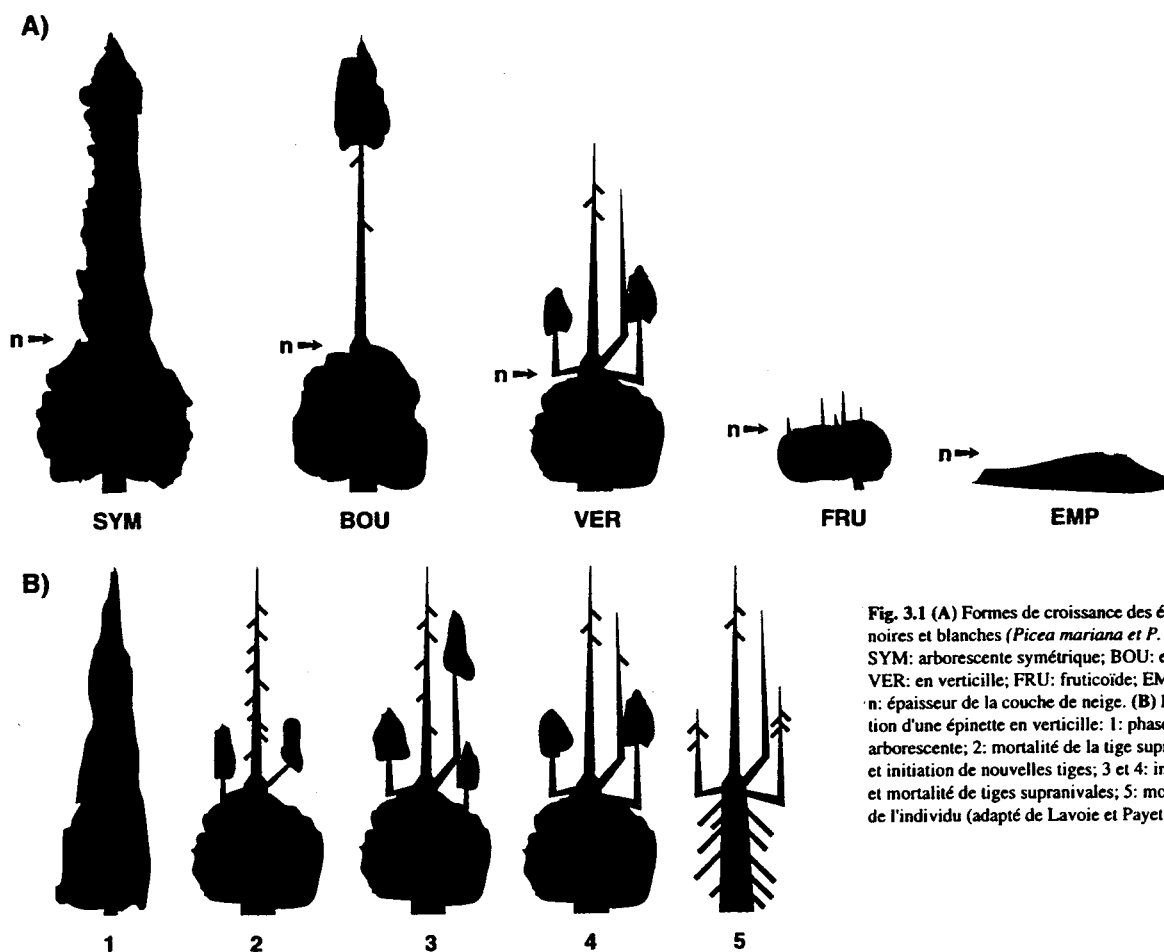


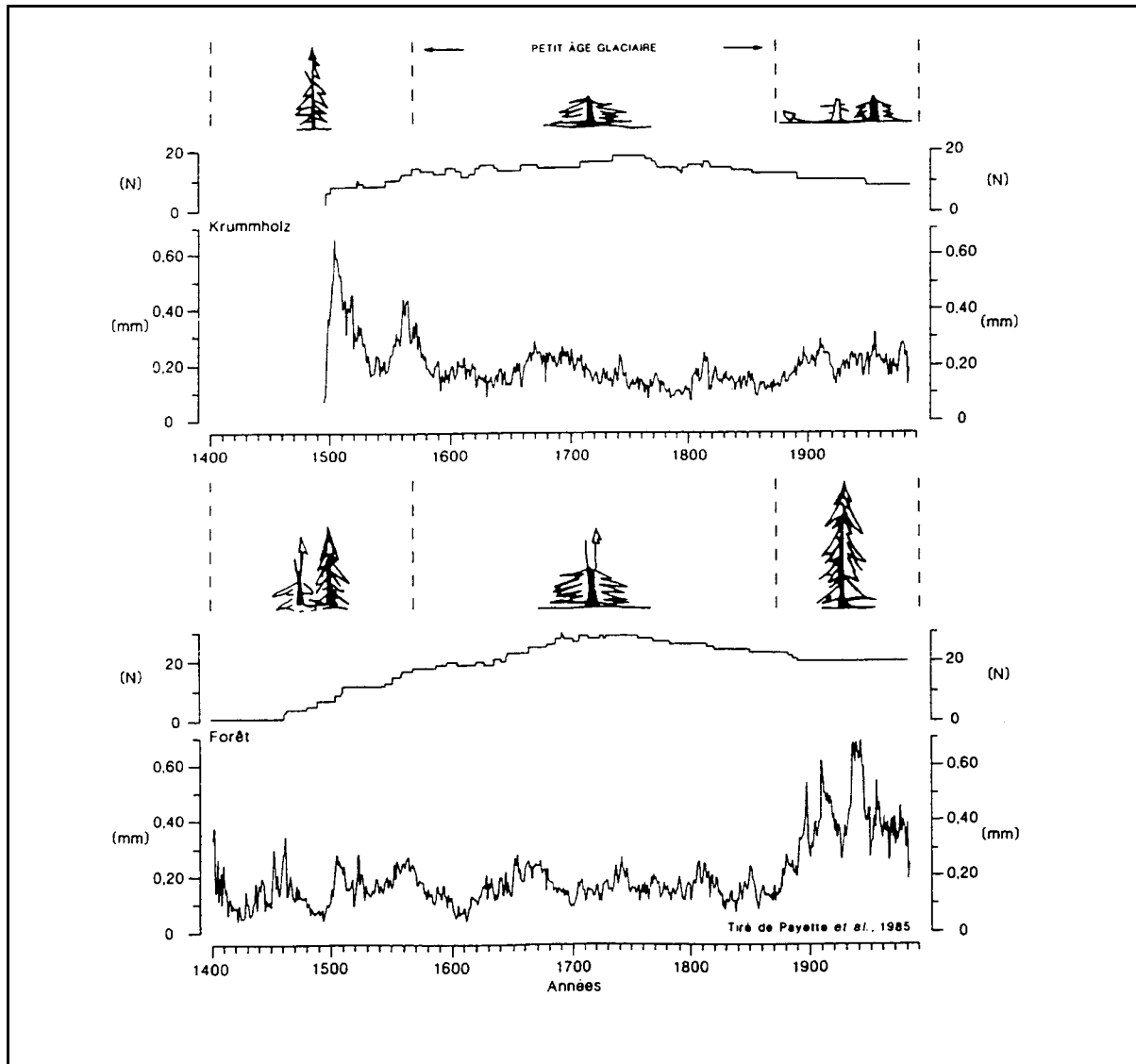
Fig. 3.1 (A) Formes de croissance des épinettes noires et blanches (*Picea mariana* et *P. glauca*): SYM: arborescente symétrique; BOU: en bougeoir; VER: en verticille; FRU: fruticoïde; EMP: empétoïde; n: épaisseur de la couche de neige. (B) Formation d'une épinette en verticille: 1: phase arborescente; 2: mortalité de la tige supranivale et initiation de nouvelles tiges; 3 et 4: initiation et mortalité de tiges supranivales; 5: mortalité de l'individu (adapté de Lavoie et Payette 1994).

Source : Lavoie (1994)

La taille des épinettes n'a jamais dépassé 1 m de hauteur; cette hauteur maximale du reste ayant été atteinte dans quelques cas au cours de la période clémente du XVI^{ème} siècle (Filion & al., 1985). Ces individus se sont développés lentement au cours du Petit Âge Glaciaire et la grande majorité d'entre eux ont vécu 200 à 300 ans avant de mourir au cours du XIX^{ème} siècle. Les parties exposées meurent avant les parties protégées par le couvert nival. Vers la fin du XIX^{ème} siècle, seules les branches inférieures des tiges fruticoïdes de la plupart des individus présents dans le site étaient encore vivantes, vraisemblablement protégées par un mince couvert nival.

À l'aube du XXIème siècle et jusqu'à aujourd'hui n'ont subsisté que quelques épinettes fruticoïdes et un nombre relativement élevé de marcottes prostrées (Filion & al., 1985).

Figure 6.12 - Courbe dendrochronologique établie à partir d'échantillons prélevés dans le krummholz étudié (1490-1982) et la courbe établie par Payette & al. (1985) à partir d'échantillons forestiers (1398-1982)



Source : Filion & al. (1985)

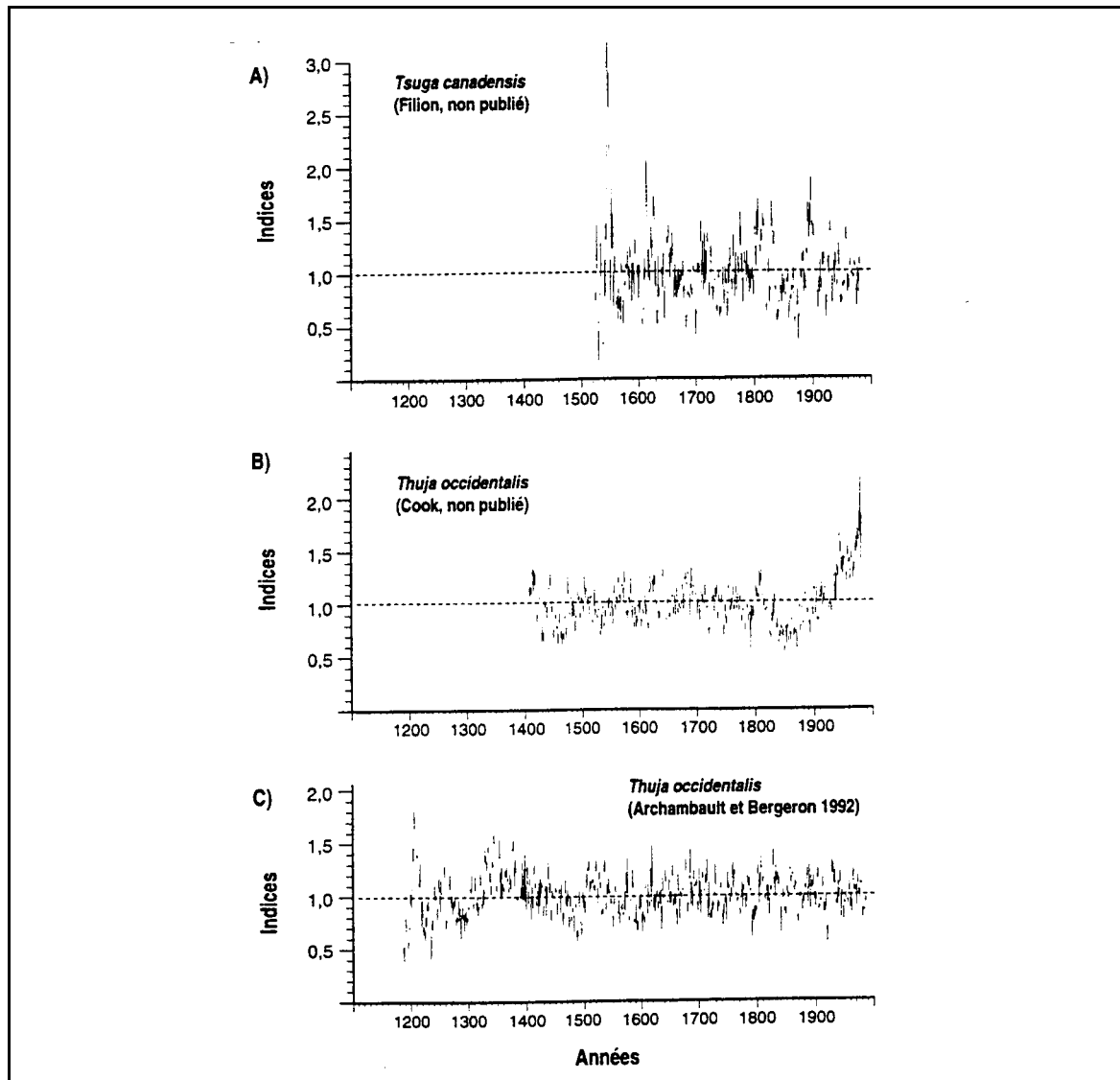
E) Dendrochronologie

Il est clairement démontré par Garfinkel & Brubaker (1980) et Jacoby & al. (1985) qu'il y a une étroite correspondance entre la croissance radiale des arbres et la température, particulièrement celles de la saison estivale dans les milieux subarctiques et subalpins. Il est donc probable qu'advenant un réchauffement substantiel du climat, la largeur des cernes augmenterait de façon sensible. Toutefois, la relation entre le climat et la production de bois chez les arbres du Québec méridional est plus complexe (Lavoie, 1994) et plusieurs facteurs climatiques et physiques peuvent être interreliés.

L'analyse des anneaux de croissance des arbres dans l'est de l'Amérique du Nord montre que les températures estivales présentes et passées combinées à la précipitation ont une influence directe sur la croissance radiale du sapin du Canada et de l'épinette rouge (Cook & Cole, 1991). Au Québec méridional, Lavoie (1994) rapporte que les trois séries qui ont le plus d'intérêt (figure 6.13) sont celles de la pruche de l'Est (*Tsuga canadensis*) (L. Filion, non publié), celle du thuya occidental (*Thuja occidentalis*) en Gaspésie (E.R. Cook, non publié) et celle du Thuya en Abitibi (Archambault & Bergeron, 1992). Les séries de la pruche et du thuya en Gaspésie font ressortir des conditions froides au XIX^{ème} siècle et un réchauffement survenu au cours du XX^{ème} siècle.

Jean & Bouchard (1996) ont mis en évidence l'importance des températures et des niveaux d'eau pour un peuplement forestier riparien en marge du lac Saint-François. Les observations précisent que les variations climatiques ont une influence plus forte sur la croissance des arbres que la fluctuation des niveaux d'eau au lac Saint-François. L'analyse statistique, précise que seulement 9 % de la variation de la croissance des arbres peut être expliquée par la variation des niveaux d'eau. Cependant, entre 46 et 51 % de la variation dans la croissance peut s'expliquer par les variations climatiques (Jean & al., 1992). La période de 1928-1930 met en évidence l'interaction d'un deuxième facteur. L'érable, le thuya et le mélèze, pour cette période, ont subi un déclin ou ont eu un taux de croissance faible qui semble être attribué à de hauts niveaux d'eau (Jean & al., 1992).

Figure 6.13 - Séries dendrochronologiques indicées (a) de la pruche de l'Est, (b) de la Gaspésie et (c) de l'Abitibi

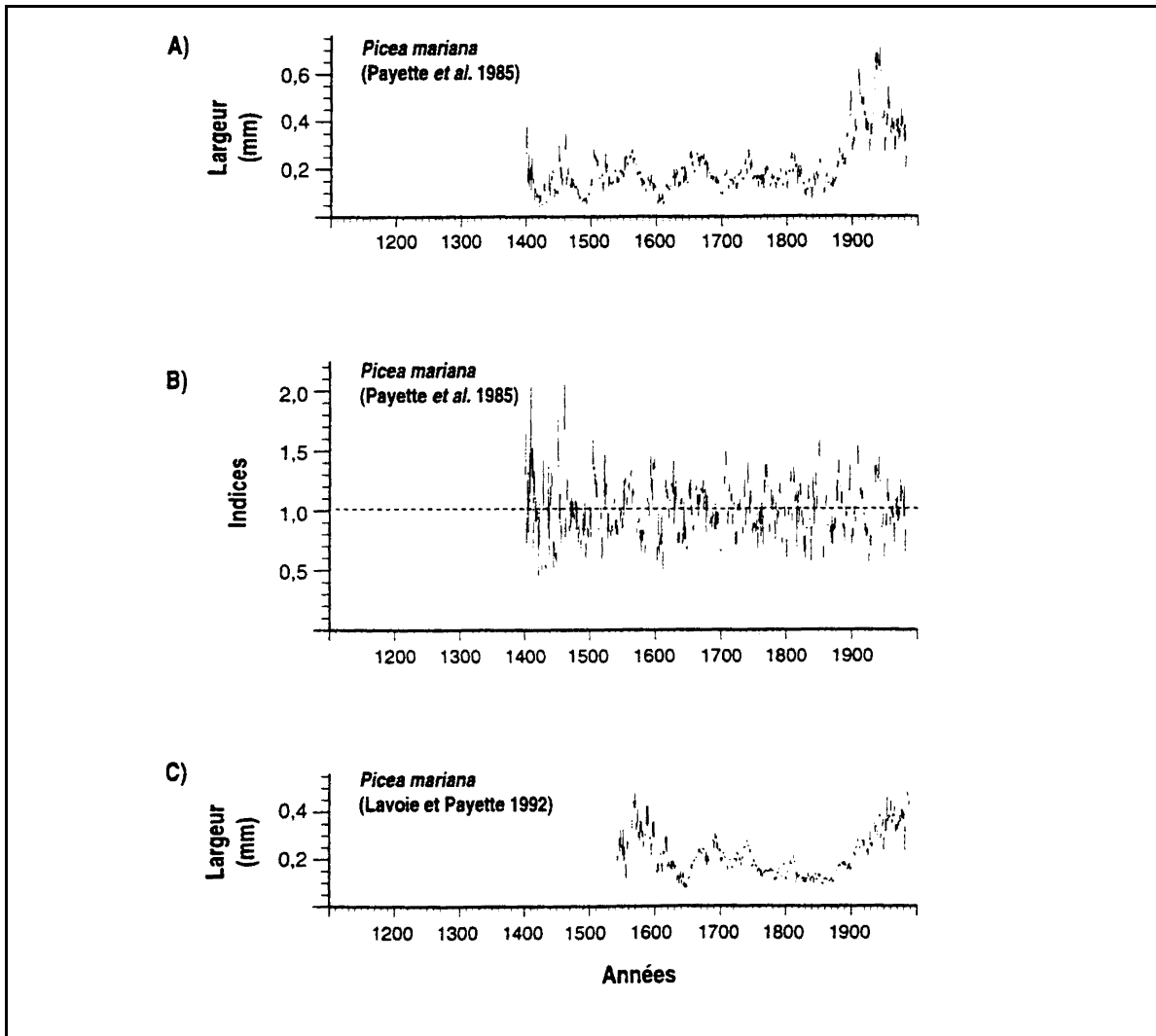


Source : Lavoie (1994)

Les régions subarctiques du Québec et du Labrador sont celles qui comptent le plus grand nombre de travaux dendrochronologiques dans le nord-est de l'Amérique du Nord. La plupart de ces études sont des analyses dendrochronologiques des écosystèmes nordiques. Il est possible de tirer certaines informations de ces travaux sur le climat actuel ou sur celui des siècles précédents, mais il est difficile d'établir un lien direct entre la largeur des cernes et la température de la saison de croissance (Lavoie, 1994). Les courbes dendrochronologiques de la région du lac Bush et de la rivière Boniface de Payette & al. (1985), Arseneault & Payette (1992) ainsi que Lavoie & Payette (1992) illustrent la période

du Petit Âge Glaciaire (figure 6.14), caractérisée par des températures froides et des précipitations neigeuses faibles (Bégin & Payette, 1988; Payette & Delwaide, 1991; Lavoie & Payette, 1992).

Figure 6.14 - Séries dendrochronologiques (a) du lac Bush (valeurs brutes), (b) du lac Bush (valeurs indicées) et (c) de la rivière Boniface (valeurs brutes)



Source : Lavoie (1994)

Le Petit Âge Glaciaire a été précédé d'une période froide entre 1305 et 1435 et d'une période clémente de 1435 et 1570 (Payette & al., 1990a) puis a été suivi d'une période clémente de 1880 à nos jours (Payette & al., 1985 ; Bégin, 1991 ; Arsenault & Payette, 1992 ; Lavoie & Payette, 1992). Durant les périodes froides, les épinettes avaient des

formes arbustives avec de multiples réitérats, alors que durant les périodes clémentes, la plupart des individus avaient une forme arborescente avec un tronc unique, du moins dans les endroits protégés (Lavoie,1994).

Neilson (1995) a montré le lien entre le climat et la distribution des biomes. L'interaction écologique entre la forêt et son environnement est également primordiale. Suffling (1995) a démontré que 61 % de la variation des types de populations forestières dans la forêt boréale pouvait être expliqué par la fréquence des feux de forêt seulement. Une fréquence élevée de perturbations écologiques modifie la composition des populations dans la zone forestière et augmente le taux de réponse au changement climatique (Overpeck & al.,1990).

Des changements écologiques survenus dans le passé géologique ont entraîné des modifications au niveau de la gamme des espèces, de la composition des populations et l'extinction de certains types de groupements (Saporta & al.,1997). Peters (1990) estime que les taux importants de changements du climat amènent les répercussions les plus intenses au niveau des forêts.

Jacoby & D'Arrigo (1995) indiquèrent que le stress hydrique dans les forêts à haute latitude semble être un paramètre limitatif à la croissance des forêts sous un régime thermique plus chaud.

6.7.2. Les forêts du Québec sous un environnement 2xCO₂

Les espèces forestières ont dû s'adapter à des milieux en changement au cours des 12 000 dernières années. Les répercussions des variations climatiques appréhendées (température et précipitation) sur les espèces forestières, accentuées par la hausse des gaz à effet de serre, seront probablement indirectes (Gouvernement du Québec,1996b; Lachapelle,1990):

- modifications du régime hydrique des écosystèmes,
- régimes de perturbations et des maladies,
- taux de reproduction ou de la compétitivité des espèces qui, dans certains habitats, pourrait s'accroître.

Singh (1989) mentionne qu'une augmentation du rythme de croissance de la forêt serait probablement accompagnée d'un accroissement des dommages dus aux maladies, aux ravageurs et aux insectes.

Dans un tel contexte, il y aura des problèmes de mobilité et d'adaptation des essences forestières (Lachance,1990). Les écosystèmes migreront vers le Nord où les conditions édaphiques ne sont pas nécessairement appropriées (Lachance,1990; Cantin,1997). Par ailleurs, certains écotypes montrant actuellement peu de vigueur ou de compétitivité, s'avèreraient mieux adaptés aux nouvelles conditions environnementales. Sous une pression climatique accrue, on ne peut exclure l'extension de l'aire de distribution d'autres espèces présentement absentes du territoire, qui pourraient le coloniser si les futures conditions écologiques le permettent. Par exemple, l'introduction du noyer noir dans la région de Québec en 1882 correspondant à un déplacement de presque 4 degrés de latitude, démontre que certains arbres issus de populations méridionales pourraient survivre et se reproduire dans une région actuellement plus froide.

L'industrie forestière sera tout autant affectée par un réchauffement climatique:

- l'approvisionnement en essences serait perturbé pour les usines (Lachance,1990);
- le succès des opérations de reboisement pourrait diminuer (Lachapelle, 1990);
- les activités forestières hivernales seraient réduites en raison de la brièveté des hivers dans les régions septentrionales (Écosomet,1996) et
- l'augmentation des fréquences de faibles débits des cours d'eau pourrait avoir un impact sur l'approvisionnement en eau des usines (Lachapelle,1990).

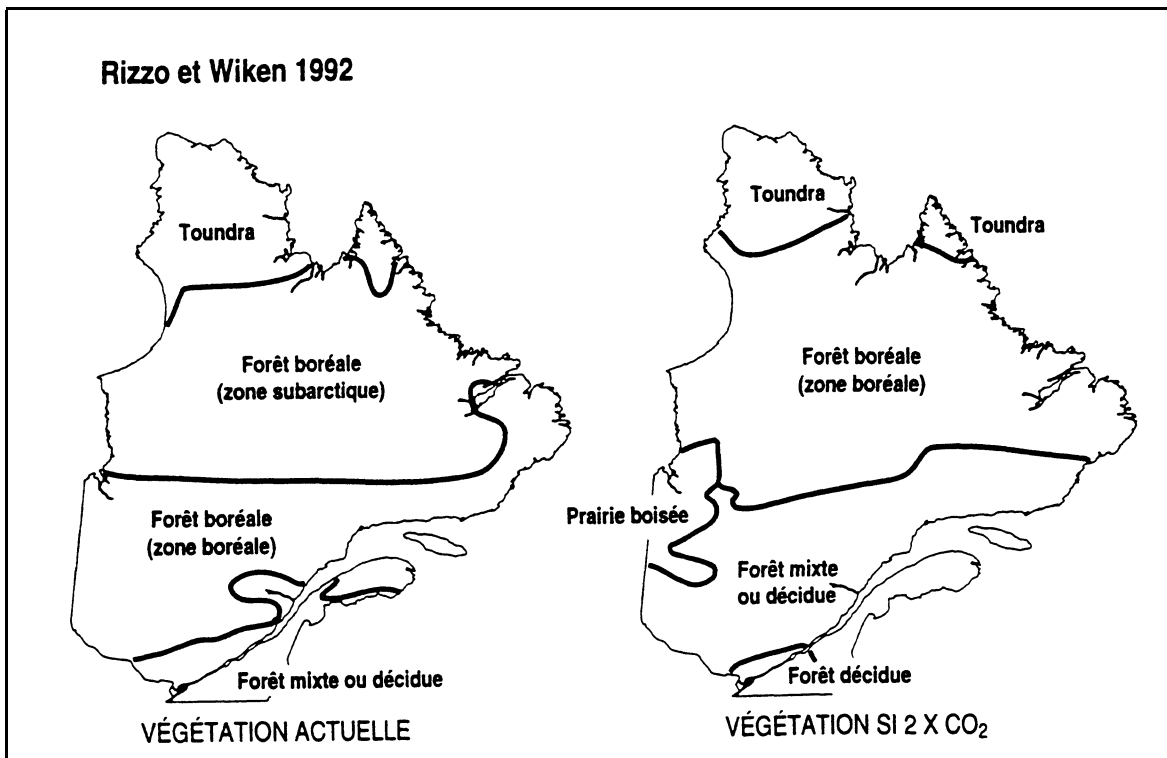
L'industrie des pâtes et papiers sera affectée par tout changement climatique avec une modification probable sur la répartition des biomes forestiers, les frontières bioclimatiques du Québec et la productivité de certaines forêts (Lavoie,1994; Lachapelle,1990). Une augmentation des températures pourrait déplacer vers le nord l'aire potentielle de croissance des biomes d'épinette noires. Cependant, à la lumière des connaissances sur les mécanismes de régénération par graines de l'épinette, il est très peu probable que ce potentiel se réalise, puisque les lits de germination et la dispersion des graines ne sont pas liés à la hausse des températures (Gagnon,1997). Selon cet auteur, au cours des 50 prochaines années, on n'envisage pas d'extension vers le nord du biome composé principalement d'épinettes noires.

Au plan de la modélisation d'un changement futur du climat, Lavoie (1994) résume les résultats des huit modèles climat-végétation basés sur la classification de premier niveau des biomes forestiers de Holdridge (1947):

- le modèle de Solomon & al. (1984) utilise les degré-jours de croissance supérieurs à 5 °C ainsi que les précipitations annuelles et prévoit, pour le Québec-Labrador une légère remontée de la limite des forêts, une réduction majeure de la superficie de la toundra forestière au profit de la forêt boréale et une extension vers le Nord de la forêt mixte. Monserud & al. (1993) arrivent aux mêmes conclusions;
- le modèle d'Emanuel & al. (1985), par le biais du MCG GFDL, tente de déterminer la position future des zones d'Holdridge. Dans ce scénario, la forêt boréale est remplacée par la forêt mixte ou décidue avec la toundra disparaissant au profit de la forêt boréale. L'extrémité nord de la péninsule d'Ungava serait occupée par une végétation de steppe. Singh (1989) regarda également la position et la superficie future des biomes en utilisant le MCG GFDL et GISS et arriva à un déplacement vers le nord et une réduction de la toundra et de la forêt boréale de 254 407 km² et de 168 190 km² respectivement et une hausse des superficies de la forêt mixte de 565 636 km². Solomon (1992) et Smith & al.(1992), avec la même approche mais à partir de plusieurs MCG disponibles du temps, obtinrent des résultats allant dans le même sens;
- le modèle de Kauppi & Posch (1988) associe la forêt boréale à la fourchette de 600 à 1 300 degrés-jour. Utilisant le MCG du GISS, la forêt boréale au Québec en est ainsi considérablement réduite;
- Rizzo & Wiken (1992) ont cartographié les régions écoclimatiques du Canada à l'aide de 9 variables climatiques et, à l'aide du MCG GISS, anticipent pour le Québec-Labrador la disparition de la forêt boréale au profit d'une forêt de prairie boisée et la substitution de la forêt de type subarctique par la forêt boréale.

La figure 6.15 donne un exemple parmi tant d'autres (celui de Rizzo & Wiken,1992) du type de simulations effectuées à partir des modèles climat-végétation.

Figure 6.15 - Modèle de Rizzo & Wiken(1992) créant les biomes du Québec-Labrador sous des conditions de 2xCO₂ à partir du modèle climat-végétation d'Holdridge (1947)



Source : adapté de Lavoie (1994)

Lavoie (1994) se fait cependant très critique de cette approche. En effet, les conclusions des modèles climat-végétation pour le Québec-Labrador doivent toutefois être considérées avec prudence, compte tenu de la faible résolution spatiale des modèles de circulation générale. Selon lui, d'autres facteurs autres que le climat peuvent modifier la réponse réelle des écosystèmes à la suite d'un réchauffement et il souligne que les modèles ne considèrent pas des caractéristiques biologiques des espèces et des facteurs comme le délai dans la migration des espèces dû à la capacité de dissémination des plantes et la compétition interspécifique ainsi qu'une modification au régime des perturbations (feux, chablis, épidémies).

Le modèle d'Auclair & al.(1996) pointe effectivement dans cette direction en examinant davantage la dynamique des peuplements forestiers. Les auteurs démontrent que certains facteurs climatiques ont eu un impact direct sur la dynamique et la suppression des peuplements forestiers de bouleau et d'érable du sud du Québec et du Nord-Est des États-Unis. Basé sur le taux de maturation et différents paramètres

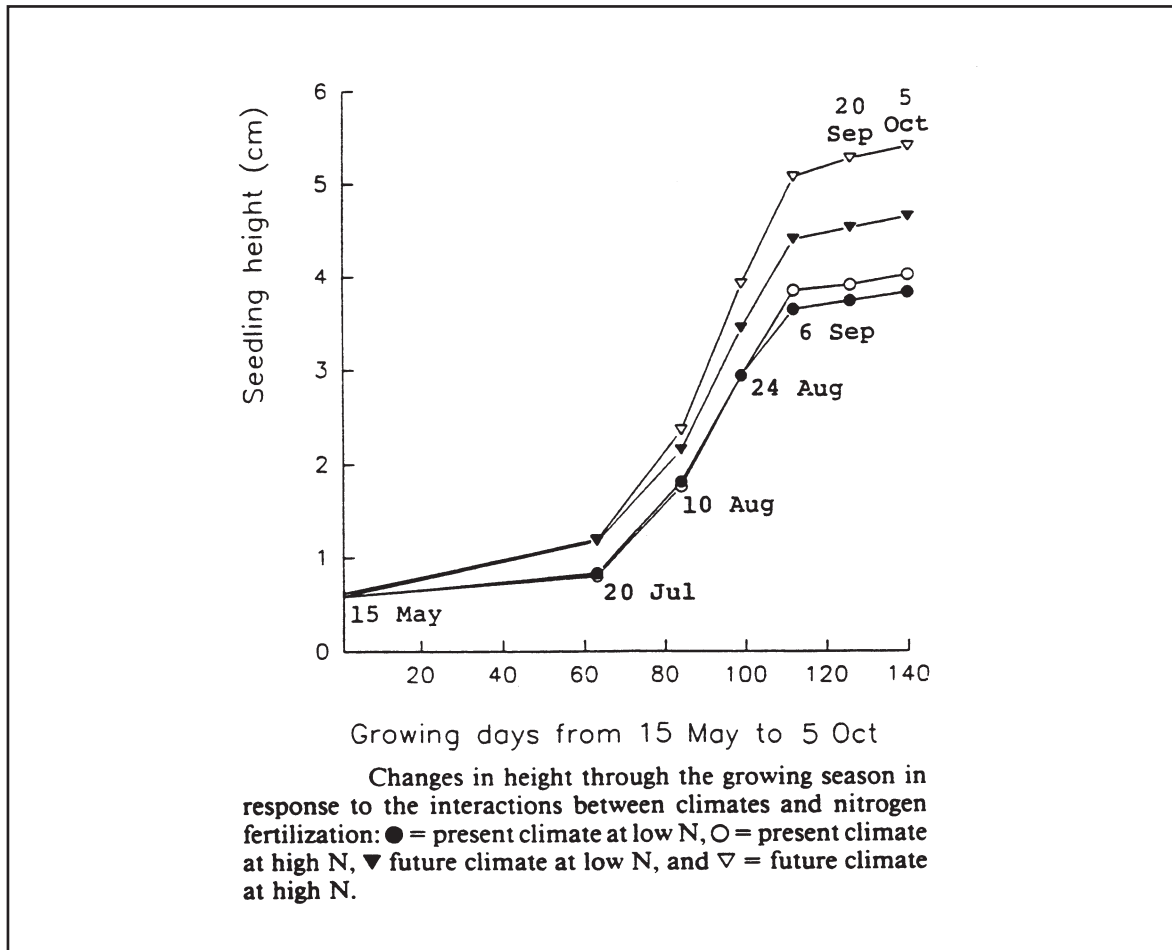
climatiques, ils prévoient que les prochains épisodes majeurs de suppression surviendront à la fin du 21^{ième} siècle (2045 et 2085).

Cantin (1994) et Wang & al.(1994) ont précisé l'importance relative des réponses de la biomasse et celles des siliques du pin gris (*Pinus banksiana Lamb*) et de l'épinette noire (*Picea mariana*) en simulant, dans un environnement artificiel, l'augmentation des concentrations de CO₂ et des températures. Les résultats démontrent que les familles les plus performantes actuellement ne le demeureraient pas nécessairement sous un climat altéré par un enrichissement en CO₂ et des températures plus élevées (Cantin & al.,1997) en ayant un effet significatif sur la biomasse de la plupart des organes reproducteurs et l'efficacité d'utilisation de l'eau. La hauteur et les autres variables de croissance sont demeurées comparables chez le pin gris. Des 15 familles étudiées, quatre d'entre elles ont particulièrement bien profité d'un enrichissement atmosphérique en CO₂ et d'un réchauffement global du climat (Cantin,1994).

Wang & al. (1994) rapportent que l'interaction du climat et de l'azote a un effet positif sur le taux de reproduction, la biomasse végétale sèche et le poids sec des racines de l'épinette noire. La grosseur et la survie des semis ainsi que la croissance des jeunes plants seront avantagées sous des conditions climatiques futures et en présence d'un taux d'azote élevé (figure 6.16). Les résultats suggèrent que le CO₂ a un effet sur la germination des semis d'épinettes noires. Le nombre de jours de germination diminue généralement avec une augmentation de la masse du semis (Wang & al.,1994).

Keeling & al. (1996) démontrèrent que des changements dans le flux annuel de CO₂ pouvaient mener à une augmentation de l'assimilation du gaz carbonique par les écosystèmes forestiers. De fait, dans une simulation du bilan annuel en carbone, Kurz & al.(1992) concluent qu'une hausse de 10 % de CO₂ atmosphérique se traduirait par une augmentation de 10 % de la biomasse, de 10 % de l'émission de carbone causée par les perturbations et de 2 % du flux de carbone venant du sol. Les auteurs soupçonnent qu'un changement climatique perturberait la dynamique de séquestration du carbone dans la forêt et le sol et qu'une rétroaction négative serait à prévoir entre le CO₂ et les taux de croissance des arbres.

Figure 6.16 - Changement dans la hauteur des plantes de croissance en réponse à l'interaction entre le climat et la fertilisation en azote au cours de la saison



Source : Wang & al. (1994)

Campagna (1996) insiste sur le fait que les modèles permettant d'établir le bilan de carbone dans les écosystèmes forestiers soient basés sur des processus physiologiques car, durant les prochaines décennies, les arbres seront exposés à des changements non seulement de la concentration atmosphérique de CO₂ mais aussi à des variations extrêmes de température et de pluviométrie. Bien que des études à court terme aient statué sur les effets de l'augmentation de CO₂ sur la croissance de semis forestiers (Jarvis 1989), il demeure que la réaction des arbres et des forêts à des concentrations élevées de CO₂ et aux changements climatiques qui y sont potentiellement associés reste à définir.

Des concentrations à la hausse du gaz carbonique atmosphérique, le gaz à effet de serre le plus commun, auront des répercussions directes sur les besoins et les processus physiologiques des forêts, tout en affectant indirectement les perturbations écologiques et les stress sur les habitats (Shugart,1986).

D'après les membres du groupe de recherche VEMAP (1995) qui examinèrent les effets d'un changement climatique sur les forêts en utilisant des modèles couplant les aspects biogéographiques (patrons de distribution de la végétation) et les éléments biogéochimiques (nutriments et cycles hydrologiques), les forêts seront principalement affectées par des variations dans la température moyenne et la disponibilité d'humidité dans le sol.

Il est vraisemblable de croire que plusieurs facteurs entrant en jeu dans la prise de décision des gestionnaires de forêts seront probablement affectés par un changement climatique. On peut penser aux caractéristiques des écotypes, à la période de rotation d'exploitation, aux prescriptions sylvicoles et à la demande du marché (Saporta & al.,1997). De fait, le changement climatique ne fait qu'ajouter de l'incertitude aux modèles actuellement utilisés pour prévoir la croissance de la forêt, la planification de la grille d'exploitation et l'analyse de l'offre et de la demande (Rose & al.,1987).

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat du secteur FORESTERIE au Québec est MOYEN* car

Pour un nombre limité d'espèces forestières, les mécanismes liant l'écosystème forestier, l'atmosphère et le sol sont bien connus. Il devient cependant difficile de transposer ces connaissances sur une longue période ou pour l'ensemble de la province

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur la FORESTERIE est FAIBLE car

plusieurs simulations climat-végétation ne tenant cependant pas compte des sols, des caractéristiques biologiques et de l'incidence des extrêmes climatiques ont été faites sur les principaux biomes forestiers du Québec. Un couplage des modèles biologiques et des modèles régionaux du climat a été amorcé

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : *très bon, bon, moyen, faible et très faible*

6.8. Infrastructures et pergélisol

Les études concernant l'aspect des changements climatiques et leurs effets sur les infrastructures sont peu documentées. Cependant, il ressort de la revue de la littérature que les effets des variations climatiques peuvent être considérables sur un type d'infrastructure particulier et négligeables pour d'autres. Soulignons la préoccupation constante des infrastructures liées aux régions nordiques dont les conditions climatiques sont extrêmes. C'est pour cette raison que la présente section regroupe autant les infrastructures que le pergélisol. La présente section aborde tout particulièrement les conséquences des variations climatiques sur les réseaux collecteurs d'eaux usées et la sensibilité des infrastructures des régions en présence de pergélisol.

6.8.1. La sensibilité des infrastructures et du pergélisol au climat

À l'échelle québécoise, les infrastructures municipales liées à l'eau (stations de production d'eau potable, réseaux d'aqueducs et de collecte d'eaux usées, stations d'épuration) sont évaluées à 40 milliards de dollars, soit 50 % de toutes les immobilisations municipales (Parent, 1997).

En date du 1^{er} janvier 1996, 142 municipalités riveraines du Saint-Laurent sur les 334 étaient desservies par un ouvrage d'assainissement des eaux sanitaires (Centre Saint-Laurent, 1996) comparativement à 14 en 1989 (Gouvernement du Québec, 1989). Plus de 3 253 930 personnes (83 % de la population riveraine) traitent leurs eaux usées municipales dans 92 usines d'épuration (Centre Saint-Laurent, 1996). Les eaux usées sanitaires ou pluviales peuvent contenir des particules minérales (poussières, sables, gravier) emportés par le ruissellement des eaux de précipitation et captées par le réseau d'égout pluvial, de la matière organique, des éléments nutritifs, des bactéries, des résidus de produits toxiques, des huiles et des graisses et finalement des sels de déglçage et des fondants chimiques utilisés pour le déneigement.

Certains ouvrages collecteurs des eaux usées posent des problèmes de gestion sous des conditions de précipitations anormalement importantes. Les eaux pluviales représentent une des plus importantes sources de pollution d'origine diffuse (Couillard & Lefebvre, 1986). Les eaux de débordement sont la source majeure de contamination des cours d'eau en milieu urbain et les charges polluantes résultant de l'évacuation des eaux de ruissellement urbain sont considérables particulièrement durant des événements pluvieux (Villeneuve & al., 1992 ; Lavallée, 1989 ; Lavallée & al., 1984). L'impact des débordements implique une détérioration globale des milieux récepteurs pouvant se poursuivre jusqu'à 3 jours après la fin de ceux-ci.

Peu d'informations existent sur les débordements sanitaires et la gestion des eaux usées lors de précipitations importantes ainsi que sur les impacts sur le milieu récepteur des événements. Les débits en temps de pluie dans les réseaux d'égouts peuvent être très élevés et atteindre plus de 50 fois les débits de temps sec. Le débit arrivant à la station d'épuration de la CUM est de 1,3 million m³/jour, en temps sec. Cette valeur peut doubler ou tripler en période de pluie forte ou de fonte de neige (Pham & Proulx, 1996). La fréquence des débordements varie en fonction des conditions climatiques, la configuration des surfaces de drainage et les temps de déplacement des conduites et la capacité des conduites existantes et des ouvrages de contrôle (Gouvernement du Québec, 1989).

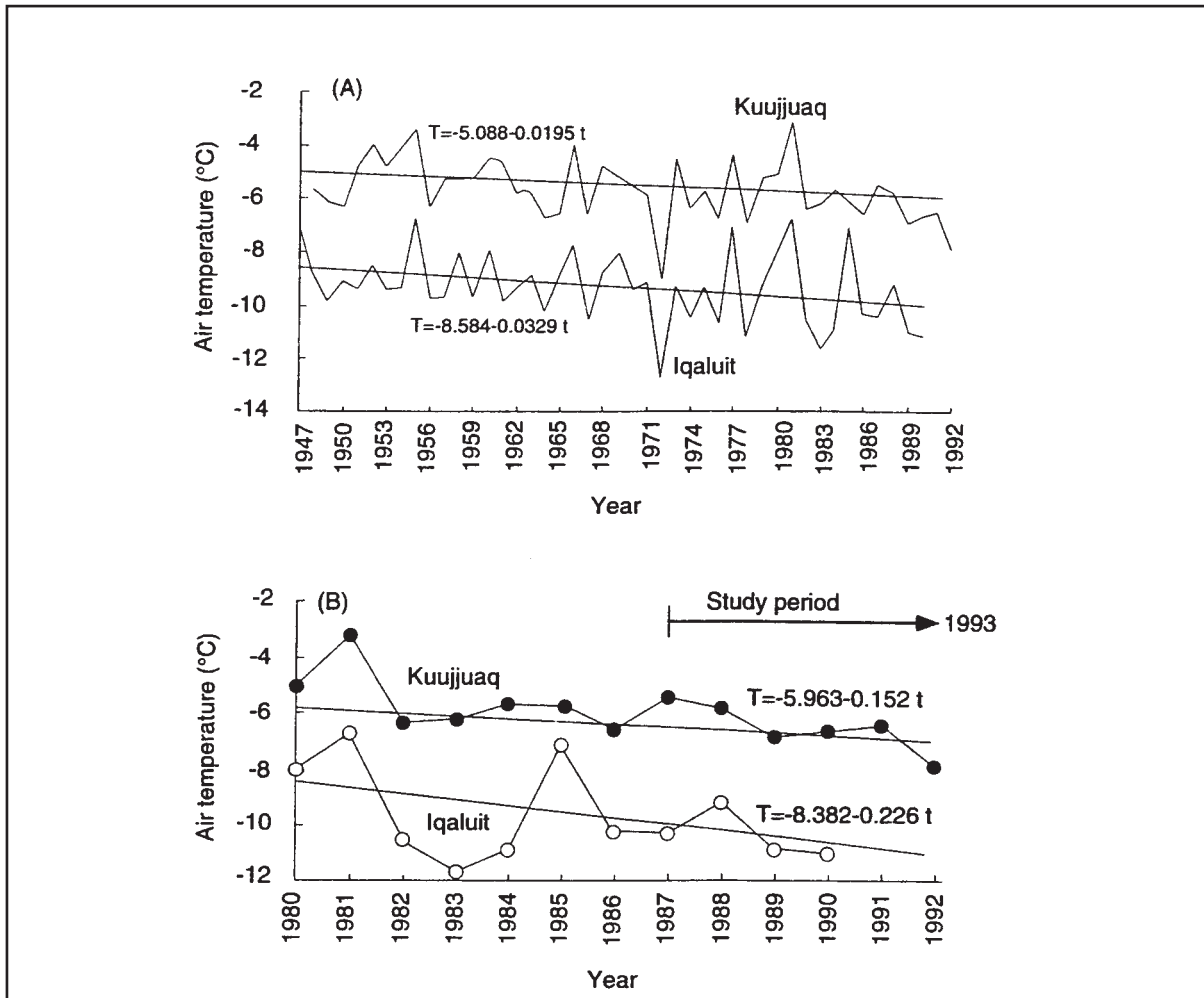
Dans un contexte régional différent du fleuve, les milieux nordiques présentent des conditions climatiques que sont extrêmes. Elles seront donc les plus sensibles aux variations climatiques. Le pergélisol est un phénomène sensible à tout changement de température. Selon la topographie et le couvert végétal, des zones de pergélisol en croissance et en dégradation peuvent coexister particulièrement dans des régions où le pergélisol est discontinu (Williams & Smith, 1989). Ce comportement indique des interactions complexes entre la température du sol et la teneur en glace à diverses profondeurs, le couvert nival, la structure des sédiments et les caractéristiques de la végétation (âge, densité).

Les températures de l'air aux stations de Iqaluit et Kuujuaq, depuis 40 ans, démontrent un taux de refroidissement de 0,02 et 0,03 °C par année. La tendance à la baisse des températures moyennes de l'air est de 1,09° C, telle qu'indiquée à la figure 6.17 (Wang & Allard, 1995). Depuis le début des années 80, le taux de refroidissement est de 0,19 °C par année. Les températures du pergélisol étant directement liées au régime thermique à la surface du sol (Lunardini, 1981), ce type de sol constitue donc un terrain propice pour évaluer une réponse au changement climatique.

Les mesures des profils thermiques du pergélisol, effectuées par Allard & al. (1995), le long du détroit d'Hudson (Salluit, Kangiqsujaq et Quaqtq) entre 1988 et 1993, précisent l'importance des variations des températures de l'air ainsi :

- le pergélisol s'est refroidi régulièrement à un taux observé de 0,05° C par année au cours de la période;
- la tendance au refroidissement observée à une profondeur de 20 m'est tout-à-fait consistante avec celle observée en utilisant les températures de l'air à Kuujuaq et Iqaluit.

Figure 6.17 - Température moyenne de l'air à Kuujjuaq et Iqaluit depuis (a) 1947 et (b) 1980



Source : Allard & al. (1995)

Ce refroidissement dans la péninsule d'Ungava, de l'Est de l'Arctique canadien et du Nord-Ouest de l'Océan Atlantique est probablement induit, entre autres, par la dynamique de la circulation thermohaline dans les mers situées à proximité. Cette dynamique de circulation des eaux marines contrebalance la tendance au réchauffement observé ailleurs à travers le monde. Mysak & al. (1990) ont tenté d'expliquer la cause de ce phénomène en faisant le lien entre l'augmentation de la décharge d'eau douce (suscitée par le réchauffement du climat dans la partie ouest du pays) et la présence observée d'une couverture de glace plus épaisse et plus étendue dans les mers du Labrador et du Nord Atlantique. La fonte de ces zones de glace combinée aux précipitations liquides réduit considérablement la convection thermohaline qui permet à l'eau plus chaude des eaux profondes du Nord Atlantique d'être ramenée vers la surface (Mysak & al., 1990).

Les surfaces océaniques deviennent donc plus froides et refroidissent autant l'atmosphère que les zones adjacentes (Walsh,1993). Read & Gould (1992) prévoient que la prochaine décennie verrait cette tendance au refroidissement se poursuivre.

Dans le but de mieux comprendre la séquence des processus affectant le pergélisol, sous un stress thermique accentué du sol causé soit par des modifications climatiques ou écologiques, Allard & al. (1996) ont tenté de reconstruire l'évolution historique d'un plateau de pergélisol discontinu situé le long de la côte de la baie d'Hudson (à l'est des îles Manitounuk près de Whapmagoostui/Kuujuaraapik).

L'analyse dendrochronologique démontre que le plateau de Manitounuk commença à être occupé par la forêt vers 1830, à une époque où le niveau était d'environ 1 m plus élevé que maintenant. Les gradients thermiques dans le sol durant l'hiver étaient alors particulièrement élevés (4-5 °C/m) et le pergélisol d'épaisseur relativement petite. La croissance de la forêt fut particulièrement marquée durant la période 1920-1940, correspondant au réchauffement climatique du début du 20^{ième} siècle, et on note une expansion rapide des épinettes blanches le long de la côte d'environ 50 m en 33 ans soit 1,5 m/an (Payette & Fillion,1985). Cette augmentation de la densité de la forêt favorisa un couvert nival plus épais localement, permettant ainsi au sol d'être isolé des températures très froides de l'air. On note ainsi un réchauffement du profil thermique du pergélisol.

Allard & al. (1996) notèrent qu'une période d'environ 20 ans sépare les premiers signes de colonisation forestière du début de la dégradation du pergélisol. Cette dégradation peut être plus accentuée sur les versants du plateau où la végétation était plus dense. Les auteurs suspectent que les répercussions d'un changement climatique (réchauffement ou refroidissement ou changement de précipitation) dans les zones de pergélisol risquent de se traduire surtout par des modifications écologiques (structure des populations forestières) ou géomorphologiques (profil thermique) indirectes.

6.8.2. Le pergélisol et les infrastructures sous un environnement 2xCO₂

Bien que IPCC (1995) mentionne l'importance des modifications qu'une hausse du niveau de la mer aurait, tant au niveau des infrastructures que de la sensibilité des populations aux événements extrêmes, aucune étude à notre connaissance n'a été menée au Québec pour mieux connaître les effets que pourrait avoir sur les infrastructures routières une hausse du niveau de la mer dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Les seules études canadiennes

menées sur ce sujet ont été effectuées dans les Maritimes (Martec,1987; Lane & al.(1988); Stokoe & al.,1988) et sur la côte du Pacifique (Clague,1989; Beckmann & al.,1997) suggérant des impacts économiques majeurs sur les ponts et les municipalités situées le long des côtes.

La hausse globale du niveau marin et conséquemment, une érosion côtière accrue pourraient devenir problématiques, notamment dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent où la tendance de l'écorce terrestre est déjà vers la subsidence. Les marais du bas Saint-Laurent sont dans la ligne de tir même s'ils sont plus sujets aux marées et aux tempêtes qu'à l'abaissement du débit fluvial. Des éboulis sur les côtes rocheuses (e.g. Gaspésie), des glissements de terrain (e.g. côte Nord) et des pertes de plages (Iles-de-la-Madeleine) risquent donc de s'accroître en fréquence (Allard, 1997 - comm. pers.).

Pour ce qui est du pergélisol, le chapitre 4 illustre déjà qu'aucun réchauffement significatif ne s'est encore amorcé au Québec nordique. Cependant, le réchauffement général du 20^e siècle a déjà entraîné beaucoup de thermokarst dans la zone de toundra forestière, modifiant ainsi la structure écologique des paysages. Une prudence continue est donc de mise.

Les infrastructures sur pergélisol courent relativement peu de risque parce que la plupart des constructions sont bâties sur des sols contenant peu de glace. De plus, les habitations et les édifices publics sont actuellement conçus (radiers, pieux, thermo-siphons) pour maintenir le pergélisol dans les fondations tant que le réchauffement ne sera pas vraiment excessif menant presque au dégel naturel du sol. Les infrastructures du Québec nordique les plus importantes sont les pistes d'atterrissage et quelques-unes d'entre elles seraient particulièrement problématiques en cas de réchauffement parce qu'érigées sur des sols sensibles au dégel. Un seul village, Salluit, est construit sur un sol sensible et riche en glace. C'est aussi le plus froid du Québec, celui où il faudra le plus grand réchauffement avant que des problèmes sérieux ne se posent (Allard, 1997 - comm. pers.).

La grande majorité des informations existant sur le système routier dans le Grand Nord canadien provient des études faites sur le bassin du Mackenzie (Cohen,1997). Selon les auteurs, le potentiel réduit d'un trafic routier sur la glace serait compensé par une saison de navigation en eau libre pour le transport maritime via des barges pouvant se prolonger de 6 à 9 semaines.

On connaît très peu de choses sur les répercussions d'un changement climatique sur la couverture nivale des régions arctiques. Bien que la majorité des MCG indique que les quantités de précipitations vont augmenter sous un scénario de 2xCO₂, la problématique réside dans l'ampleur des changements qu'un tel scénario aurait sur la distribution et la synchronisation saisonnières des températures et des précipitations et la trajectoire des dépressions

météorologiques des régions septentrionales du Québec. Ye & Mather(1997) démontrent bien la somme de travail de recherche à accomplir avant d'arriver à une compréhension suffisante du couplage température-type et quantité de précipitation-trajectoire des dépressions météorologiques.

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat des INFRASTRUCTURES et du PERGÉLISOL au Québec est FAIBLE* car

On est en mesure de cerner l'importance relative du régime thermique dans le comportement du pergélisol du Nord du Québec. Mais les données disponibles ne nous permettent pas de quantifier ces processus sur une échelle spatiale et temporelle

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur les INFRASTRUCTURES et le PERGÉLISOL est TRÈS FAIBLE car

Une seule étude spécifique au Québec. On doit utiliser et adapter les études faites ailleurs au pays (e.g. bassin du Mackenzie)

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : très bon, bon, moyen, faible et très faible

6.9. Transport

On connaît peu de choses sur les impacts réels et quantitatifs de la variabilité climatique actuelle sur le transport au Canada ou au Québec (Jackson,1995; Andrey & Snow,1997). Les diverses informations concernant les secteurs du transport routier, aérien, ferroviaire et maritime proviennent d'études indirectement liées aux changements climatiques.

6.9.1. La sensibilité au climat du transport au Québec

A) Transport routier

En 1992, la Commission Royale Canadienne sur le transport estimait que 103,1 millions de dollars (1989) y étaient consacrés. Selon Andrey & Snow (1997), l'industrie du transport employait au Canada 439 000 personnes en 1995 soit 4,1 % de tous les emplois au pays et produisait environ 4,3 % du produit intérieur brut (19,2 sur 430,8 millions de dollars).

Les dépenses canadiennes liées aux infrastructures de transport sont plus importantes dans le domaine routier et représentent environ 11 milliards en 1993. La responsabilité de l'entretien de l'infrastructure routière au Québec, qui est constituée d'environ 1 199 000 km de routes, est partagée entre les 3 niveaux gouvernementaux (tableau 6.23).

Tableau 6. 23 - Répartition du nombre de kilomètres de routes au Québec par juridiction gouvernementale

<u>Juridiction</u>	<u>Nombre de km de routes</u>	<u>Proportion du Québec par rapport au Canada</u>
Municipale	900 000	13,7 %
Provinciale	293 000	12,7 %
Fédérale	5 000	3,3 %
<i>TOTAL</i>	<i>1 199 000</i>	<i>13,3 %</i>

Source: Nix, 1995

En 1960, il y avait 1 083 000 véhicules immatriculés au Québec. Ce chiffre a doublé, en 1970, et quadruplé en 1995 (Pépin,1997). Ceci illustre bien le développement important qu'a connu le secteur des transports routiers entre 1960 et 1995. Au 31 décembre 1992, les véhicules de promenade représentaient 74 % de l'ensemble des véhicules en circulation.

En 1994, plus de 84 compagnies de transport urbain et 46 entreprises de transport inter-urbain ont été dénombrées au Canada. Elles retirent plus de 5,1 milliards de dollars de revenus pour près de 25 milliards de km parcourus (Andrey & Snow,1997). Pour sa part, le secteur du camionnage rapporte plus de 12,1 milliards de dollars (1995) de revenus au Canada dont 2,1 milliards au Québec avec 210,9 millions de tonnes de cargaison transportée en 1995 et une distance moyenne par livraison de 522 km.

Les conditions climatiques durant la saison d'hiver nécessite un entretien supplémentaire du système routier afin de maximiser la sécurité des usagers. Le budget de déneigement de Montréal en 1987-88 était de 47 millions de dollars (Environnement Canada, 1988) comparativement, par exemple, à celui de Victoria (Colombie-Britannique) s'élevant à 2 000\$ pour 1986-87. La ville de Montréal enlève plus de neige qu'aucune autre ville dans le monde soit 42 millions de tonnes de neige annuellement (Environnement Canada,1990a). Au niveau de l'entretien en hiver, le gouvernement du Québec déversait 600 000 tonnes de chlorure de sodium (sel) sur les routes et autoroutes du Québec sans compter la contribution de la voirie municipale soit une valeur de 30 millions de dollars (Plamondon,1990). Pour l'ensemble des municipalités, le volume annuel de neige à éliminer est estimé à près de 30 millions de m³ (Gouvernement du Québec,1989 ; Centre Saint-Laurent,1996).

B) Transport aérien

Le transport aérien est également important au Canada avec 726 aéroports certifiés et 17 742 avions enregistrés en 1995 (Nix,1995). Malgré les dernières années difficiles pour ce secteur d'activités (récession, déréglementation, etc.), on dénote 32,7 millions de passagers aériens en 1994 comparativement à 35,9 millions en 1988, pour des revenus de 8,4 milliards de dollars (1994). Les citoyens canadiens effectuent en moyenne 3,5 % de leurs voyage par voie aérienne (Andrey & Snow,1997). Les principaux aéroports québécois sont Dorval et Mirabel, tous deux situés à la périphérie de Montréal. Selon le

Gouvernement du Québec (1995), l'aéroport de Dorval dénombre 86 % des passagers embarqués ou débarqués au Québec pour les vols trans-frontaliers et l'aéroport de Mirabel se situait au premier rang des aéroports québécois pour les vols internationaux, avec 97 % du trafic. La récente décision de transférer les vols internationaux de Mirabel vers Dorval en 1997 risque cependant de modifier de façon draconienne les statistiques pour les années futures.

C) Transport ferroviaire

Le transport par rail au Canada s'est avéré un élément important du développement économique du pays au cours des derniers 150 ans. Selon Andrey & Snow(1997), avec 84 868 km de rails, 29 compagnies ferroviaires ont transporté près de 300 millions de tonnes et voyagé 4 millions de passagers. Le Québec avec ses 4 208 km de chemins de fer, compte pour 11,2 % du total canadien. Depuis 1990, le transport ferroviaire est sur le déclin et est confronté à la concurrence du camionnage. Les deux transporteurs nationaux, soit le CN et le CP Rail, sont propriétaires de 86 % des voies ferrées présentes au Québec (Gouvernement du Québec,1995).

La littérature liant les conditions climatiques à la planification aux opérations ferroviaires au Québec est quasi-inexistante. Andrey & Snow (1997) réfèrent à des procédures opérationnelles utilisées au Canadien National pour faire face aux aléas de la météorologie:

- la vérification continue des rails;
- l'utilisation de charrues situées à l'avant des locomotives;
- la surveillance continue des roues de wagons (e.g. 9 000 paires de roues changées en février 1997);
- les ralentissements dans la vitesse des convois lorsque la température de l'air descend sous les -20°C;
- les actions à prendre lors de tempêtes de neige intenses;
- l'importance des vents latéraux forts sur les trains de large dimension (e.g. containers) ;
- la formation liée à la manipulation des équipements sous des conditions hivernales extrêmes.

D) Transport maritime

Le fleuve Saint-Laurent est une des voies de navigation les plus importantes du monde. Le transport maritime représente 5,6 % du produit intérieur brut du Québec (Lapel Groupe conseil, 1989). La navigation commerciale sur le Saint-Laurent a constitué depuis le début de la colonie un aspect primordial pour le développement du Québec et du Canada. Plus de 10 000 navires fréquentent le Saint-Laurent annuellement (Gouvernement du Québec, 1989) et chacun des ports importants peut accueillir des navires de différents tonnages.

La construction de la Voie Maritime, inaugurée en 1959, a fait en sorte que le volume de marchandises transportées varie autour de 100 millions de tonnes annuellement (tableau 6.24) avec un total en 1995 de 109,6 millions de tonnes, soit près de 31 % du total canadien (Andrey & Snow, 1997). En 1992, 3 838 navires ont sillonné la voie maritime du Saint-Laurent, transportant 42 millions de tonnes de cargaison et produisant 66 millions de dollars de revenus de péage (Administration de la Voie Maritime, 1992). Ces valeurs ne sont dépassées, en termes de tonnes de cargaison, que par le Mississippi (Morissette & al. (1985) cité dans Robichaud, 1997).

Tableau 6.24 - Volume de marchandises transitées dans le secteur du Saint-Laurent

	<u>1988</u>	<u>1989</u>	<u>1990</u>	<u>1991</u>	<u>1992</u>	<u>1993</u>	<u>1994</u>	<u>1995</u>
<i>Cargaison totale traversant le secteur Saint-Laurent (en millions de tonnes)</i>	<i>110,1</i>	<i>104,4</i>	<i>105,3</i>	<i>103,5</i>	<i>97,1</i>	<i>89,8</i>	<i>102,0</i>	<i>109,6</i>
- domestique	33,8	29,6	33,7	33,3	30,5	24,4	28,8	28,9
- internationale	76,3	74,8	71,6	70,2	66,6	65,4	73,2	80,7

En 1994, les principales marchandises transportées furent respectivement le minerai de fer avec 38,0% et le blé avec 9,9%.

(Source: Andrey & Snow, 1997)

La profondeur de la voie navigable est de 12,5 m en aval de Québec, de 11,3 m entre Québec et Saint-Lambert. En amont de Saint-Lambert la

profondeur est de 8,2 m. La largeur du chenal passe de 245 m à Montréal à 305 m en aval de Québec. En amont de Québec, les variations saisonnières des niveaux d'eau et certaines fenêtres des marées permettent à des navires ayant un fort tirant d'eau d'emprunter le chenal pour se rendre à Montréal (Environnement Canada,1997b). Le passage d'un seul navire entraîne des variations dans les niveau d'eau équivalentes à 70 % de celles des crues printanières. Toutes les îles du Saint-Laurent situées à moins de 600 m de la voie navigable sont aux prises avec des problèmes plus ou moins sévères d'érosion des rives devenant plus importants en novembre et décembre. Cette période correspond au moment entre le dépérissement des plantes et l'englacement de la rive (Environnement Canada,1997b).

Grâce à sa situation géographique et à des services de transport rapides et efficaces et assurés à des coûts compétitifs, le port de Montréal a du succès dans le marché des conteneurs étant le seul port au Québec, le plus important au Canada et devançant même le port de New-York sur le marché de l'Atlantique Nord (Consultants Jacques Bérubé, 1997). SODES (1991) et Verreault (1996) ont estimé que les retombées économiques du port de Montréal sur la grande région métropolitaine de Montréal atteignaient 1,2 milliard de dollars en plus de créer 14 000 emplois directs et indirects. Au total, c'est 19,9 millions de tonnes de marchandises qui ont transité par le port de Montréal en 1996 soit une hausse de 3,7 % sur l'année précédente (Les Affaires,1997). La société portuaire a réalisé un bénéfice net de 11,8 M\$, soit 2,5 M\$ de plus que l'année précédente.

La variation des niveaux d'eau est le principal facteur qui affecte le transport maritime sur le Saint-Laurent. Depuis le début des années 70, les niveaux d'eau ont conservé une moyenne de 1,27 m au-dessus du zéro des cartes au port de Montréal ce qui a été profitable pour l'industrie maritime. Entre 1986 et 1989, le niveau moyen a baissé d'environ 1,0 m (Canada Maritime,1990). À la suite de cette baisse du niveau des eaux, des intervenants ont tenté d'en mesurer les impacts économiques.

Ainsi, la compagnie Canada maritime a évalué que chaque baisse de 0,30 m entraîne la perte de 114 TEU (unité d'équivalence vingt pieds) dans ses navires. Selon l'Association des pilotes du Saint-Laurent cette valeur serait équivalente à 2 000 tonnes de capacité de chargement par bateau dans le port de Montréal (Scott & al.,1989). Plus particulièrement, le cas du mois de mars 1990 au port de Montréal, les variations quotidiennes du niveau d'eau ont entraîné une réduction du chargement de 1 800 TEU (unité d'équivalence vingt pieds) soit l'équivalent d'un navire complet ou de 3,6 M\$ (Canada maritime,1990).

Lasserre (1980) mentionne que, suite aux années de hauts niveaux d'eau sur le Haut Saint-Laurent (1972-1976), le chiffre record de 57 millions de tonnes de cargaison a été enregistré en 1977. D'autre part, la période de bas niveaux d'eau entre 1983 et 1990 a coïncidé avec une diminution de 27 % du nombre de navires ayant transité par la Voie Maritime (Administration de la Voie Maritime du Saint-Laurent, 1992). Il est à souligner que les auteurs n'indiquent pas l'importance de la récession économique de cette période sur le nombre de transits dans le chenal maritime.

Peu d'études sont connues au Québec faisant l'inventaire de tous les incidents liés directement ou indirectement au transport maritime bien que plusieurs d'entre eux sont spécifiquement cités, de temps en temps, dans la littérature :

- Les annales météorologiques notent également des incidents maritimes causés par la présence de vents de force ouragan (supérieur à 64 noeuds) dans le golfe du Saint-Laurent: le 8 septembre 1869 avec 2 vaisseaux coulés et une circulation maritime passablement perturbée (Environnement Canada, 1991).
- Le 29 mai 1914, l'Empress of Ireland, paquebot du CP, est entré en collision sur le fleuve Saint-Laurent avec un charbonnier norvégien, à 300 km à l'est de Québec. Le paquebot a coulé en 25 minutes et 1 024 passagers ont péri. La cause du désastre semble avoir été la présence d'un épais brouillard sur le fleuve et l'estuaire (Environnement Canada, 1996).
- Le 20 juillet 1962, le brouillard est la cause d'une collision violente à 90 km en aval de Québec. Un minéralier anglais de 13 000 tonnes frappe un navire de 6 000 tonnes. 49 pertes de vie (Environnement Canada, 1987a)
- 16 et 17 avril 1985, des vents de 113 km/h sur la basse Côte-Nord endommagent des bâtiments et avions légers. Un bateau de pêche chavire à Havre-Saint-Pierre et 5 pêcheurs y trouvent la mort (Environnement Canada, 1991).
- Le 4 septembre 1988, un violent orage avec des vents de 90 km/h surprend plus de 300 bateaux de pêche et 20 embarcations sont en détresse. Un bateau fait naufrage, un autre chavire, 5 chalutiers coulent et 3 pêcheurs périssent (Environnement Canada, 1989).

Dans sa contribution au deuxième rapport d'évaluation du Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC 1995), Moreno & al. (1996) résumant bien ce que l'on connaît sur la sensibilité du trans-

port à la variabilité climatique (tableau 6.25). Les auteurs soulignent les interactions étroites entre les activités de transport et l'aménagement du territoire et mirent également l'emphase sur l'importance de considérer le transport dans une problématique plus large du développement économique et social d'une région donnée.

Tableau 6.25 - Sensibilité du secteur transport à la variabilité climatique

	<u>Transport de l'énergie</u>	<u>Infrastructures liées au transport</u>	<u>Opérations liées au transport</u>
Température	Pipelines construits sur le pergélisol	Vulnérabilité si le pergélisol passe de continu à discontinu; effets du gel/dégel sur l'état des routes	Entretien des routes; air climatisé dans les autos; difficultés de manoeuvre pour la navigation dans les régions situées dans les latitudes élevées et infectées de glace
Précipitation		Répercussions de la neige et de la glace sur les routes et les aéroports	
Vents			
Événements extrêmes		Effets sur les routes, les voies ferrées et les ponts	La sécurité et la stabilité des opérations sont mises en cause (e.g. aéroports)
Hausse du niveau de la mer		Répercussions sur les infrastructures côtières; déplacement des populations vivant le long des côtes	
Autres		Changements dans les mouvements des produits agricoles; développement régional	Navigation intérieure; impacts du brouillard, de la neige, de la pluie et des glaces sur les opérations et la sécurité

(Source: Moreno & al., 1996)

6.9.2. Le transport au Québec sous un environnement 2xCO₂

Dans une analyse préliminaire des répercussions d'un changement climatique sur le transport au Canada, IBI Group(1990) conclut que, globalement, les répercussions à long terme seront bénéfiques pour le secteur. Également, Jackson (1992) avoue la forte influence des conditions climatiques actuelles sur les coûts du transport mais croit également qu'un changement climatique ne fera que profiter au secteur. Au Québec, l'analyse des répercussions d'un changement climatique sur le secteur des transports en général est un lacune importante. Les informations de la présente section se rapporte surtout aux problèmes liés aux conditions de stress extrêmes en période hivernale.

A) Transport routier

La période hivernale constitue pour le système routier au Québec une préoccupation d'entretien et de sécurité de la part des gestionnaires. Nix & al.(1992) ont tenté d'estimer l'influence du gel et du dégel sur la réponse des caractéristiques (ciment, asphalte, etc..) des routes. Ils conclurent que, sur des routes à fort achalandage, les facteurs environnementaux comptaient pour 50 % de la détérioration du pavé alors que, sur des routes à faible achalandage, ce taux augmente à 80 %. On encourage donc le développement de modèles de simulation de la détérioration des routes pour estimer les répercussions futures de conditions climatiques différentes pouvant influencer la réponse des caractéristiques des routes face au gel et au dégel. En contrepartie, un nombre très limité d'études mentionne la détérioration des routes associée à des vagues de chaleur prolongées (Miller,1988; Andrey et Snow, 1997).

Utilisant des données de la région métropolitaine de Toronto, McCabe (1995) trouva, en utilisant les résultats des MCG, que l'utilisation des déssalants en hiver diminuerait de 17 à 71 % tandis que McCoy (1993) déduisit que, pour les régions ontariennes de la baie Georgienne, un réchauffement de 3,5 °C équivaldrait à une réduction de déssalants variant entre 35 et 55 %. À notre connaissance, des études équivalentes pour le Québec n'ont pas encore été faites.

Sur le plan de la recherche universitaire, un projet indirectement lié aux impacts du changement climatique touche une des causes du réchauffement climatique anticipé. Ce projet d'étude innovateur tente de situer la gestion locale des gaz à effet de serre dans une perspective de développement durable. Dans le cadre de l'élaboration de stratégies de gestion des gaz à effet, le Groupe de recherche interdisciplinaire en gestion de l'environnement (GREIGE) vise à développer une approche intégrée pour l'évaluation de la rentabilité économique et de la performance environnementale des technologies de l'énergie, appliquées au transport urbain. L'analyse des données techniques et économiques et l'évalu-

ation des options technologiques pour la réduction des émissions se font avec un modèle dynamique permettant de représenter le système énergétique, la technologie, l'économie et l'environnement du Québec. Le Groupe a abordé l'évolution de deux types de valeurs sociales, soit la rationalité des comportements et l'équité dans la répartition des coûts et des avantages sur les plans social, environnemental, économique et politique. L'analyse des coûts réels constitue finalement un outil d'aide à la décision pour l'élaboration de politiques publiques, dans le contexte de restructuration budgétaire qui oblige à restreindre leurs interventions.

B) Transport ferroviaire

Il n'existe à peu près pas d'études au Canada portant spécifiquement sur les impacts d'un changement climatique sur les opérations de chemins de fer. Pourtant, comme mentionné plus haut, les conditions climatiques ont une influence sur les défauts affectant les rails (basses températures, gel, dégel), les coûts de déneigement et la nécessité de réduire le nombre de wagons utilisés ou la vitesse des trains (Andrey & Snow,1997).

C) Transport maritime

À l'intérieur d'un scénario de $2xCO_2$, les modèles MCG prévoient des réductions des débits d'eau de 3 100 m³/s en provenance des Grands Lacs. Ces baisses auront des impacts certains sur la navigation commerciale (Slivitzky,1993). Le réchauffement prolongera la saison de navigation commerciale en réduisant la période avec couvert de glace en hiver (Slivitzky,1997; Bertrand & Doré, 1994).

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat du TRANSPORT au Québec est MOYEN* car

un bon nombre d'études techniques liant un type de transport et les conditions climatiques existent. On n'a cependant aucune vue d'ensemble de l'importance du climat sur le transport au Québec

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur le TRANSPORT au Québec est FAIBLE car

seul le domaine du transport maritime sur le Saint-Laurent a été considéré sous un scénario 2xCO₂

6.10. Tourisme et loisirs

Le secteur du tourisme représente 2,1 % du PIB du Québec, soit un marché de 3,3 milliards de dollars, en 1992. Ce sont, au total, plus de 250 000 salariés qui travaillent dans les principaux secteurs reliés au tourisme au Québec en 1992, soit approximativement un travailleur sur douze (Gouvernement du Québec, 1995). Dans le secteur des loisirs, les activités de plein air ont un taux de pratique élevé : 78 % des Québécois pratiquent la marche, 45 % la baignade, 42 % le vélo, 28 % le camping; 27 % le patinage, 17 % le ski alpin et le ski de randonnée et 16 % le golf (Gouvernement du Québec, 1995).

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : *très bon, bon, moyen, faible et très faible*

6.10.1. La sensibilité des loisirs et du tourisme au climat

Au Québec, seules les études de Lamothe & Périard (1987,1988) traitent de l'aspect sensibilité à la variabilité climatique pour l'industrie du ski alpin et du golf. Bergeron (1995) souligne la relation entre les bas niveaux d'eau sur le fleuve et le nombre d'incident nautiques sur le tronçon fluvial.

Peu d'informations récentes existent sur l'importance du tourisme maritime au Québec et l'influence du climat sur cette industrie. Le marché des croisières internationales enregistre, depuis une quinzaine d'années, une croissance annuelle d'environ 10 % (tableau 6.26) avec des retombées économiques directes et indirectes dépassant les 10 millions de dollars, pour Montréal, et supérieures à 5 millions de dollars pour la ville de Québec (Gouvernement du Québec, 1989).

Tableau 6.26 - Statistiques sur l'industrie des croisières et excursions pour Montréal et Québec

	Montréal		Québec	
	Nombre de navires	Nombre de passagers	Nombre de navires	Nombre de passagers
1980			12	7 500
1981			30	15 500
1982	35	24 658	33	14 500
1983	21	21 651	21	14 500
1984	22	24 309	25	16 000
1985	21	20 428	21	12 000
1986	28	24 509	37	14 500
1987	47	36 555	77	31 500

Tiré de Gouvernement du Québec (1989)

Un autre secteur du tourisme qui affiche une croissance est le ski alpin. Les Canadiens dépensent plus d'argent sur la pratique des sports d'hiver que sur l'enlèvement de la neige. En 1987, le nombre de familles canadiennes ayant à la maison des skis alpins, des skis de fond et une motoneige étaient respectivement de 1,8 million, 2,6 millions et 645 000 respectivement (Environnement Canada,1990b). Au Canada, en 1985, on comptait 206 stations de ski récoltant des revenus de 158 millions de dollars (Environnement Canada, 1990b).

Lamothe & Périard (1987) ont mis en relation les conditions climatiques hivernales, la faisabilité du ski alpin et les retombées socio-économiques de cette activité récréative pour les trois principales régions skiabiles au Québec (Sainte-Agathe, Sherbrooke et Québec).

L'ouverture de la saison des centres de ski est fonction d'une épaisseur minimale de neige au sol. La saison de ski débute habituellement dans la première semaine de décembre si l'épaisseur minimale de neige au sol est de 10 cm et continue (épaisseur minimale pour fabriquer une neige artificielle). Exceptionnellement en 1986, la saison a débuté tôt, le 21 novembre dans les régions de Québec, des Cantons de l'Est et de la Gaspésie avec une quantité de neige de 31, 52 et 70 cm (Environnement Canada, 1987a). Les stations sans canon débutent la saison vers la fin décembre lorsque l'épaisseur de neige au sol atteint 30 cm. La saison se termine à la fin de mars à Sherbrooke mais se prolonge jusqu'à la mi-avril à Sainte-Agathe-des-Monts et à Québec. En considérant une épaisseur minimale de neige de 30 cm plutôt que de 10 cm, la durée de la saison de ski à Sherbrooke chute de 111 à 78 jours. La diminution de la saison est beaucoup moins marquée à Québec et à Sainte-Agathe-des-Monts avec une réduction de 11 et 27 jours respectivement (tableau 6.27).

Les centres de ski équipés de canons à neige allongent leur saison d'environ 36 % à Sherbrooke, de 24 % à Sainte-Agathe-des-Monts et de 5 % à Québec. Les centres de ski de l'Estrie sont ceux qui peuvent bénéficier le plus de l'utilisation d'équipements permettant de fabriquer de la neige artificielle. Plus de 10% du budget d'opération d'une station de ski est consacré en moyenne à la fabrication de la neige artificielle (Environnement Canada, 1990b). Cependant, l'utilisation de canons à neige n'apporte qu'une faible augmentation de la durée de la saison de ski (Lamothe & Périard, 1987).

Un sondage réalisé auprès des centres de ski québécois révèle que les éléments climatiques qui jouent un rôle important dans la pratique du ski alpin sont l'épaisseur de neige au sol, la température de l'air, le vent, la pluie, les tempêtes de neige et l'ensoleillement.

Tableau 6.27 - Caractéristiques de la saison de ski et du nombre de jours skiabiles du 1er novembre au 30 avril

	<u>Sainte-Agathe-des-Monts</u>	<u>Sherbrooke</u>	<u>Québec</u>
A) <u>Couverture nivale minimale de 10 cm</u> :			
• début	1 ^{er} décembre	5 décembre	3 décembre
• fin	16 avril	23 mars	18 avril
• durée	137	111	137
• nombre de jours skiabiles	109	86	105
B) <u>Couverture nivale minimale de 30 cm</u> :			
• début	24 décembre	27 décembre	12 décembre
• fin	7 avril	16 mars	13 avril
• durée	110	78	126
• nombre de jours skiabiles	84	54	84
C) <u>Faisabilité de neige artificielle (couvert nival de 10 cm):</u>			
• début	25 novembre	2 décembre	30 novembre
• fin	16 avril	23 mars	18 avril
• durée	143	112	138
• nombre de jours skiabiles	121	97	109
D) <u>Faisabilité de neige artificielle(couvert nival de 30 cm) :</u>			
• début	25 novembre	2 décembre	30 novembre
• fin	7 avril	16 mars	13 avril
• durée	136	106	132
• nombre de jours skiabiles	111	87	100

Adapté de Lamothe & Périard (1987)

La grande variabilité inter-annuelle des éléments climatiques tels que la quantité de neige au sol, la température moyenne et les précipitations, caractérisent les deux années 1979-80 et 1982-83 comme anormales. La durée de la couverture de neige au sol suffisante pour la pratique du ski a été plus courte que la normale (Lamothe & Périard, 1987). Dans les Laurentides, pour ces deux années, les saisons ont débuté vers la fin janvier et se sont terminées à la fin mars. À Québec, en 1982-83, la durée d'enneigement fut écourtée de moitié pour commencer en début de février et se terminer au début d'avril.

Les auteurs démontrent que les températures moyennes mensuelles hivernales, pour ces 2 saisons spécifiques, ont été nettement supérieures aux normales. Ainsi, en 1979-80, les stations de Sainte-Agathe-des-Monts et Sherbrooke ont eu des hausses de température de 2 °C tandis qu'à Québec, la hausse variait entre 0,8 et 1,4 °C. De plus, en 1982-83, c'est en décembre que la hausse a été la plus forte, notamment à Sherbrooke avec 4,1 °C. Lors de ces deux années, les quantités de pluie ont été particulièrement abondantes. Les mesures de la station de Sainte-Agathe rapportaient des quantités de pluies de l'ordre de 40 % et 87 % supérieures à la moyenne et des chutes de neige réduites de moitié. L'examen des quantités moyennes de pluie et de neige démontre qu'entre 1975 et 1985, les quantités de pluie ont été 119 % supérieures à la normale 1951-1980 et les quantités moyenne de neige inférieures de 90 %.

Le tableau 6.28 met en évidence les années 1979-80 et 1982-83, désastreuses pour la pratique du ski des trois centres. En 1982-83 avec une saison de 30 cm limitée à janvier et février, on estime que la fréquentation réduite n'a amené que des retombées estimées à 126 millions de dollars. En comparaison, la saison 1983-84, marquée par des conditions climatiques favorables, aurait rapporté des retombées de 240 M\$ (\$1981) soit le double de l'année précédente.

Tableau 6.28 - Quantités hivernales de pluie et de neige à Sainte-Agathe-des-Monts, Sherbrooke et Québec entre 1975 et 1985

	Sainte-Agathe-des-Monts				Sherbrooke				Québec			
	pluie (mm)	% de la normale	neige (cm)	% de la normale	pluie (mm)	% de la normale	neige (cm)	% de la normale	pluie (mm)	% de la normale	neige (cm)	% de normale
1975-76	314,8	148	437,1	114	252,2	128	340,8	111	333,6	166	390,7	116
1976-77	127,5	60	457,9	119	141,2	72	283,6	92	89,6	45	344,3	102
1977-78	228,8	108	395,8	103	205,8	105	325,8	106	214,4	107	319,0	94
1978-79	265,1	126	407,8	106	198,0	101	284,5	93	255,4	127	324,8	96
1979-80	297,4	141	239,5	62	214,2	109	120,7	39	292,8	146	197,7	58
1980-81	327,0	155	305,7	80	236,9	120	207,5	68	293,6	146	265,6	79
1981-82	145,4	69	307,1	80	193,6	98	367,5	120	156,0	78	288,1	85
1982-83	394,8	187	220,2	57	311,3	158	230,7	75	470,5	234	249,1	74
1983-84	221,0	105	337,6	88	400,2	203	278,8	91	239,7	119	365,9	108
1984-85	203,0	96	349,9	91	200,5	102	298,6	97	223,8	111	285,7	85
Moyenne 1975-85	252,5	119	345,9	90	235,4	120	273,9	89	257,0	128	303,1	90
Normale 1951-80	212,2		384,1		196,9		307,1		201,1		338,1	
Les totaux sont compilés de novembre à avril												

Adapté de Lamothe & Périard (1987)

Tout sport confondu, le golf est un sport très populaire au Québec. L'aspect climatique qui fixe le début de la saison de golf est la disparition de la neige au sol tandis qu'à l'automne, ce sont les températures fraîches qui découragent les golfeurs (Lamothe & Périard,1988). Le début et la fin de la saison de golf sont fortement influencés par les conditions climatiques. La saison de golf débute généralement à la fin de mars à Montréal et au cours du mois d'avril à Québec et Sherbrooke. La durée actuelle (tableau 6.29) pour les régions de Québec, Sherbrooke et Montréal se situe respectivement à 171, 187 et 206 jours.

Tableau 6.29 - Dates médianes de début, fin et durée de la saison de golf (1976-1985)

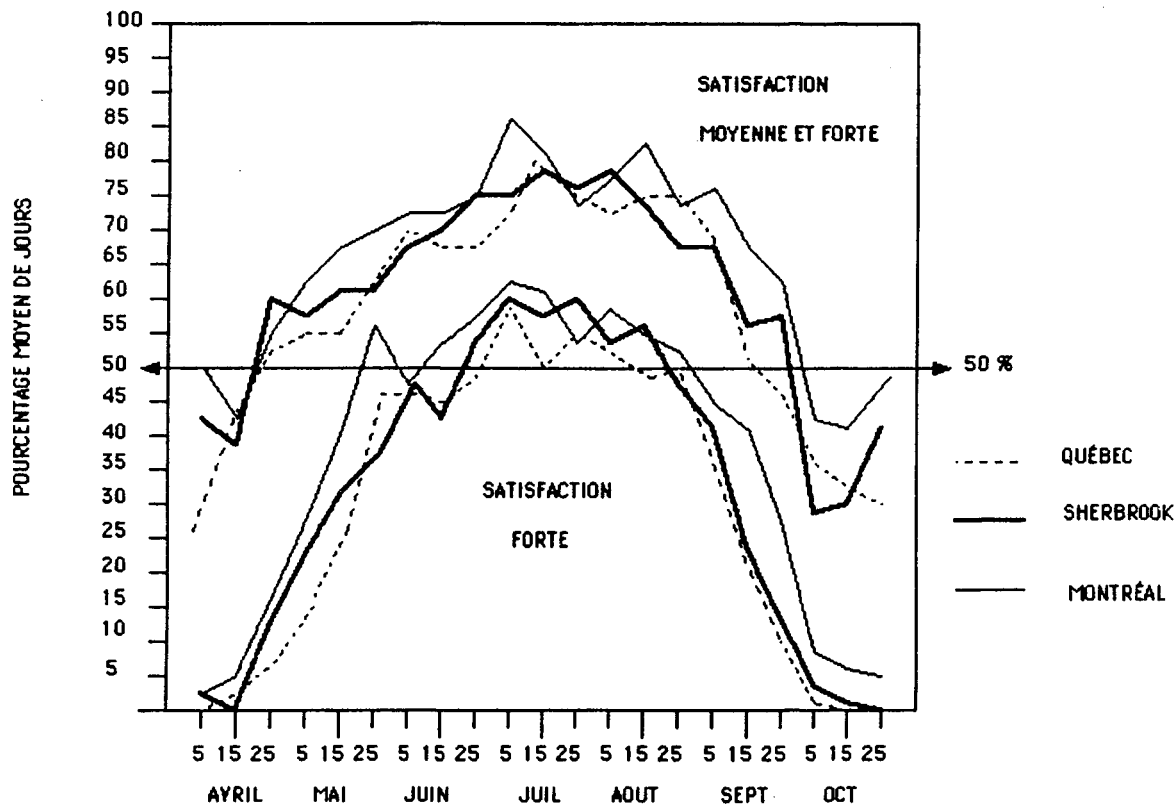
	<u>Début* médian</u>	<u>Fin** médiane</u>	<u>Durée médiane (jrs)</u>
Québec	24 avril	9 octobre	171
Sherbrooke	10 avril	13 octobre	187
Montréal-Dorval	25 mars	17 octobre	206

* : premier jour de disparition de la neige au sol
 ** : dernier jour avec une température moyenne diurne supérieure à 10 °C

Source : Lamothe & Périard(1988)

En pleine saison, les variables climatiques qui influencent l'achalandage et la satisfaction des golfeurs sont la température, l'ensoleillement et la pluie. Le nombre moyen de jours favorables au golf est de 47, 50 et 61 à Québec, Sherbrooke et Montréal respectivement. Le pourcentage de jours très satisfaisants est maximal en juillet et au début d'août pour Québec. À Montréal, la satisfaction est maximale un jour sur deux de la fin juin jusqu'au début août, tandis qu'à Sherbrooke, cette période est concentrée à la fin de juillet (figure 6.18).

Figure 6.18 - Variation par décade du pourcentage de jours très satisfaisants et de satisfaction moyenne à forte pour la pratique du golf au Québec (1976-1985)



Source : Lamothe et Périard (1988)

En considérant les degrés de satisfaction moyenne à forte, près de 75% des jours en juillet et août sont concernés. Ainsi, les golfeurs peuvent s'adonner à ce loisir en escomptant une satisfaction moyenne à forte trois jours sur quatre.

La navigation de plaisance est une industrie florissante au Québec. La pratique des activités liées au nautisme se concentre principalement à l'intérieur du tronçon fluvial. La variation des niveaux des eaux, la force des courants, la morphologie et les hauts fonds sur le fleuve Saint-Laurent, ainsi que la nature des activités nautiques visées influencent le choix des plaisanciers lors de l'achat d'une embarcation. Le recensement des types d'embarcations de plaisance par secteur fluvial, démontre que les embarcations conventionnelles ouvertes et fermées (embarcations non motorisées et motorisées incluant celles avec et sans cabine) ont la popularité des plaisanciers (tableau 6.30).

Tableau 6.30 - Recensement de petits bâtiments de navigation de plaisance en 1988

<u>Catégories</u>	<u>Cornwall</u>	<u>Grondines</u> <u>Pocatière</u>	<u>Pocatière</u> <u>vers l'est</u>	<u>Total</u>
Dériveur	3 586	510	662	4 758
Quillard	2 262	695	162	3 119
Multicoque	421	57	172	490
Conventionnelle (ouvert)	17 082	1 318	4 723	3 123
Conventionnelle (fermé)	8 084	585	595	9 264
Autres	1 303	12	25	1 340
Total	3 2738 (78%)	3 177 (7%)	6 179 (15%)	42 094

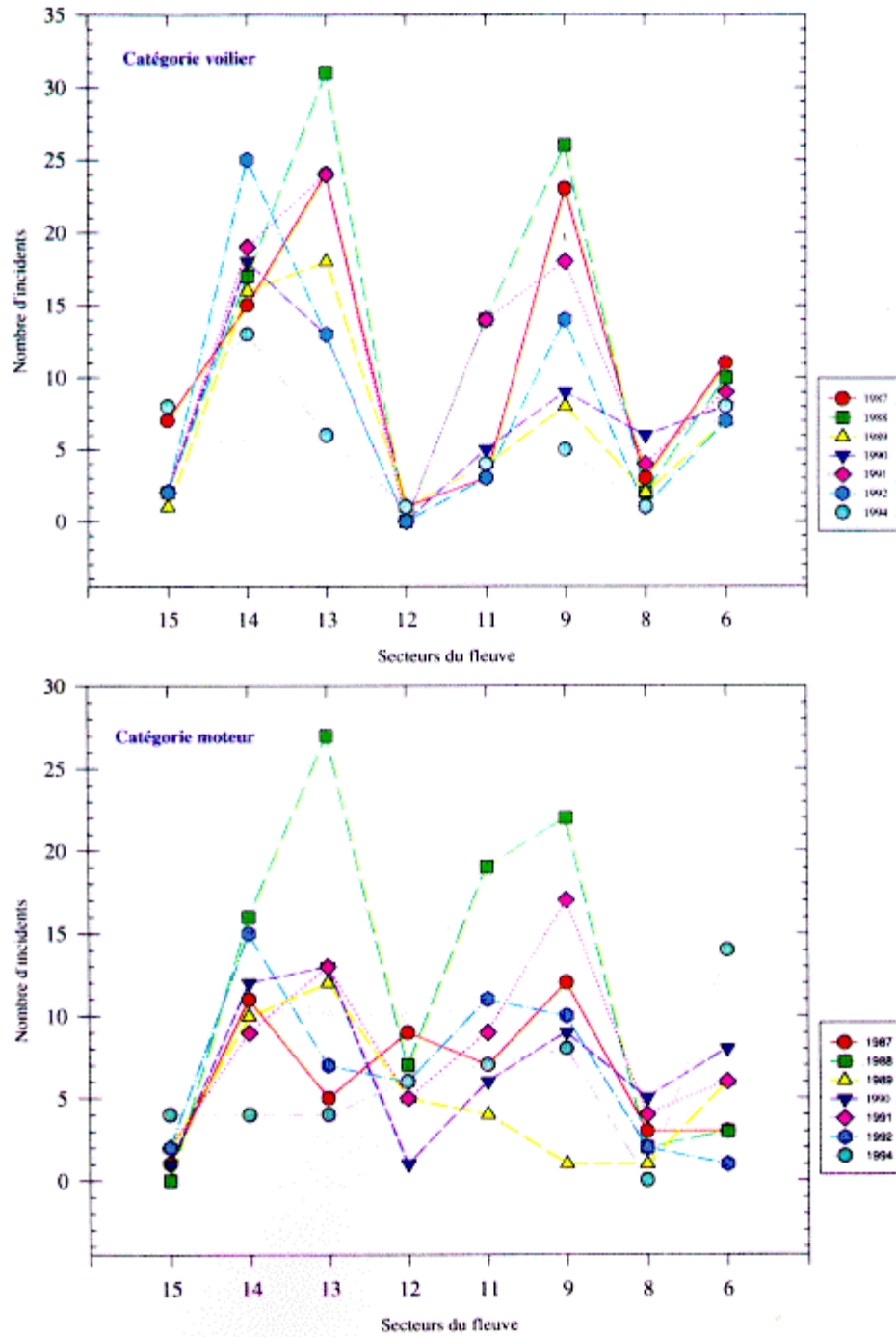
Source: Environnement Canada (1997a)

Les niveaux trop hauts ou trop bas peuvent empêcher certaines catégories d'embarcations de se rendre aux ports de plaisance, causant ainsi des pertes de revenus aux marinas et un mécontentement auprès des plaisanciers (Bergeron,1995). Des hauts niveaux peuvent inonder les quais (CMI,1993; Frenette & al.,1989) et les rampes de lancement peuvent être mises à sec lors de périodes de bas niveau d'eau (Centre Saint-Laurent,1994).

Les périodes de faibles niveaux d'eau demandent, de la part des plaisanciers, une bonne connaissance des cartes nautiques et du balisage sur le fleuve afin d'éviter tout risque d'échouement. À cet effet les statistiques de recherche et de sauvetage sur la navigation de plaisance démontrent l'impact des variations des niveaux des eau sur le nombre d'incidents. Les lacs des Deux-Montagnes et Saint-Louis ainsi que le tronçon fluvial entre Montréal et Sorel demeurent les plus achalandés. Les statistiques de ces plans d'eau affichent un nombre d'incidents, durant la saison estivale, des plus élevées. Tout particulièrement, à l'été 1988 et 1989, le niveau des eaux a été remarquablement bas et la Garde côtière canadienne rapporte, pour le secteur de Sorel et du lac Saint-Louis, que le nombre d'échouements (figure 6.19) a augmenté de 41 % soit 160 % d'augmentation en deux ans pour les catégories voilier et bateau moteur (Bergeron,1995).

Il est difficile de quantifier les impacts économiques des bas niveaux d'eau en période d'étiage sur la navigation de plaisance, car les coûts de réparation pour l'ensemble des incidents ne sont pas répertoriés.

Figure 6.19 - Nombre d'incidents nautiques de plaisance par catégories sur le Saint-Laurent (1987-1994)



Source : Bergeron (1995)

6.10.2. Les loisirs et le tourisme au Québec sous un climat 2xCO₂

Les nouvelles caractéristiques climatiques issues des modèles de circulation générale dans un scénario de doublement de CO₂ atmosphérique ont été appliquées au secteur du tourisme par Lamothe & Périard (1988,1989) afin de connaître les répercussions économiques sur les industries du golf et du ski alpin. La période d'analyse porte sur la période entre 1975 et 1985 et les régions de Québec, Sherbrooke et Montréal.

L'augmentation des températures prévues par les modèles sera bénéfique pour le golf. De toute évidence, de telles conditions climatiques prolongeraient la saison de golf de 3 à 4 semaines (hausse de 20 à 30 %). La saison débiterait plus tôt au printemps et se terminerait plus tard à l'automne. De plus, le nombre de jours favorables au golf pourrait même augmenter de 50 % dans les régions de Québec et de Sherbrooke. Considérant que cette industrie rapporte annuellement des revenus bruts de 245 millions de dollars (1987\$) au Québec, les retombées positives sur l'économie québécoise seraient substantielles.

Par ailleurs, les conditions hivernales recherchées pour la pratique du ski alpin en seraient affectées. La pratique du ski alpin est fortement influencée par la quantité de neige au sol. Ainsi, dans un scénario de 2xCO₂, la tendance au réchauffement qui en résulterait ferait diminuer le nombre de jours skiables de 50 à 90 % selon la région et la couverture nivale minimale requise (10 ou 30 cm) pour être en mesure de skier adéquatement. La faisabilité de neige artificielle permettrait de limiter ces pertes à 50 % (tableau 6.31). Les centres de ski de l'Estrie et des Laurentides, situés à des altitudes similaires à celles de Sherbrooke et Sainte-Agathe-des-Monts, ne pourraient pas être en opération durant la période de Noël sans l'emploi de canons à neige artificielle.

Les années entre 1975 et 1985 ont connu des températures moyennes mensuelles plus élevées que les normales 1951-80, des totaux moyens mensuels de pluie plus élevés et des totaux moyens mensuels de neige moins élevés. Si les modifications avaient été appliquées sur la période 1951-80 (période pour laquelle ces modifications ont été estimées) les résultats de la praticabilité du ski alpin auraient été moins pessimistes. D'ailleurs, l'essai, à la station de Québec, d'un scénario hypothétique apportant un réchauffement thermique journalier de 2°C sans modification des précipitations, a permis de constater que la durée des saisons d'enneigement de 10 et 30 cm variait peu.

Tableau 6.31 - Nombre moyen annuel de jours skiabiles actuels et selon le scénario B (modèle GFDL) par seuil d'enneigement aux stations synoptiques

	Enneigement minimal de 10 cm			Enneigement minimal de 30 cm		
	Actuel	Scénario GFDL	Réduction (en %)	Actuel	Scénario GFDL	Réduction (en %)
Sainte-Agathe des Monts	109	36	67	84	11	87
Sherbrooke	86	27	69	54	7	87
Québec	105	51	51	84	25	70
	Enneigement minimal de 10 cm avec faisabilité de neige artificielle			Enneigement minimal de 30 cm avec faisabilité de neige artificielle		
	Actuel	Scénario GFDL	Réduction (en %)	Actuel	Scénario GFDL	Réduction (en %)
Sainte-Agathe-des-Monts	121	60	50	111	58	48
Sherbrooke	97	51	47	87	49	44
Québec	109	63	42	100	58	42

Source: Lamothe & Périard (1987)

Cependant, malgré la réduction anticipée de la saison d'après les scénarios de changement climatique, l'achalandage des centres de ski au Québec serait également influencée par la disponibilité et la faisabilité de conditions nivales suffisantes existant dans les régions limitrophes au Québec (Ontario, les centres américains situés dans les Appalaches, etc.). Ainsi, avec des répercussions qui peuvent sembler négatives pour l'industrie du ski alpin, un investissement continu dans les systèmes perfectionnés de neige artificielle, une capacité rehaussée des remontées mécaniques, un entretien optimal des pentes de ski et l'afflux additionnel de skieurs extérieurs au Québec en quête de conditions nivales pointent plus vers une augmentation des revenus à moyen terme de propriétaires de ski alpin. Aucune étude n'a touché spécifiquement à cet aspect au Québec.

Le réchauffement du climat aurait à première vue des impacts bénéfiques sur les activités de plaisance le long du Saint-Laurent, prolongeant la saison estivale et réduisant les probabilités de précipitations pendant cette période de l'année (Lapel Groupe-conseil,1989). Si le Saint-Laurent connaît une hausse des températures comparables à celle prédite à l'échelle globale, les périodes propices à plusieurs activités (baignade, planche à voile, voile, pêche, pêche blanche, observation, etc.) pourraient être positivement modifiées (Bertrand & Doré,1994).

En résumé, nous pouvons conclure que :

Notre connaissance actuelle de la sensibilité au climat des LOISIRS ET TOURISME au Québec est FAIBLE* car

seuls le ski alpin, le golf et indirectement la navigation de plaisance ont été examinés

Le niveau de connaissances des répercussions d'un changement climatique sur les LOISIRS ET TOURISME au Québec est FAIBLE car

rien à part deux études sur le ski et le golf

* Cette classification est arbitraire et tente de résumer globalement l'ampleur et le niveau de connaissances sur le sujet selon 5 catégories : *très bon, bon, moyen, faible et très faible*

6.11. Autres enjeux

Plusieurs aspects n'ont pas été touchés dans le cadre de la présente étude mais qui ont un lien direct avec la variabilité et le changement du climat. On peut citer, entre autres, l'importance du climat dans le dossier de l'étalement urbain et ses répercussions directes sur la qualité de l'air. Toute la question de la compétitivité inter-sectorielle n'est certainement pas à négliger également.

Sous un scénario de changement climatique, Green (1993) estime que l'économie du Québec devrait s'en tirer bien avec une baisse minimale de 1,3 % de sa production totale (tableau 6.32). Le problème du réchauffement est un problème qui doit être abordé dans une perspective à long terme et n'est tangible que si les coûts estimés sous des conditions de $2xCO_2$ ne dépassent pas ces concentrations hypothétiques de $2xCO_2$. Cependant, accepter une forme d'adaptation à court terme pour contourner le réchauffement anticipé, sans entreprendre d'actions pour réduire au minimum notre dépendance énergétique vis-à-vis les carburants fossiles, est selon Green (1993), la menace réelle induite par l'accumulation des gaz à effet de serre et pousse par le fait même la société vers un péril certain.

Green (1993) soulève la responsabilité morale du Canada face aux pays dont l'économie est fortement dépendante d'évènements climatiques susceptibles d'accepter, à plus ou moins court terme, les "réfugiés-climatiques"¹⁴. McGregor (1993) énumère ces événements qui, en touchant un pays en développement principalement, peuvent résulter en un déplacement de la population éventuel (hausse du niveau des mers, assèchement de la nappe phréatique, sécheresse, désertification, épidémies, ouragans). Myers (1993) avance des chiffres pour le nombre de "réfugiés-climatiques" (15 millions pour le Bangladesh, 14 millions pour l'Égypte, 26 millions pour la Chine) et estime une facture annuelle de 8 milliards pour prendre soin de ces réfugiés. Les conséquences sur la population locale et sa réaction face aux nouveaux arrivants sont jusqu'à présent que très peu quantifiés. Les habitudes alimentaires, sociales et culturelles de la région peuvent, à moyen terme et dans les cas où le nombre d'immigrants originaires d'un même continent, se modifier graduellement (Chalecki, 1997). Un questionnement sur la solidité du tissu social devient alors pertinent.

¹⁴ individu forcé de quitter son emplacement traditionnel, de façon permanente ou temporaire, à cause d'un dérangement environnemental marqué du climat mettant en jeu son existence ou sérieusement affecté sa qualité de vie (adapté de El-Hinnawi, 1985)

Tableau 6.32 - Impacts économiques des conditions de 2xCO₂ sur l'économie

Secteur	Produit intérieur brut en 1990 (en millions de 1986\$)	Pourcentage	Estimé du changement sous un scénario 2xCO ₂ (exprimé en termes de % de variation)
Agriculture	1 678,4	1,5	- 10 %
Pêche et chasse	73,4	0,1	- 10 %
Forêts	566,7	0,5	- 25 %
Mines	1 123,3	1,0	-
Manufacturier	23 294,5	20,1	-
Industries alimentation	(2 184,8)	(1,9)	- 5 %
Produits papier et métallurgiques (allied)	(2 487,7)	(2,1)	- 25 %
Construction	7 893,9	6,8	+ 5 %
Transport et Entreposage	4 169,0	3,6	- 10 %
Services publics (excluant télécommunications)	4 115,7	3,5	+5 %
Vente gros et détail	13 523,8	11,7	-
Services en éducation	6 556,4	5,6	-
Services de santé et sociaux	6 836,8	5,9	?
Services gouvernementaux	7 611,8	6,6	+ 1 %
Services logement et repas	2 584,0	2,2	-
Autres	<u>36 039 (est.)</u>	<u>31,0</u>	<u>- 2 %</u>
<i>TOTAL</i>	<i>116 065</i>	<i>100,0</i>	<i>1,3 %</i>

(adapté de Green,1993)

Bien que le Québec n'a pas à s'inquiéter pour sa sécurité en alimentation tout en étant sensible à des phénomènes climatiques extrêmes pouvant ponctuellement détruire une grande superficie de cultures essentielles, Chen & Kates (1994) trouvèrent que la demande en alimentation triplera ou quadruplera mondialement d'ici 2060 pour être en mesure de nourrir les quelque 10 milliards d'habitants sur la Terre.

Même sous un scénario 2xCO₂, les ressources agricoles, forestières et hydrauliques du Québec demeureront des atouts importants pour l'économie et la population du Québec. Mais comment la disponibilité de ces ressources au Québec permettront-elles de compenser les pertes ou les effets néfastes qu'une variabilité climatique accentuée ailleurs à travers le monde? Chalecki (1997) tente d'aborder cette problématique dans un contexte canadien.

Le nombre d'études traitant spécifiquement de ce sujet est très faible sinon inexistante. Myers (1993) estima que le changement climatique selon un scénario $2xCO_2$ résultera en une diminution de 10 % au moins 3 fois par décennie de la production mondiale de blé. Les répercussions d'un changement climatique sur les ressources forestières (section 6.7) pointent vers des retombées positives rendant le Québec ouvert à une exportation plus élevée. Ceci est également supporté par Saporta & al (1997) démontrant que la production forestière au Canada pourrait augmenter jusqu'à 20 %.

Le positionnement du Québec face à l'offre et la demande hydro-électrique sera déterminée par la combinaison d'une demande moins forte en hiver (chauffage réduit), des besoins énergétiques plus élevés en été (plus de climatisation) et une capacité de production hydro-électrique à la merci d'une évaporation plus grande et des précipitations pour les régions génératrices d'énergie (Moyen et Grand Nord Québécois) à la hausse. Toute la question de la déréglementation de l'énergie dans le cadre de l'ALÉNA vient cependant rendre la détermination des retombées nettes pour le Québec passablement plus complexe.

7. LACUNES ACTUELLES ET RECOMMANDATIONS

Le chapitre 6 nous a permis d'examiner systématiquement le niveau de connaissances actuelles sur le lien existant entre les fluctuations climatiques passées, présentes et futures et une dizaine de secteurs stratégiques pour le Québec. En plus, grâce au chapitre 5, il a été démontré clairement à quel point plusieurs de ces secteurs d'activités sont sensibles à des événements climatiques extrêmes.

La somme d'informations, de connaissances, de lacunes, de pistes de solutions et d'avenues de recherche recueillis dans l'élaboration du chapitre québécois de l'Étude pan-canadienne sur les répercussions et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique est tout simplement phénoménale. Certains secteurs sont bien documentés, d'autres n'en sont qu'à leurs balbutiements en ce qui concerne la connaissance du lien climat-secteur. Le défi ici est d'établir une liste de lacunes qui soit la plus objective et réaliste possible tout en tenant compte de ce déséquilibre dans la compréhension que nous pouvons avoir, au Québec, des répercussions de la variabilité climatique sur nos ressources, nos usages et nos activités.

Pour chaque secteur, un tableau synthèse a été élaboré visant à:

- résumer le niveau de connaissance actuel du lien entre le climat et le secteur selon 5 catégories (très faible, faible, moyen, bon, très bon);
- résumer le niveau de connaissances actuelles sur l'ampleur et l'intensité des répercussions d'un changement climatique sur ce secteur selon 5 catégories (très faible, faible, moyen, bon, très bon);
- l'identification, par ordre de priorité, des lacunes actuelles caractérisant ce secteur;
- pour chaque lacune, des pistes de solutions et des recommandations spécifiques voulant combler, à court et à moyen terme, ces lacunes.

RESSOURCES EN EAU	
<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et les ressources en eau:</i>	BON
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur les ressources en eau:</i>	MOYEN
LACUNES	RECOMMANDATIONS
<p>L.1 L'importance et le rôle de l'ensemble des intrants menant à l'arrivée d'eau dans les plans d'eau importants de la province doivent être beaucoup mieux compris si on espère être en mesure de les modéliser subséquentement de façon efficace. La priorité doit être mise sur le bassin versant du Saint-Laurent. La documentation systématique des niveaux d'eau extrêmes historiques (hauts et bas) et la gamme des répercussions de ces fluctuations anormales est déficiente et urgente à combler. Toute la question d'intégration des informations physiques, biologiques, économiques et sociales reliées spécifiquement à un événement de niveau d'eau extrême dans le Saint-Laurent doit être envisagée sérieusement.</p> <p>L.2 Un manque évident d'indicateurs adéquats pour évaluer la quantité et la qualité de l'eau de façon quantitative face aux fluctuations climatiques anormales et significatives</p>	<p>R.1 En utilisant les niveaux d'eau extrêmes historiques qui ont frappé le Saint-Laurent depuis le début du siècle, rassembler et documenter les intrants physiques, biologiques, économiques et sociaux liés à chaque événement extrême et énumérer l'ensemble des impacts de ces variations anormales du niveau d'eau du Saint-Laurent sur les variations des apports en eau par sous-bassin, le transport des particules, la qualité de l'eau, la zone d'introduction saline, les patrons de circulation et la stratification verticale</p> <p>R.2 Développer, valider et rendre accessibles rapidement des indicateurs climatiques représentatifs de fluctuations anormales du climat et permettant de retrouver quantitativement l'ampleur des répercussions sur les usages et ressources au Québec. À très court terme, le Saint-Laurent et le Nord Québécois sont des régions de recherche prioritaires.</p>

RESSOURCES EN EAU (lacunes et recommandations...suite)

<p>L.3 Le lien entre les cycles hydrologiques décennaux et les systèmes climatiques pour divers bassins versants de la province sur une base décennale n'est pas bien compris particulièrement dans le nord du Québec.</p>	<p>R.3a Sélectionner en priorité, 1 ou 2 sous-bassins du Québec où une analyse intégrée et globale du cycle hydrologique pourrait être entreprise menant à la validation et à l'arrimage d'outils de modélisation hydrologique compatibles avec les modèles régionaux du climat et utilisables par les intervenants de la ressource eau au Québec. Les contraintes spatiales et temporelles des données climatologiques et hydrologiques devront être tenues en compte.</p> <p>R.3b La validation de ces outils de modélisation en utilisant des cas historiques d'inondations ou de crues subites (e.g. Saguenay - juillet 96, Montréal - juillet 87) exige un suivi systématique de ce type d'événements climatiques extrêmes</p>
<p>L.4 On doit rassembler les données statistiques requises reliant les événements climatiques anormaux avec les usages (quantité/qualité) de l'eau potable. L'examen plus accentué de toute la question de l'approvisionnement en eau et de sa qualité face aux fluctuations extrêmes des divers plans d'eau (nappes souterraines) de la province est requis pour mieux faire face aux besoins futurs en eau potable.</p>	<p>R.4 Effectuer une recherche permettant de colliger les données statistiques sur l'ensemble des usages d'eau potable dans les grandes agglomérations urbaines du Québec et examiner quantitativement le lien avec l'occurrence de fluctuations climatiques anormales et exceptionnelles (sécheresse, crues, comportement saisonnier, etc..)</p>
<p>L.5 L'érosion des berges dépend des interactions entre les niveaux d'eau du plan d'eau et l'intensité des vagues frappant la rive et générées par les tempêtes. Il est donc important de s'attarder, dans un contexte de changement climatique, sur un suivi de l'intensité et de la trajectoire des systèmes météorologiques responsables de vagues de tempête sur le comportement érosif de la morphologie des plans d'eau importants du Québec.</p>	<p>R.5 Documenter et analyser la fréquence, l'amplitude et la durée des systèmes météorologiques traversant le Québec; établir des statistiques comparatives entre régions et s'étendant sur plusieurs années afin d'évaluer le déplacement possible dans la trajectoire des systèmes météorologiques ainsi que les patrons de précipitations et de vents qui y sont associés (vents de tempête)</p>
<p>L.6 La sensibilité des fluctuations climatiques anormales sur la capacité de la province à exporter ou importer de l'eau douce</p>	<p>R.6 Établir les avantages comparatifs de la disponibilité de la ressource eau présente au Québec sous un scénario de changement climatique par rapport aux régions limitrophes à la province.</p>

SANTÉ ET ASPECTS SOCIAUX	
<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et la santé et aspects sociaux:</i>	FAIBLE
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur la santé et les aspects sociaux:</i>	TRÈS FAIBLE
LACUNES	RECOMMANDATIONS
<p>L.7 Même s'il est difficile d'isoler la variable "climat" en santé humaine, il est urgent de mieux comprendre quantitativement comment le climat et les fluctuations climatiques anormales influent directement (e.g. chute draconienne de température) ou indirectement (e.g. chaleur accablante et la qualité de l'air qui y est liée) sur la santé de la population au Québec. La grande sensibilité de la santé humaine et des comportements sociaux lors de phénomènes climatiques extrêmes (inondations, vagues de froid et de chaleur, tempêtes hivernales) pointe les priorités dans cette direction.</p>	<p>R.7a Initier des études multi-disciplinaires visant à évaluer quantitativement les répercussions sur la morbidité/mortalité humaine et le comportement social de la population en milieu urbain ou semi-urbain au Québec lors de phénomènes climatiques ponctuels (historiques ou actuels) soient:</p> <ul style="list-style-type: none"> • les vagues de chaleur accablante et les épisodes de smog qui y sont fréquemment associés; • les inondations majeures; • les vagues de froid intense; • les tempêtes hivernales; <p>en tentant de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • définir les indicateurs climatiques; • identifier les événements climatiques anormaux par province, région et ville; • d'évaluer les causes de chaque décès; une analyse des dossiers enregistrés au bureau du coroner permettrait une meilleure compréhension entre événements extrêmes et mortalités; <p>R.7b</p> <p>R.7c Il ne faudrait pas passer sous silence le lien indirect existant entre la variabilité climatique, la qualité de l'air et de l'eau et la santé humaine (voir R.1).</p> <p>Suivre de près les maladies infectieuses émergentes et celles associées aux cultures agricoles liées directement à l'alimentation</p>

SANTÉ HUMAINE ET ASPECTS SOCIAUX (lacunes et recommandations...suite)

<p>L.8 Il existe peu d'études concernant l'impact social d'un éventuel changement climatique sur:</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'identité d'une communauté; • la sécurité; • l'intégration; • la densité; • la perte du lieu de résidence; • la capacité des institutions et organisations sociales existantes à s'adapter aux nouveaux besoins des citoyens. <p>L.9 Le milieu médical et social connaît peu ou pas du tout l'importance de la variabilité climatique sur les activités humaines au Québec. Un effort de sensibilisation et d'accès à de l'information climatique pertinente est une priorité..</p>	<p>R.8a En utilisant les scénarios 2xCO₂ transitoires (divisés par période de 10 ans), déterminer les tendances au Québec sur le nombre de phénomènes climatiques extrêmes résultant d'un changement climatique. Une bonne piste de recherche réside dans les répercussions sur la santé et le comportement social des vagues de chaleur.</p> <p>R.8b En tenant compte de l'origine des populations immigrantes et des réfugiés-climatiques actuels et futurs, dresser un tableau qualitatif des pressions qu'un changement climatique apportera sur la solidité du tissu social, les habitudes culturelles, alimentaires et sociales d'un nombre limité de régions au Québec reconnues comme étant les hôtes d'un flux ponctuel d'étrangers.</p> <p>R.9a Offrir des cours et programmes de formation sur la santé et le climat;</p> <p>R.9b Appuyer et promouvoir la recherche interdisciplinaire dans le domaine de la santé en rapport avec la météorologie et la climatologie;actualiser les banques de données, faciliter l'accès aux chercheurs à celles-ci.</p>
---	---

AGRICULTURE

<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et l'agriculture:</i>		MOYEN
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur l'agriculture:</i>		MOYEN
LACUNES	RECOMMANDATIONS	
L.10 Une absence d'indicateurs permettant de suivre et d'identifier les fluctuations climatiques anormales et qui se traduisent par des répercussions positives ou négatives pour l'agriculture	R.10a	Conserver prioritairement toutes les stations climatiques ayant une longévité importante de données et permettant des analyses climatiques essentielles pour cerner tout indice de changement climatique et la détermination de la fréquence des événements qui permettrait d'estimer plus adéquatement la variabilité climatique.
	R.10b	Développer, valider et rendre accessible des indicateurs climatiques représentatifs des répercussions sur le rendement des cultures
L.11 L'ampleur des dommages biologiques et économiques aux cultures causés par des événements climatiques extrêmes n'est pas systématiquement et suffisamment documenté. Les périodes de sécheresse, la grêle et les périodes de gel/dégel en période hivernale sont les phénomènes climatiques extrêmes les plus marquants pour l'agriculture.	R.11	Pour l'ensemble des épisodes de sécheresse, de grêle et de gel/dégel hivernal observés au cours des 20 dernières années, établir un lien quantitatif entre l'occurrence et l'intensité de ces événements avec les dommages causés aux cultures (e.g. via le programme d'Assurance-récolte)
L.12 Il existe un besoin pressant de formation des agriculteurs en vue d'une meilleure gestion de l'information climatique dans les opérations agricoles routinières.	R.12	À l'intérieur des plans de ferme, examiner les facteurs climatiques susceptibles d'optimiser et de faciliter le travail des agriculteurs dans: <ul style="list-style-type: none"> • la gestion de l'eau (drainage et irrigation), • la prise de décision (ensemencement, récolte), • le travail au sol, les traitements phytosanitaires, • la construction des bâtiments.

<i>AGRICULTURE (lacunes et recommandations...suite)</i>	
<p>L.13 Les modèles actuels liant les plantes aux paramètres climatiques sont trop généraux et empiriques. On est confronté souvent à des problèmes d'échelle.</p>	<p>R.13a Réalisation d'études liant la disponibilité en eau, la croissance végétale, la teneur en CO₂ et les conditions climatiques par l'utilisation de modèles plus adaptés et ayant une portée locale ou régionale</p> <p>R.13b Modélisation de la variation dans les rendements des plantes sous divers stimuli climatiques probables dans un scénario 2xCO₂ au Québec (incluant le développement des insectes ravageurs, parasites, utilisation des fongicides et pesticides). Déterminer les cultures ayant un fort potentiel d'importation dans des pays climatiquement affectés.</p> <p>R.13C Adapter le développement des hybrides à un spectre plus large (e.g. maïs-grain);</p>

ÉCOSYSTÈMES ET MILIEUX HUMIDES

<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et les écosystèmes et milieux humides:</i>	MOYEN
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur les écosystèmes et les milieux humides:</i>	FAIBLE

LACUNES	RECOMMANDATIONS
<p>L.14 Connaître davantage comment le fleuve Saint-Laurent, comme système, fonctionne et comment les divers écosystèmes réagissent au cadre climatique actuel</p>	<p>R.14a Étudier et interpréter l'historique du climat et de l'environnement surtout en regard des interactions entre l'atmosphère, l'océan (le système Saint-Laurent dans ce cas-ci) et les écosystèmes</p>
<p>L.15 Il n'existe pratiquement pas d'études relativement à l'adaptation à un changement climatique dans le secteur Cornwall-Québec</p>	<p>R.14B Réalisation d'études sur l'impact d'une augmentation de CO2 sur la croissance des différentes espèces végétales (espèces forestières, espèces agricoles, végétation des milieux humides) et des espèces qu'on trouve dans les écosystèmes riverains et aquatiques du Saint-Laurent.</p> <p>R.15 Entreprendre une étude multidisciplinaire permettant de lier les variations des niveaux d'eau historiques et actuelles dans le Saint-Laurent dans un milieu particulièrement riche d'un point de vue écosystèmes et milieux humides. Le secteur du lac Saint-Pierre est privilégié.</p>

ÉCOSYSTÈMES ET MILIEUX HUMIDES (lacunes et recommandations...suite)

<p>L.16 Le lien étroit et essentiel entre l'existence d'une variabilité climatique suffisamment grande et l'état de santé des milieux humides et d'espèces végétales est à parfaire, tenant compte surtout que certaines espèces sont en situation précaire ou ont atteint leur limite de distribution sur le territoire québécois. Les niveaux de tolérance à des événements extrêmes (hauts niveaux d'eau, sécheresse ,etc..) de ces écosystèmes ne sont pas les mêmes et méritent une attention plus particulière.</p>	<p>R.16a Développer, valider et rendre accessible des indicateurs climatiques permettant d'identifier les situations climatiques extrêmes résultant en des répercussions substantielles pour les écosystèmes et les milieux humides</p> <p>R.16b Mise en place d'un réseau de suivi ichtyologique permettrait d'établir un portrait au moment "zéro", maintenant, afin de ne pas faire face à la situation vécue lors du constat du phénomène des pluies acides, soit la difficulté à affirmer un impact ou non</p> <p>R.16c Établir des stations de référence permettant un suivi à long terme (monitoring) des écosystèmes dans des régions témoins préalablement reconnues en fonction des divisions du Saint-Laurent.</p> <p>R.16d Compléter d'un réseau de stations d'observations multidisciplinaires de longue durée le long du Saint-Laurent (données climatiques et écologiques)</p>
<p>L.17 Les connaissances sur les mécanismes responsables de la variabilité naturelle des populations animales demeurent incomplètes</p> <p>L.18 Mettre sur pied des dispositifs d'évaluation des changements écologiques selon les scénarios climatiques les plus vraisemblables</p>	<p>R.17 Identifier les stades critiques dans le développement des espèces et déterminer les facteurs physiques et biologiques affectant la survie, la croissance et la fécondité des individus</p> <p>R.18a Outils de simulation seraient particulièrement utiles pour examiner les conséquences fauniques probables de différents scénarios et des décisions sur la régularisation des niveaux d'eau</p> <p>R.18b Amorcer et expérimenter maintenant des stratégies de gestion variées afin de voir leur efficacité au fur et à mesure que les changements se produisent</p>

PÊCHERIES

<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et les pêcheries:</i>		MOYEN
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur les pêcheries:</i>		FAIBLE
LACUNES	RECOMMANDATIONS	
<p>L.19 L'occurrence, l'ampleur et le synchronisme d'une fluctuation des niveaux et débits d'eau en fonction des habitudes de vie différentes de plusieurs espèces de poissons d'eau douce sont primordiales à connaître. Ces facteurs doivent donc faire l'objet d'une meilleure connaissance. Il faut poursuivre ou amorcer l'identification des courbes de satisfaction et la mesure de force des cohortes de certaines espèces fragiles à des bas niveaux d'eau</p> <p>L.20 On connaît très peu de choses sur le comportement des populations d'eau douce et salée dans les régions plus septentrionales du Québec.</p>	<p>R.19a Pour des périodes où les niveaux d'eau du Saint-Laurent ont atteint des valeurs extrêmes(1936, 1965, été 1995 au lac St-Pierre)</p> <p>R.19b Examiner les répercussions de tels niveaux d'eau sur la force des cohortes de certaines espèces (perchaude, grand brochet, doré jaune, poulamon) dans des secteurs clés du Saint-Laurent par le biais de plan de pêche ou d'un réseau de suivi ichtyologique;</p> <p>R.19c Effectuer un suivi de la pêche sportive et autorisée dans des secteurs clés pour ce type d'activités (taille, poids, captures, âge);</p> <p>R.20 Identifier des zones où des études multi-partites pourront être entreprises pour faire les relevés sur les populations des espèces de poissons les plus importantes des plans d'eau du Nord Québécois</p>	

<i>PÊCHERIES (lacunes et recommandations...suite)</i>	
<p>L.21 L'influence de facteurs tels la température et la direction des vents (phénomène de résurgence) selon les saisons sur la présence, la vitalité, le recrutement et la mortalité de certaines espèces est peu étudiée et comprise.</p>	<p>R.21a Sous des conditions spécifiques de froid intense ou de chaleur (choc thermique), connaître les limites correspondantes de tolérance et de mortalité d'espèces sensibles à ce phénomène (e.g. sébaste);</p> <p>R.21b Comprendre la fréquence chronologique et les processus météorologiques, physiques, biologiques et hydrologiques pouvant expliquer les variations dans la présence ou le recrutement de certaines espèces (e.g. morue, homard, saumon, maquereau);</p>
<p>L.22 Les modèles océaniques et climatiques doivent être couplés pour permettre d'estimer les régimes thermiques et de circulation dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent ainsi que dans la baie d'Hudson afin de pouvoir dégager les répercussions sur les populations et la santé des espèces de poissons vivant dans ces eaux.</p>	<p>R.22 La température de l'eau, la vitesse et la direction du vent, les courants ainsi que les débits d'eau douce provenant du Saint-Laurent et des grandes rivières de la Côte-Nord du Québec devraient être considérées lors de l'élaboration des modèles prédictifs des débarquements sous un scénario 2xCO₂ et pour des espèces vivant en surface. Tout effort d'arrimer la modélisation océanique, climatique, hydrologique et de glaces à une échelle suffisamment fine devra être encouragé.</p>

ÉNERGIE

<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et l'énergie:</i>		BON
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur l'énergie:</i>		MOYEN
LACUNES	RECOMMANDATIONS	
<p>L.23 Il n'existe pas de méthodes simples et rapides pour lier les fluctuations climatiques régionales aux besoins en chauffage et en climatisation, en apport net d'eau dans les réservoirs du Québec septentrional et à la capacité des centrales hydro-électriques le long du Saint-Laurent.</p> <p>L.24 La répartition énergétique du Québec dans un environnement 2xCO₂ doit être évaluée afin d'être en mesure de suffire aux besoins domestiques tout en estimant le potentiel d'exportation d'énergie vers les régions limitrophes au Québec</p>	<p>R.23 En se basant sur les données des 30 dernières années au Québec, développer et valider des indicateurs climatiques ayant une résolution spatiale et temporelle suffisante pour corrélérer ces indicateurs aux données effectives d'utilisation d'énergie pour fins de chauffage et de climatisation en tenant compte des améliorations technologiques mises en place pour réduire la consommation d'énergie.</p> <p>R.24 Par le biais des modèles régionaux du climat (résolution 30-40 km) et l'utilisation des indicateurs climatiques, indiquer le positionnement stratégique du secteur énergétique québécois dans un contexte nord-américain en comparant l'offre et la demande d'énergie sous un scénario 2xCO₂.</p>	

FORESTERIE

<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et la foresterie:</i>	MOYEN
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur la foresterie:</i>	FAIBLE

LACUNES	RECOMMANDATIONS
<p>L.25 Le réseau de monitoring actuel montre des signes d'instabilité quant au suivi de l'état de santé des populations forestières au Québec face à des stress climatiques accentués.</p>	<p>R.25a Dans un contexte de réductions budgétaires, il est essentiel de maintenir un réseau de monitoring ayant une résolution spatiale et temporelle suffisante pour être en mesure de faire un suivi sur :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la composition et l'évolution des populations forestières au Québec; • les régions où les forêts sont particulièrement sensibles aux perturbations climatiques par leurs liens avec les feux de forêt, le développement d'insectes et de maladies, l'établissement et la maturation des jeunes plants et les dommages causés par des tempêtes intenses; • les interactions entre la croissance dans la biomasse forestière, la mortalité, le bilan hydrique, le contenu en carbone et en azote ainsi que les conditions météorologiques.

FORESTERIE (lacunes et recommandations...suite)

<p>L.26 Le rôle des facteurs climatiques dans la distribution et le déplacement des populations forestières doit être mieux connu.</p>	<p>R.26a Un couplage entre les modèles biologiques et climatiques doit être testé et validé à court terme afin de mieux décrire et éventuellement prévoir le cycle du carbone et de l'azote présent dans l'écosystème forestier, d'inclure des composantes portant sur le bilan hydrique, d'insérer des informations sur la faune, les habitats et la biodiversité ce qui permettrait ainsi de mieux anticiper les variations des types de peuplements</p> <p>R.26b un contact plus étroit entre la communauté scientifique et les gestionnaires forestiers doit être entrepris afin d'inclure dans l'arrimage des modèles biologiques, climatiques et écologiques, les facteurs servant de critères dans la prise de décision liée à la gestion des populations forestières. Des projets multi-disciplinaires assureront cette cohésion entre chercheurs et intervenants forestiers.</p>
<p>L.27 Les perturbations naturelles extrêmes (feux de forêt, verglas, etc..) doivent être modélisées afin d'estimer, à moyen terme, les impacts sur les populations forestières touchées</p>	<p>R.27 Considérant qu'une fréquence plus élevée dans le nombre de perturbations « naturelles » pourrait être un signe précurseur d'un changement climatique, il devient urgent de mieux décrire les interactions biologiques et écologiques existant entre un événement extrême (feux de forêt, tempête de verglas, etc..) sur les populations forestières</p>

FORESTERIE (lacunes et recommandations...suite)

<p>L.28 La forêt boréale et la forêt tempérée séquestrent plus efficacement le carbone que bien d'autres écosystèmes terrestres mondiaux, en plus de constituer d'excellents réservoirs de carbone. La connaissance de l'évolution des divers flux de carbone dans un écosystème forestier est donc essentielle si on vise à optimiser ses fonctions de puits et de réservoirs de carbone</p>	<p>R.28a Dans le contexte de la forêt québécoise, les différences évidentes dans l'allocation du carbone pour les diverses espèces d'arbres sont un élément très important à considérer si l'on désire que les travaux sylvicoles choisis optimisent à la fois la production forestière et la séquestration du carbone dans l'écosystème forestier (plantes et sol). Une meilleure compréhension des liens entre les conditions climatiques et l'allocation de carbone par les diverses populations forestières devient donc une priorité.</p> <p>R.28b La gestion de la diversité des écosystèmes forestiers dans l'espace et le temps constitue l'un des enjeux majeurs de l'aménagement forestier. De plus, il sera important de préciser les conséquences cumulatives sur les populations forestières, de modéliser les réactions des plantes face à divers scénarios, de connaître les impacts de l'augmentation du CO₂ et de la température sur la croissance des essences et d'adapter les techniques d'aménagement forestier en prévision des changements climatiques.</p>
---	---

INFRASTRUCTURES ET PERGÉLISOL	
<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et les infrastructures et le pergélisol</i>	FAIBLE
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur les infrastructures et le pergélisol:</i>	TRÈS FAIBLE
LACUNES	RECOMMANDATIONS
<p>L.29 Un réchauffement climatique dans le Nord du Québec augmentera la profondeur de la couche active du pergélisol, en réduira la capacité portante et fera croître l'instabilité des versants et du relief. Tous ces aspects ont un impact direct sur les infrastructures routières, maritimes, hydro-électriques et gouvernementales.</p>	<p>R.29a Les réseaux de mesures thermiques (air et sol) doivent être maintenus et automatisés afin de pouvoir suivre l'évolution du climat et du pergélisol dans le Nord du</p> <p>R.29b Dresser la carte des régions arctiques et subarctiques établies des sols sensibles et riches en glace permettant, sous un scénario 2xCO₂, de cerner les endroits où des changements écologiques majeurs sont vulnérables à la fonte du pergélisol</p> <p>R.29c Déterminer, sous un environnement 2xCO₂, les facteurs de sécurité requis pour la conception de construction afin de prévenir les dégâts onéreux résultant de l'affaissement d'infrastructures sous un pergélisol en processus de fonte</p> <p>R.29d Évaluer les coûts actuels des dommages aux infrastructures directement générés par l'occurrence d'événements climatiques extrêmes</p>

TRANSPORT	
<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et le transport:</i>	MOYEN
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur le transport:</i>	TRÈS FAIBLE
LACUNES	RECOMMANDATIONS
L30 La quantification des répercussions des conditions hivernales actuelles et futures sur le transport routier devra être accentuée et adéquatement documentée	R.30 Le coût global des répercussions des tempêtes hivernales et des conditions de gel/dégel devrait être évalué et documenté en attendant que les modèles régionaux du climat puissent donner des indications fiables sur la trajectoire et l'intensité des dépressions météorologiques dans un environnement 2xCO ₂
L.31 Des mesures d'adaptation devront être développés dans le milieu maritime pour minimiser les impacts des épisodes (durée et intensité) anormalement basses des niveaux d'eau dans le Saint-Laurent	R.31 Le couplage de modèles économétriques et hydrodynamiques permettant de prévoir les niveaux/débits d'eau sur le Saint-Laurent sont encouragés afin de déterminer quelles modifications devront être apportées à la morphologie future des navires, aux types de cargo à favoriser pour assurer un positionnement stratégique avantageux aux ports maritimes du Québec.

LOISIRS ET TOURISME	
<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et les loisirs & tourisme:</i>	FAIBLE
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur les loisirs & tourisme:</i>	FAIBLE
LACUNES	RECOMMANDATIONS
L.32 Les seules études faites dans le domaine des loisirs et du tourisme ont traité du ski alpin et du golf en plus de toucher indirectement à la navigation de plaisance. Considérant l'importance de ce secteur au Québec, il est primordial que l'approche soit élargie à l'ensemble des activités récréatives et du potentiel touristique de chaque région de la province	R.32a Identifier, en les documentant au maximum, les critères de satisfaction requis pour la tenue d'activités récréatives au Québec, incluant les alternatives disponibles à chacune de ces activités de loisirs. R.32b Évaluer les retombées économiques actuelles des loisirs au Québec et tenter de les lier à des indicateurs climatiques qui leur sont représentatifs.

PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES EXTRÊMES	
<i>Niveau de connaissances sur le lien entre le climat et les phénomènes climatiques extrêmes:</i>	FAIBLE
<i>Niveau de connaissances sur les répercussions d'un changement climatique sur les phénomènes climatiques extrêmes:</i>	TRÈS FAIBLE
LACUNES	RECOMMANDATIONS
<p>L.33 La liste des phénomènes climatiques extrêmes qui se sont produits dans le passé au Québec est incomplète, parfois contradictoire, mal documentée tout en ne contenant pas assez d'informations pour en évaluer la portée globale au niveau physique, social, économique et biologique.</p> <p>L.34 Les scénarios de changement climatique actuels ne sont pas en mesure d'indiquer si la fréquence, l'intensité ou la durée des phénomènes climatiques extrêmes varieront, de façon significative, dans un environnement de 2xCO₂.</p>	<p>R.33a Que l'information concernant le coût et les conséquences physiques, biologiques et sociales des phénomènes climatiques extrêmes, plus particulièrement les inondations, les sécheresses, les vagues de froid et de chaleur ainsi que les épisodes de temps violent plus spécifiquement les tornades et la forte grêle et les tempêtes hivernales soit rassemblée et maintenue à la disposition des preneurs de décision;</p> <p>R.33b Qu'une méthodologie d'analyse et d'évaluation des répercussions des phénomènes climatiques extrêmes à partir de données directes ou indirectes soit développée et appliquée systématiquement pour fins de planification;</p> <p>R.34 En attendant que les scénarios de changement climatique puissent adéquatement fournir une indication valable des répercussions de l'augmentation des gaz à effet de serre sur les phénomènes climatiques extrêmes, il est recommandé de déterminer la sensibilité des divers secteurs et l'ampleur des impacts aux extrêmes climatiques en faisant varier, par un facteur déterminé, la fréquence, la durée et l'intensité de ces événements climatiques anormaux</p>

8. CONCLUSION

Le présent chapitre québécois de l'Étude pan-canadienne sur les répercussions et l'adaptation au changement climatique tire les conclusions suivantes :

- il existe une quantité impressionnante d'informations scientifiques portant sur le lien climat-secteurs au Québec mais qui est très variable selon le secteur ;
- les ressources en eau, l'agriculture et la foresterie semblent être les secteurs où l'on a le plus d'informations autant sur le lien actuel et passé avec le climat, mais également où on retrouve le plus grand nombre d'études ayant considéré les répercussions potentielles d'un scénario 2xCO₂ ;
- tout reste à faire dans le domaine de la santé humaine et des aspects sociaux, le maintien et la pérennité des infrastructures ainsi que les loisirs et le tourisme ;
- l'étude a clairement démontré notre grande sensibilité aux phénomènes climatiques extrêmes qui, malgré leurs impacts majeurs sur le Québec, doivent être beaucoup mieux documentés et analysés spatialement et temporellement.

Avec ses 33 lacunes de connaissances et ses 57 recommandations, le tome V de l'Étude pan-canadienne portant sur le Québec vise à être le tremplin pour le développement, l'élaboration et l'implantation de mesures d'adaptation judicieuses et concrètes face à une modification de la variabilité climatique d'origine naturelle ou anthropique.

9. BIBLIOGRAPHIE

Administration de la Voie maritime du Saint-Laurent (1992). *La Voie maritime du Saint-Laurent - rapport sur le trafic*, Saison de navigation 1992

Agee M. (1991). *Trends in cyclone and anticyclone frequency and comparison with periods of warming and cooling over the Northern Hemisphere*, Journal of Climate, 4 :263-267

Aiken D. & S. Waddy (1992). *Role of temperature in regulating recruitment in American lobsters*, Canadian Scientific Advisory Committee (CAFSAC), Invertebrates and Marine Plants Subcommittee, Theme session : The year of the lobster.

Alcamo J., Kreileman G.J.J., Krol M.S. & G. Zuidema (1994a). *Modelling the global society-biosphere-climate system: PART 1 - model description and testing*, Water, Air and Soil pollution, 76:1-35 (consulté mais non cité dans le texte)

Alcamo J., Van Den Born G.J., Bouwman A.F., Haan B.J. , Klein Goldewijk K.K., Klepper O., Krabec J., Leemans R., Olivier J.G.J., Toet A.M.C. , de Vries H.J.M. & H.J. Van der Woerd (1994b). *Modelling the global society-biosphere-climate system: PART 2 - computed scenarios*, Water, Air and Soil pollution 76:37-78 (consulté mais non cité dans le texte)

Allard M. (1997). *Communication personnelle*, Centre d'Études Nordiques, Université Laval

Allard M., Caron S. & Y. Bégin (1996). *Climatic and ecological controls on ice segregation and thermokarst: the case history of a permafrost plateau in Northern Quebec*, Permafrost and Periglacial processes, 7:207-227

Allard M., Wang B. & J.A. Pilon (1995). *Recent cooling along the Southern Shore of Hudson Strait, Québec, Canada, documented from permafrost temperature measurements*, Arctic and Alpine Research, vol 27(2):157-166

Allard M., Tremblay S., Pilon J.A. & J. Frydecki (1993). *Quaternary geology and geocryology in Nunavik, Canada*, Dans: Permafrost, Proceedings of the 6th International Conference on Permafrost, Wushan: South China University of Technology Press, 1:5-10

Allard M.A., Fortier R. & M.K. Séguin (1992). *The thermal regime of intertidal permafrost, George River estuary, Ungava Bay, Québec*, Canadian Journal of Earth Sciences, 29:249-259

Allen Jr. P.A. (1990). *Plant response to rising carbon dioxide and potential interaction with air pollutants*, Journal of Environmental Quality, 19:15-34 (consulté mais non cité dans le texte)

Anderson J.K. (1987). *Evaluation of northern pike spawning in Lake Champlain*, Final report, Vermont Fish and Wildlife, F-12-r, Job No. II-4, 64p.

André Talbot & associés (1989). *Description de la pêche sportive hivernale dans le fjord du Saguenay et de ses effets potentiels sur la ressource*, Groupe de recherche en productivité aquatique, Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), pour Environnement Canada, Conservation et protection, Région du Québec, Service canadien des parcs.

- Andrews J. (1993). *Inondation*. Cahier de l'eau du Canada, Environnement Canada, 127 pp
- Andrey J. & A. Snow (1997). *Canada Country Study: climate impacts and adaptation - Transportation sector*. Sectorial report of the Canada Country Study, Preliminary version, July, app. 36 pp
- Andrey J. & S. Yagar (1993). *A temporal analysis of rain-related crash risk*, Accident Analysis and Prevention, 25 :465-472
- Angel J.R. & F.A Huff (1997), *Changes in heavy rainfall in midwestern U.S.*, Journal of Water Resources planning & management, 123(4):246-249
- Angel J.R. (1995). *Large-scale storm damage on the U.S. shores of the Great Lakes*, J. Great Lakes Res., vol 21(3): 287-293
- Archambault S. & Y. Bergeron (1992). *An 802-year tree-ring chronologie from the Québec boreal forest*, Canadian journal of forest research, 22: 674-682
- Armellin A., Mousseau P., Turgeon P. & M. Gilbert (1994). *Synthèse des connaissances sur les communautés biologiques au lac Saint-Louis*, Rapport technique, Zones d'intérêt prioritaire no 5 et 6, Environnement Canada, Centre Saint-Laurent
- Arsenault G. (1995). *Prise en compte de la ressource faunique lors de la régularisation de l'eau du fleuve Saint-Laurent*, Mémoire du secteur faune du Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec déposé auprès du Conseil international de Contrôle du fleuve Saint-Laurent, 7 novembre 1995, Montréal
- Arseneault D. & S. Payette (1992). *A postfire shift from lichen-spruce to lichen-tundra vegetation at tree line*, Ecology, 73 :1067-1081
- Ashmore M.R.(1984). *Effects of ozone on vegetation in the United Kingdom*, In: Proc. International Workshop on the Evaluation of the effects of photochemical Oxidants on Human health, Agricultural crops, forestry, materials and visibility, Greenfelt P., Swedish Environment Research Institute, Goteborg, Sweden (consulté mais non cité dans le texte)
- Auclair A.N.D., Lill J.T. & C. Revenga (1996). *The role of climate variability and global warming in the dieback of northern hardwoods*, Water, Air and Soil pollution, 91 :163-186
- Bachand D. (1984). *Cas particulier de pluie verglaçante à Montréal - le 14 décembre 1983*, Note technique #84N-002, Environnement Canada, Centre Météorologique du Québec, 8 pp
- Barger G.L. & H.C.S. Thom (1949). *Evaluation of drought hazards*, Agron. J., 41:519-526
- Beckmann, L., Dunn, M. & K.Moore (1997). *Effects of Climatic Change on Coastal Systems in British Columbia and Yukon*, in E. Taylor and B. Taylor (eds.), *Responding to Global Climate Change in British Columbia and Yukon, Volume 1 of the Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation*, Vancouver British Columbia, pp. 8-1 to 8-26.

Bégin C. (1991). *Analyse architecturale et dendroécologique d'une pessière à lichens à la limite des forêts*, Thèse Ph.D., Université Laval

Bégin Y. (1990). *The effects of shoreline transgression on woody plants, upper St. Lawrence Estuary, Québec*, Journal of coastal research, 6 :815-827

Bégin Y., Arseneault S. & J. Lavoie (1989). *Dynamique d'une bordure forestière par suite de la hausse récente du niveau marin, rive sud-ouest du golfe du Saint-Laurent, Nouveau-Brunswick*, Géographie physique et Quaternaire, 43:355-366

Bégin Y. & S. Payette (1988). *Dendroecological evidence of lake-level; changes during the last three centuries in subarctic Québec*, Quaternary research, 30: 210-220

Bélanger R. (1986). *Influence de faibles hausses de niveau d'eau sur les populations de Rats musqués dans le sud-ouest du Québec*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 35 pp

Benoît J., Bergeron R., Bourgeois J.C., Desjardins S. & J. Picard (1987). *Les habitats et la faune de la région du lac Saint-Pierre: synthèse des connaissances*, Ministère du loisir, chasse et pêche, directions régionales de Montréal et Trois-Rivières, 123 pp

Bergeron L. (1995). *Les niveaux extrêmes d'eau dans le Saint-Laurent : ses conséquences économiques et l'influence des facteurs climatiques*, Rapport préparé pour Environnement Canada, 70pp

Bertrand P. (1996). *Problématique de l'érosion des berges du Saint-Laurent*, Présentation au 21^e congrès de l'Association des biologistes du Québec, 31 oct-2 nov 1995, Québec

Bertrand P. & C. Doré (1994). *Les conséquences potentielles du changement climatique global sur le Saint-Laurent*, Rapport présenté à Environnement Canada, Service de l'Environnement Atmosphérique, 44 pp

Biron H.P. & M. Benjamin (1992). *La tornade de Maskinongé (27 août 1991)*, Note technique 92N-001, Environnement Canada, Centre météorologique du Québec, 9 pp

Blanchette P. (1989). *Effets des inondations sur une population de Rat musqué au sud-ouest du Québec*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 59 pp

Boer G.J., McFarlane N.A. & M. Lazare (1992). *Greenhouse gas-induced climate change simulated with the CCC second-generation general circulation model*, Journal of Climate, 5 :1045-1077

Boivin D.J. & J. Lacroix (1992). *Vulnérabilité municipale et vagues de froid au Québec*, La Géographie appliquée, 10(4):19-22

Boivin D.J. & J.Lacroix (1990a). *Étude du phénomène des inondations en tant que catastrophe naturelle*, Le Climat, 8(2) :9-48

Boivin D.J. & J. Lacroix (1990b). *Étude du phénomène de grêle en tant que catastrophe naturelle : une évaluation en matière de protection civile et de vulnérabilité municipale*, Le Climat, 8(1):16-48

- Boivin D.J. & J. Lacroix (1989). *Étude du phénomène des vagues de chaleur en tant que catastrophe naturelle : une évaluation en matière de protection civile et de vulnérabilité municipale*, Le Climat, 7(2):18-52
- Bonan G.B. (1993). *Do biophysics and physiology matter in ecosystem models?*, Climatic Change, 24:281-285 (consulté mais non cité dans le texte)
- Bouchard H. & P. Millet (1993). *Le Saint-Laurent: Milieux de vie diversifiées*, Environnement Canada, Conservation et Protection, Région du Québec, Centre Saint-Laurent, Montréal
- Bouchard A., Barabé D., Dumais M. & S. Hay (1983). *Les plantes vasculaires rares du Québec*, Syllogeus n° 48, Musée nationaux du Canada, Ottawa
- Boucher R.J., Bourbonnais P.E., Cartier L. & A. Leclerc (1966). *Bassin de la rivière Saint-François : Inondation des 4-5 novembre 1927. Étude hydrologique*, Département des ressources hydrauliques, rapport 6-9, Gouvernement du Québec, 84 pp
- Boucher R.J., Cartier L. & A. Leclerc (1953). *Bassin de la rivière Saint-François : Inondation des 15 juin 1942*, Département des ressources hydrauliques, rapport 6-8-3, Gouvernement du Québec, 135 pp
- Boucher R.J., Cartier L. & A. Leclerc (1952). *Bassin de la rivière Saint-François : Inondation des 15-16 juin 1943*, Département des ressources hydrauliques, rapport 6-8-2, Gouvernement du Québec, 90 pp
- Bourbonnais P.E., Boucher R.J., Cartier & Leclerc (1964). *Rivière Ste-Anne à Saint-Raymond : inondation des 30 septembre et 1 octobre 1924*, Département des ressources hydrauliques, rapport 2-6, Gouvernement du Québec, 65 pp
- Bourget A., Lehoux D. & J. Rosa (1977). *Importance du Saint-Laurent pour la sauvagine*, Service Canadien de la Faune, Rapport technique no 2 (consulté mais non cité dans le texte)
- Brauer M. & J.R. Brook(1997). *Ozone personal exposures and health effects for selected groups residing in the Fraser Valley*, Atmospheric Environment, 31(14):2113-2121
- Brennan F.E. & P.J. Smith (1978). *The climatology of cyclones and anticyclones in the upper Mississippi and Ohio River valleys and the Great Lakes region*, Proc. Indiana. Acad. Sci., 87:391-402
- Brêthes J.C.F., Coulombe F., Lafleur P.E. & R. Bouchard (1987). *Habitat and spatial distribution of early benthic stages of the snow crab (Chionocetes Opilio O. Fabricius) off the north shore of the Gulf of St. Lawrence*, J. Crustacean Biol., 7:667-681
- Brian, J.E. (1967). *Northern pike production in Phalem Pound, Minnesota*, Minn. Acad. Sci., Vol. 34(2): 101-109 (consulté mais non cité dans le texte)
- Brière J., Jean M., Morissette J. & G. Vigeant (1991). *Étude statistique sur le facteur de refroidissement éolien au Québec*, Le Climat, Vol 9(2):6-38

Briffa K.R., Jones P.D. & M. Hulme (1994). *Summer moisture variability across Europe, 1892-1991 : An analysis based on the Palmer Drought Severity Index*, International Journal of Climatology, 14 :475-506

Brisson J., Bergeron Y. & A. Bouchard (1992). *The history and tree stratum of old-growth forest of haut-Saint-Laurent region, Québec*, Natural areas journal, 12: 3-9

Bryant C., André P., Provençal D., Singh B., Thouez J.P. & M. El Maayar (1997). *L'adaptation agricole aux changements climatiques: le cas du Québec*, Le Climat, Vol. 14(2): 81-97

Bugden G.L. (1991). *Changes in the temperature-salinity characteristics of the deeper waters of the Gulf of St.Lawrence over the past several decades*, In : J.C. Therriault (ed.) The Gulf of St.Lawrence : small ocean or big estuary ?, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 113 :139-147

Bugden G.L., Hargrave B.T., Sinclair M.M., Tang C.L., Therriault J.C. & P.A. Yeats (1982). *Freshwater runoff effects in the marine environment : the Gulf of St.Lawrence example*, Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci., 1078 :ix + 89 pp

Bureau de reconstruction et de relance du Saguenay-Lac-Saint-Jean (1996). *Bilan de la situation de reconstruction suites aux pluies diluviennes des 19 et 20 juillet dernier : Saguenay-Lac-Saint-Jean*.

Burnett R.T., Dales R.E., Raizenne M.E, Krewski, Summers P.W., Robert G.R. Ray-Young M., Dann T. & J. Brooke (1997, en cours). *Effect of low ambient levels of ozone and sulfates on the frequency of respiratory admissions to Ontario hospitals*.

Campagna M. (1996). *Le cycle du carbone et la forêt: de la photosynthèse aux produits forestiers*, Direction de l'environnement forestier, Service de l'évaluation environnementale, Ministère des Ressources naturelles, Gouvernement du Québec, 49 pp

Canada Maritime (1990). *Water levels on the St.Lawrence river*, Rapport présenté devant le comité sur les profondeurs d'eau le 25 juillet 1990

Cantin D. (1994). *Response of pinus banksiana (lamb) families to a global change environment*, Mémoires M.Sc., McGill, Montréal

Carignan R., Lorrain S. & K.R. Lum (1993). *Sediment dynamics in the fluvial lakes of the St.Lawrence River : accumulation rates and residence time of mobile sediments*, Geochemica et Cosmochimica Acta (consulté mais non cité dans le texte)

Carnell R.E., Senoir C.A. & J.F.B. Mitchell (1996). *An assessment of measure of storminess : simulated changes in northern hemisphere winter due to increasing CO₂*, Climate Dynamics, 12 :467-476

Cartier L. & A. Leclerc (1966a). *Rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond : inondations au cours de l'hiver 1952-53. Étude hydrologique*, Département des ressources hydrauliques, Rapport no 2-7, Gouvernement du Québec, 54 pp

Cartier L. & A. Leclerc (1966b). *Rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond : inondations des 21-22 décembre 1957. Étude hydrologique*, Département des ressources hydrauliques, Rapport no 2-8, Gouvernement du Québec, 20 pp

Cartier L. & A. Leclerc (1966c). *Rivière du Loup, Comté de Kamouraska, Paroisse de Saint-Alexandre. Inondations : période 1955-1963*, Département des ressources hydrauliques, Rapport no 66-1,66-2,66-3, Gouvernement du Québec, 50 pp

Cartier L. & A. Leclerc (1965a). *Rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond : historique des inondations, TOME I : période de 1893 à 1931. TOME II : période de 1932 à 1957*, Département des ressources hydrauliques, Rapport no 2-5, Gouvernement du Québec, 357 pp

Cartier L. & A. Leclerc (1965b). *Bassin de la rivière Saint-François : Inondation des 10-11 septembre 1924. Étude hydrologique*, Département des ressources hydrauliques, Rapport no 6-8, Gouvernement du Québec, 81 pp

Castonguay M., Rose G.A. & W.C. Leggett (1992). *Onshore movements of Atlantic mackerel (Scomber scombrus) in the northern Gulf of St. Lawrence : associations with wind-forced advections of warmed surface waters*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 49(11) :2232-2241

Castonguay Y. (1990). *Atelier sur les perspectives climatiques en agriculture*, Le Climat, numéro spécial, (ACFAS-ACLIQ) octobre: 33-34

Caya D., Laprise R., Giguère M., Bergeron G., Blanchet J.P., Stocks B.J., Boer G.J. & N.A. McFarlane (1995). *Descriptions of the Canadian regional climate model*, Journal of Water, Air and Soil Pollution, 82 :477-482

CENTREAU (1974). *Aspects physiques et sédimentologiques, Étude du fleuve Saint-Laurent, tronçon Varennes-Montmagny*, Université Laval Programs and abstracts of the 38th Conf. On Great Lakes Res., 22 (consulté mais non cité dans le texte)

CMQ - Centre de météorologie de Québec (1983). *Étude statistique des paramètres climatiques reliés à la mortalité des arbres fruitiers au Québec*, Rapport technique, Environnement Canada, région du Québec, Unité agrométéorologique, numéro 83R-001

Centre Saint-Laurent (1996). *Rapport-synthèse sur l'état de l'environnement du Saint-Laurent. Volume 1 : L'écosystème du Saint-Laurent*, Environnement Canada - région du Québec, Conservation de l'environnement - et Éditions Multimondes, Montréal. Coll. Billan Saint-Laurent.

Centre Saint-Laurent (1994). *Synthèse et analyse des connaissances sur les aspects socio-économiques du lac Saint-Louis*, Rapport technique, Zones d'intérêt prioritaire no 5 et 6, Environnement Canada, Région du Québec, 197 pp

Centre Saint-Laurent (1991). *Synthèse et analyse des connaissances sur les aspects socio-économiques du lac Saint-Pierre*, Rapport technique, Zone d'intérêt prioritaire no 11, Environnement Canada, Région du Québec, 170 pp

Chainé P.M. (1973). *Glaze and its misery: the ice storm of 22-23 March 1972 North of Montréal*, Weatherwise, 124-128

Chalecki B. (1997). *Extraterritorial influences of climate change : effects outside Canada and their impact on Canadian interests*, Canada Country Study, sectorial report

Changnon S.A., Glantz M.G., Fulton N.R., Harper M.E., Hewings G.J.D., Masson M., Miller K.A. & A.D. Tarlock (1994). *The lake Michigan. Diversion at Chicago and urban drought: Past, present and future regional impacts and responses to global climate change*, Dans: STANLEY A. CHAGNON, [éditeur]. Final report - NOAA contract no 50WCNR306047

Chen R.S. & R.W. Kates(1994). *World food security: prospects and trends*, Food Policy, 19(2):192-208

Chouinard G.A. & A. Fréchet (1994). *Fluctuations in the cod stocks of the Gulf of St.Lawrence*, ICES Mar. Sci. Symp., 198 :121-139

Clague, J.J. (1989). *Sea Levels on Canada's Pacific Coast: Past and Future Trends. Episodes* 12(1), pp. 29-33.

CMI (1993). *Les mesures destinées à atténuer les conséquences néfastes des fluctuations de niveaux d'eau du Saint-Laurent et des Grands lacs*, Rapport présenté aux gouvernements du Canada et des Etats-Unis, Commission Mixte Internationale, 57 pp

Coates D.R. (1981). *Environmental geology*, John Wiley et Sons Inc., 701 pp

Cohen S.J. (1997). *Mackenzie Basin Impact Study (MBIS) - Final report*, Environment Canada, 372 pp

Comins H.N. & R.E. McMurtrie (1993). *Long-term response of nutrient-limited forests to CO2 enrichment: equilibrium behavior of plant-soil models*, Ecological Applications, 3:666-681 (consulté mais non cité dans le texte)

Comité de Régularisation des eaux (1976). *Rapport final du Comité de régularisation des eaux - Région de Montréal*, Ministère des Richesses naturelles du Québec et Environnement Canada, 123 pp

Conseil canadien climatologique canadien (1991). *Le changement climatique et ses répercussions sur le Canada: le point de vue scientifique*, Sommaire du changement climatique, Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada, 34 pp

Consultants Jacques Bérubé Inc (1997). *Dragage sélectif des hauts-fonds dans la voie navigable du Saint-Laurent entre Montréal et le Cap à la Roche, Addenda à l'étude environnementale*, Pour la Société du Port de Montréal, app. 130 pp + cartes et figures

Cook E.R. & J. Cole (1991). *On predicting the response of forests in eastern North America to future climatic change*, Climatic Change, 19:271-282

Côté L. (1989). *Effets des hauts niveaux du haut estuaire du Saint-Laurent sur une bordure forestière, Saint-Augustin, Québec*, Mémoire de baccalauréat, Université Laval, 35 pp

Cotton F. (1995). *Les changements climatiques et la ressource faunique du fleuve Saint-Laurent*, Présentation faite au Séminaire sur les changements climatiques, 22-23 mars

Couillard D. & Y. Lefebvre (1986). *Indice de qualité de l'eau pour détecter l'impact de la pollution diffuse urbaine*, Can. J. Civ. Eng, 13 :631-638

Couillard L., Grondin P. & J. Millet (1985). *Étude complémentaire de la végétation du lac Saint-Louis et du lac des Deux-Montagnes*, Archipel de Montréal : groupes écologiques de la plaine de débordement et de la zone aquatique, patrons d'inondations clés de végétation potentielle et plans de gestion, Préparé par le Groupe Dryade pour le Ministère des Loisirs, de la Chasse et de la Pêche du Québec, vol 1-5

Couillard, J.-Y (1990). *Les impacts économiques d'un éventuel changement climatique sur le secteur agricole*, Le Climat, numéro spécial, (ACFAS-ACLIQ) octobre: 13-17

Courbin P. (1988). *Cas de double tornade du 15 juillet 1984 sur le sud-ouest du Québec*, Note technique 88N-001, Environnement Canada, Centre Météorologique du Québec, 9 pp

Crecco V. & T. Savoy (1987). *Effects of climatic and density-dependent factors on intra-annual mortality of larval American shad*, American Fisheries Society Symposium, 2:69-81 (consulté mais non cité dans le texte)

Crecco V. & T. Savoy (1986). *Effects of density-dependent and climatic factors on American shad, Alosa Sapidissima, recruitment: a predictive approach*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 43:457-463 (consulté mais non cité dans le texte)

Cure J.D. & B. Acock (1986). *Crop response to carbon dioxide doubling : a literature survey*, Agricultural and Forest Meteorology, 38:127-145 (consulté mais non cité dans le texte)

Currie B.W. (1951). *Sensations isopleths on a wind-temperature diagram for winter weather on the Canadian Prairies*, Bulletin of the American Meteorological Society, 32 :371-374

D'Amours D. (1993), *The distribution of cod (Gadus Morhua) in relation to temperature and oxygen levels in the Gulf of St.Lawrence*, Fish. Oceanogr., 2(1) :24-29

D'Amours D. & M. Castonguay (1992). *Spring migration of Atlantic mackerel, Scomber scombrus, in relation to water temperature through Cabot Strait (Gulf of St.Lawrence)*, Environn. Biol. Fishes, 34 :393-399

Deaudelin G. (1993). *Climatologie du temps violent estival au Québec : 1981-1992*, Environnement Canada, Note technique 92N-002, 25 pp

Deaudelin G. (1989). *14 juillet 1987 : un cas extrême de crue subite*, Note technique #89N-002, Environnement Canada, Centre météorologique du Québec, 6 pp

Delphino, R.J., Becklake EM.R. & Henly J.A. (1994). *The relationship of urgent hospital admissions for respiratory illness to photochemical air pollution levels in Montréal*, Environnement Research, vol. 67, p 1-19

Demers, S. & J.C.Therriault (1992). *Quand les océans pompent le CO²*, Interface, p. 15-25

Despôts M. (1994). *Politiques, stratégies ou mesures de conservation appliquées aux forêts anciennes dans les provinces canadiennes*, Québec, Ministère des ressources naturelles, Direction de l'environnement forestier, 67 pp (consulté mais non cité dans le texte)

Desrosiers M. & Y. Bégin (1992). *Étude dendrochronologique de l'érosion associée aux crues du Saint-Laurent, Saint-Antoine-de-Tilly, Québec*, Géographie physique et quaternaire, vol 46, 2 :173-180

Dessureault M.(1986). *Le dépérissement des forêts : un problème international*, Gouvernement du Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation, Cahier de conférence, Journée d'information sur l'acériculture 8 mai 1986.

Diamond, A. W. & R. K. Brace (1991). *Climate and waterfowl populations*, Dans Symposium of climate change and variability on the great plains tenu à Calgary en 1990. Dans:G. WALL, [éditeur]. Department of geography publication series. Occasional paper no 12. University of Waterloo., 245-257

Dionne J.C. (1986). *Érosion récente des marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec*, Géographie physique et Quaternaire, 40(1): 307-323

Dionne J.C. (1984). *An estimate of ice-drifted sediments based on the mud content of the ice cover at Montmagny, middle St.Lawrence estuary*, Marine Geology, 57:149-166 (consulté mais non cité dans le texte)

Dionne J.C. (1981). *Observations sur le déplacement des méga-blocs par la glace sur les rivages du Saint-Laurent*, Dans: J.C. DIONNE, [éditeur]. *Comptes-rendus - Atelier sur l'action des glaces sur les rivages, Rimouski 5-6 mai 1981*, Conseil national de recherches du Canada, Comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation littorales (consulté mais non cité dans le texte)

Dionne J.P., Cartier L. & A. Leclerc (1953). *Rapport d'inspection de la rivière Chaudière. Débâcle du 24 au 27 mars 1953*, Département des ressources hydrauliques, Rapport 45, Gouvernement du Québec, 9 pp

Dixon R.K., Borwn S., Houghton R.A., Solomon A.M., Trexler M.C. & J. Wisniewski (1994). *Carbon pools and flux of global forest ecosystems*, Science, 263:185-190

Dixon R.K. & D.P. Turner (1991). *The global carbon cycle and climate change: responses and feedbacks from below-ground systems*, Environmental Pollution, 73:245-262 (consulté mais non cité dans le texte)

Drinkwater K.F., Harding G.C., Vass W.P. & D. Gauthier (1991). *The relationship of Quebec lobster landings to freshwater runoff and wind storms*, In : J.C. Therriault (ed.), *The Gulf of St.Lawrence : small ocean or big estuary ?*, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 113 :179-187

Drinkwater K.F., Harding G.C., Mann K.H. & N. Tanner (1996). *An investigation of temperature as a possible factor in the increased abundance of American lobster (Homarus americanus) during the 1980s*, Fish. Oceanogr., 5 :176-193

- Dubé A. (1967). *Tendances climatiques à Montréal*, Rapport de projet, Service météorologique, Transports Canada, 7 pp + figures
- Dubreuil P., Miron J. & S. Siok (1983). *Cas de temps violent à St-Timothée, le vendredi 28 octobre 1983*, Rapport interne, Environnement Canada, Région du Québec
- Ducharme P. (1977). *La tornade du 13 juillet 1977 dans la région de Montréal*, Unité des services scientifiques, Environnement Canada, 43 pp
- Duchesne, J.-F. & P. Magnan (1997). *The use of climate classification parameters to investigate geographical variations in the life history traits of ectotherms, with special reference to white sucker (Catostomus commersoni)*, *Écoscience*, 4(2) :140-150
- Dumont P. (1997). *Communication personnelle*, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec
- Dumont, P. (1996). *Comparaison de la dynamique des populations de perchaudes (Perca flavescens) soumises à des niveaux différents de stress anthropique*, Rapport technique 06-46 et thèse de doctorat en Sciences de l'Environnement, UQAM, 285 pp
- Dumont P. (1996). Comparaison de la dynamique des populations de perchaudes (*Perca flavescens*) soumises à des niveaux de stress anthropiques, Thèse de doctorat en Science de l'environnement, Université du Québec à Montréal, 285 pp.
- Dumont P. & M. Léveillé (1995). *Niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent*. Note de service adressée à Fay Cotton, Direction de la faune et des habitats, Ministère de l'Environnement et de la Faune, 4 pp
- Dumont P. (1982). *Dispersion post-glaciaire de l'omble chevalier d'eau douce (Salvelinus Alpinus) dans le Québec méridional*, *Naturaliste can. (Rev. Écol. Syst.)*, 109:229-234
- Duncan K. (1997, en cours). *Canada Country Study : climate impacts and adaptation - Health sector*, Environment Canada
- Econosult (1986). *Détermination des avantages économiques d'une réduction des inondations*, Étude de faisabilité, Rapport technique no 5
- El-Hinnawi E.(1985), *Environmental refugees*, Nairobi, United Nations Environmental Program (consulté mais non cité dans le texte)
- El Jabi N., Richard D. & M. Roussell (1981). *Estimation des dommages causés par les inondations*, Rapport final, janvier 1981, Centre de développement technologique, École Polytechnique de Montréal (consulté mais non cité dans le texte)
- El Maayar M., Singh B., André P., Bryant C.R. & J.P. Thouez (1997). *The effects of climate change and CO₂ fertilization on agriculture in Québec*, *Agricultural and Forest Meteorology*, 85 :193-208
- Emmanuel K.A. (1987). *The dependence of hurricane intensity on climate*, *Nature*, 326 :483-484

Emmanuel, W.R., H.H. Shugart & M.P. Stevenson (1985). *Climate change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes*, *Climate change*, 7: 29-43

Environnement Canada (1997a). *Capsules-éclair sur l'état du Saint-Laurent: le fleuve...en bref*, Conservation de l'environnement, Environnement Canada, Région du Québec, 100 pp

Environnement Canada (1997b). *Rapport thématique - Le Saint-Laurent: dynamique et contamination des sédiments*, Version préliminaire révisée, 221 pp

Environnement Canada (1997c). *Pluies diluviennes du 18 au 21 juillet 1996, au Québec : Analyse et interprétation de données météorologiques et climatologiques*, Direction de l'Environnement atmosphérique, Région du Québec, 105 pp

Environnement Canada (1996a). *L'Almanach météorologique canadien, édition 1997*, ISBN 1-895618-85-1

Environnement Canada (1996c). *Rapport-synthèse sur l'état du Saint-Laurent, Volume 2 : L'état du Saint-Laurent*, Éditions Multi-Mondes, 157 pp

Environnement Canada (1995a). *L'état du climat au Canada : la surveillance de la variabilité et du changement climatiques*, Rapport sur l'état de l'environnement no 95-1, Environnement Canada, 52 pp

Environnement Canada (1995b). *Le niveau d'eau reste bas à Montréal*, Info-niveau. Vol 3, no 10, 2 p

Environnement Canada (1994). *Modélisation du système climatique de la terre*, Sommaire du changement climatique SCC 94-01, édition spéciale, 20 pp

Environnement Canada (1991). *L'état de l'environnement au Canada*, Gouvernement du Canada, Ottawa. Pagination multiple

Environnement Canada (1990a). *Les climats du Canada*, Ministère des Approvisionnement et Services Canada, Ottawa, 176 pp

Environnement Canada (1990b). *L'Almanach météorologique 1991*, Ministère des Approvisionnement et Services Canada, ISBN 0-660-13576-0

Environnement Canada (1989). *Le calendrier météo 1990*, Ministère des Approvisionnement et Services Canada, ISBN 0-660-92654-7

Environnement Canada (1988). *L'almanach météorologique du Canada 1989*, Ministère des Approvisionnement et Services Canada, ISBN 0-660-92290-8

Environnement Canada (1987a). *L'almanach météorologique du Canada, 1988*, Ministère des Approvisionnement et Services Canada, ISBN 0-660-92074-3

Environnement Canada (1987b). *Les pluies du 14 juillet 1987 dans la région de Montréal*, Rapport d'expertise, Division des Services scientifiques, 52 pp

- Environnement Canada (1987c). *Le climat de Montréal*, ISBN 0-660-91909-5, 64 pp
- Environnement Canada (1987d). *Saison des feux - 1986*, Centre météorologique du Québec, Service forêt-météo, 31 pp
- Environnement Canada (1985). *Indice d'inconfort estival - l'humidex*, Fiche climatologique #002, Division des Services scientifiques, Région du Québec, 5 pp
- Etkin D. (1997). *Climate change and extreme events*, Sectorial report of the Canada Country Study : climate change impacts and adaptation, 29 pp
- Etkin D. (1991). *Winter and summer surface air temperature trends in the northern hemisphere:1950-1988*, Climatological Bulletin, 25:182-193 (consulté mais non cité dans le texte)
- Evans J.L. (1993). *Sensitivity of tropical cyclone intensity to sea surface temperature*, Journal of climate, 6 :1133-1140
- Fabricius, E. & K.J. Gustafson (1958). *Some new observations on the spawning behavior of the pike, *Esox lucius* L.*, Rep. Inst. Freshwater Res. Drottningholm, 39: 23-54 (consulté mais non cité dans le texte)
- Filion L., Payette S. & Gauthier (1985). *Analyse dendroclimatique d'un krummholtz à la limite des arbres, lac Bush, Québec nordique*, Géographie physique et Quaternaire, 39:221-226
- Finnan J.M., Burke J.I. & M.B. Jones(1997). *An evaluation of indices that describe the impact of ozone on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.)*, Atmospheric Environment, Vol 31(17):2685-2693 (consulté mais non cité dans le texte)
- Finnan J.M., Burke J.I. & M.B. Jones(1996). *A time concentration study on the effects of ozone on spring wheat (*Triticum aestivum* L.). 2. A comparison of indices*, Agricultural Ecosystems Environment, 15:169-177 (consulté mais non cité dans le texte)
- Fortier, L. (1993). *Des morues et des hommes, enquête sur un désastre*, Interface, no 15, Vol. 3: 22-39 (consulté mais non cité dans le texte)
- Fortin R., Dumont P. & S. Guénette (1996). *Determinants of growth and body condition of lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*)*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 53:1150-1156
- Fortin R., Léveillé M., Guénette S. & P. Laramée (1992) , *Contrôle hydrodynamique de l'avalaison des œufs et des larves de poulamon atlantique (*Microgadus tomcod*) sous le couvert de glace de la rivière Ste-Anne, Québec*, Aquat. Living Resour., 5:127-136
- Fortin, R., Léveillé M., Laramée P. & Y. Mailhot (1989). *Reproduction and year-class strength of the atlantic tomcod (*Microgadus tomcod*) in the Sainte-Anne River, at La Pérade, Québec*, Can. J. Zool., 68: 1351-1359
- Fortin, R., Dumont P., Fournier H., Cadieux C. & D. Villeneuve (1982). *Reproduction et forces des classes d'âge du Grand Brochet (*Esox lucius* L.) dans le Haut-Richelieu et la baie Missisquoi*, Can. J. Zool., 60: 227-240.

- Franklin, D. & L. Smith (1963). *Early life history of the northern pike, Asox Lucius L., with special reference to the factors influencing the numerical strength of year-classes*, Trans. Am. Fish. Soc, 2: 91-110 (consulté mais non cité dans le texte)
- Fréchet A. (1990), *Catchability variations of cod in the marginal ice zone*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 47 :1678-1683
- Frenette M., Barbeau C. & J.L. Vérette (1989). *Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-Laurent*, Hydrotech Inc. pour Environnement Canada et le Gouvernement du Québec
- Frère Marie-Victorin (1943). *Observation botaniques sur les effets d'une exceptionnelle baisse de niveau du Saint-Laurent durant l'été de 1931*, Naturaliste canadien, 70:160-170.
- Fuhrer J.(1993). *Characterization of ozone exposure. In: Effects of air pollution on agricultural crops in Europe*, Eds Jager H.J, Unsworth M., De Temmerman L. & P. Mathy, 151-162, CEC Air pollution Research report 46, Brussels (consulté mais non cité dans le texte)
- Fujita T.T. (1973). *Tornadoes around the world*, Weatherwise, vol 26(3):58-60
- Gagnon M. (1997). *Bilan régional Gaspésie-Sud-Baie des Chaleurs, Zone d'intervention prioritaire 20*, Environnement Canada, Région du Québec, 84 pp
- Gaudette M. (1994). *Rapport sur la tornade survenue à Aylmer le jeudi 4 août 1994*, Rapport interne, Environnement Canada, Centre météorologique du Québec, 8 pp
- Gauthier, J. & Y. Aubry (1995). *Les Oiseaux nicheurs du Québec : Atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional*, Eds : Association québécoise des groupes d'ornithologues, Société québécoise de protection des oiseaux, Service Canadien de la Faune, Environnement Canada, xviii + 1295 pp
- Gilbert D. & B. Pettigrew (1997), *Interannual variability (1948-1994) of the CIL core temperature in the Gulf of St.Lawrence*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 54(supp.1) :57-67
- Gilbert D. & B. Pettigrew (1996). *Variation de la couche froide ointermédiaire du golfe du Saint-Laurent de 1948 à 1995*, Le naturaliste canadien. Vol 120(2): 69-71.
- Gilbert M. (1996). *Mortalités de sébastes dans la région de la baie des Ha ! Ha !, fjord du Saguenay : choc thermique*, Le naturaliste Canadien. Vol 120(1): 61-63.
- Gilbert M. & C.M. Couillard (1995). *Observations de mortalités de sébastes (Sebastes sp.) dans la région de la baie des Ha ! Ha !, fjord du Saguenay : examen des causes possibles*, Rapp. Manus. Can. Sci. Halieut. Aquat., 2278 : iv + 15 p.
- Giorgi F. (1990). *Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model*, Journal of Climate, 3 :941-963

Goldberg, M. S. (1996). *Particulate air pollution and daily mortality: who is at risk?* Journal of aerosol medicine, vol. 9(1): 43-53

Gouvernement du Québec (1996a). *État d'avancement des mesures et bilan des émissions de gaz à effet de serre - Plan d'action québécois de mise en œuvre de la Convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques*, Rapport conjoint des Ministères de l'Environnement et de la Faune du Québec et des Ressources naturelles, Rendu public le 1^{er} novembre 1996, ISBN 2-550-31018-7, 37 pp

Gouvernement du Québec (1996b). *Biodiversité du milieu forestier - Bilan et engagements du ministère des Ressources naturelles*, Ministère des Ressources naturelles, Québec, 152 pp

Gouvernement du Québec (1995). *Le Québec Statistique*, Les Publications du Québec, 60^e édition

Gouvernement du Québec (1989). *Le défi du Saint-Laurent - Projet de mise en valeur*, Rapports du Comité directeur commandé par les Ministères de l'Environnement et des Transports : Technique (480 pp), Sommaire et recommandations (140 pp) et Atlas St-Laurent

Garfinkel H.L. & L.B. Brubaker (1980). *Modern climate - tree growth relationship and climatic reconstruction in subarctic Alaska*, Nature, 286: 872-874

Gratton L. & C. Dubreuil (1990). *Portrait de la végétation et de la flore du Saint-Laurent*, Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la conservation et du patrimoine écologique

Green C. (1993). *The economic impact of global warming on Quebec*, Le Climat, 11 (spécial) :4-18

Grenier A. (1991). *Évaluation et raffinement de la cartographie de l'utilisation riveraine des terres de Cornwall à Tadoussac effectuée à l'aide des images TM géocodées*, Préparé pour Environnement Canada, Centre Saint-Laurent

Guenette S., Mailhot Y., McQuinn I., Lamoureux P. & R. Fortin (1994). *Paramètres biologiques, exploitation commerciale et modélisation de la population de la Perchaude (Perca Flavescens) du lac Saint-Pierre, Québec*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction régionale des Bois-Francs et Université du Québec à Montréal

Gullett D.W. & W.R. Skinner (1992). *L'état du climat au Canada : les variations de température au Canada 1895-1991*, Rapport sur l'état de l'environnement no 92-2, Environnement Canada, 36 pp

Haarsma R.J., Mitchell J.F.B. & C.A. Senior(1993). *Tropical disturbances in a GCM*, Climate Dynamics, 8 :247-257

Hall N.M.J., Hoskins B.J., Valdes P.J. & C.A. Senior (1994). *Storm Tracks in a High Resolution GCM with Doubled CO₂*, *Quarterly Journal of the Royal Met. Society*, 120 : 1209-1230

Hänninen H. (1991). *Does climate warming increase the risk of frost damage in northern trees?*, Plant, Cell and Environment, 14:449-454 (consulté mais non cité dans le texte)

Hansen J., Russell G., Rind D., Stone P., Lacis A., Lebedeff S., Ruedy R. & L. Travis (1983). *Efficient three-dimensional global models for climate studies: Models I and II*, Monthly Weather Review, 111: 609-662

Harmon M.E., Ferrell W.K. & J.E. Franklin (1990). *Effects on carbon storage of conversion of old-growth forests to young forests*, Science, 247:699-702

Harvey G. (1996). *Les impacts de la gestion des niveaux d'eau sur la faune aquatique*, Présentation au 21^e congrès de l'Association des biologistes du Québec, 31 oct au 2 novembre 1996, Québec

Heath L.S., Kauppi P.E., Burschel P., Gregor H.D., Guderlan R., Kohlmaier G.H., Lorenz S., Overdieck D., Scholz F., Thomasius H. & M. Weber (1993). *Contribution of temperate forests to the world's carbon budget*, Water, Air and Soil Pollution, 70:55-69

Heck W.W., Adams R.M., Cure W.W., Heagle A.S., Heggstad H.E., Kohut R.J., Kress L.W., Rawlings J.O. & O.C. Taylor(1983). *A reassessment of crop loss from ozone*, Environmental Science Technology, 12:572-581A (consulté mais non cité dans le texte)

Held I.M. (1993). *Large-scale dynamics and global warming*, Bull. Of American Meteo. Society, 74(2) :228-241

Hendrickson O.Q. (1990). *How does forestry influence atmospheric carbon?* Forestry Chronicle, 66:469-472

Hengeveld H. (1995). *Comprendre l'atmosphère en évolution - Revue de la science de base et des implications d'un changement du climat et d'un appauvrissement de la couche d'ozone*, Deuxième édition, Rapport sur l'état de l'environnement no 95-2, Environnement Canada, 71 pp

Hogg W. (1997), *Communication personnelle*, Direction de l'Environnement Atmosphérique, Environnement Canada, Downsview, Ontario

Hogg I.A., Eadie J.M. & Y. deLafontaine (sous presse). *Atmospheric change and the diversity of aquatic invertebrates: are we missing the boat?* Environmental Monitoring et Assessment (consulté mais non cité dans le texte)

Holdridge L.R. (1947). *Determination of world plant formations from simple climatic data*, Science, 105 :367-368

Houle G. (1992). *The reproductive ecology of Abies balsamea, Acer saccharum and Betula alleghaniensis in the Tantaré Ecological Reserve, Québec*, Journal of Ecology, 80: 611-623.

Houle G. & F. Bouchard (1990). *Hackberry (Celtis occidentalis) at the northeastern limit of its distribution in North America: Population structure and radial growth patterns*, Canadian journal of Botany, 68: 2685-2692.

Hunt H.W., Trlica M.J., Redente E.F., Moore J.C., Dentling J.K., Kittel T.G.F. Walter D.E., Fowler M.C., Klein D.A. & E.T. Elliot (1991). *Simulation model for the effects of climate change on temperate grassland ecosystems*, Ecological Modelling, 53:205-246

Hudon C. (1997). *Impacts of water-level fluctuations on St-Lawrence river aquatic vegetation*, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 29 pages + annexes.

Hudon C. & A. Armellin (1995). *Addition du critère "Intégrité des écosystèmes naturels" dans la régularisation du niveau dans le Bassin Saint-Laurent-Grands Lacs*, Sommaire de la présentation faite par Environnement Canada (région du Québec) à la séance publique du Conseil International de Contrôle du fleuve Saint-Laurent, Marché Bonsecours, 6 pp

Hudon, C. & P. Fradette (1993). *Wind-included advection of larval decapods into Baie de Plaisance (Îles de la Madeleine, Québec)*, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, vol. 50: 1452-1434.

Hudon C., Legendre P., Lavoie A., Dubois J.M. & G. Vigeant (1991). *Effets du climat et de l'hydrologie sur le recrutement du homard américain (Homarus americanus) dans le nord du golfe du Saint-Laurent*, Dans : Le golfe du Saint-Laurent : petit océan ou grand estuaire ? Editions J.C. Therriault, Publication spéciale, Can. Sci. Halieut. Aquat., 113 :161-177

Hydro-Québec (1997). *Informations générales*, Site internet Hydro-Québec

ICF Incorporated (1987). *Potential impacts of climate on electric utilities*, Report prepared for New-York State Energy Research and Development Authority, Edison Electric Institute and U.S. Environmental Protection Agency. Albany : New-York State State Energy Research and Development

Idso S.B., Balling R.C. & R.S. Cerveny (1990). *Carbon dioxide and hurricanes : implications of Northern Hemispheric warming for Atlantic/Caribbean storms*, Meteorology and Atmospheric physics, 42 :259-263

IPCC (1995a). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization, United Nations Environment Program, Geneva,

IPCC (1995b). *Climate change 1995: Impacts, adaptations and mitigations of climate change : scientific-technical analyses*, Contribution of working group II to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization, United Nations Environment Program, Geneva, 851 pp

IPCC (1994). *IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations*, Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization, United Nations Environment Program, Geneva

Jackson I. (1992). *Global Warming : implications for Canadian policy*, Climate Change Digest CCD 92-01, Environment Canada, Downsview, Ontario, 17 pp

Jacoby G.C. & R.D. D'Arrigo (1995). *Tree ring width and density and evidence of climatic and potential forest change in Alaska*, Global Biogeochemical cycles, 9:227-234

Jacoby G.C. Jr., Cook E.R. & L.D. Ulan (1985). *Reconstructed summer degree day in central Alaska and northwestern Canada since 1524*, Quaternary research, 23: 18-26

Jarvis P.G. (1989). *Atmospheric carbon dioxide and forests*, Philosophical transactions of the Royal Society of London, B, vol 324: 369-392

Jean M & A. Bouchard (1996). *Tree-ring analysis of wetlands of the upper St.Lawrence River, Québec : response to hydrology and climate*. Can. J. For. Res., 26 : 482-491

Jean M., D'Aoust M., Gratton L. & A. Bouchard (1992). *Impacts of water level fluctuations on wetlands : Lake St-Louis case study*, Presented at the International Joint Commission Water Levels Reference study, July 1992

Jean M. & A. Bouchard (1991). *Temporal changes in wetland landscapes of a section of the St.Lawrence River, Canada*, Environ. Manag., 15 :241-250

Jean M. (1990). *Conséquence d'un changement climatique sur le système du Saint-Laurent: éléments d'une problématique*, Le Climat 8 (1): 49-74

Jendritzky G. (1992). *Selected questions of topical interest in human biometeorology, International journal of biometeorology*, Heidelberg, vol 35(3): 139-150.

Jones P.D. (1988). *Hemispheric surface air temperature variations: recent trends and an update to 1987*, Journal of Climate, 1:654-660

Johnson G. (1996). *Statistiques de pêche commerciale de 1986 à 1995*, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

Johnson A.H., Cook E.R. & T.G. Siccama (1988). *Climate and red spruce growth and decline in the northern Appalachians*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 85:5369-5373

Jourdain, A., Auclair M.-J., Paquin J. & D. Gingras (1994). *Synthèse et analyse des connaissances sur les aspects socio-économiques du lac Saint-Louis*. Rapport technique, Zone d'Intervention prioritaire 5 et 6, Environnement Canada, Centre Saint-Laurent, 89 p.

Joyce L.A., Fosberg M.A. & J.M. Comanor (1990). *Climate change and America's forests*, U.S.D.A. Forest Service, Fort Collins, Colorado, General Technical Report RM-187, 12 pp

Kalkstein L.S., Nichols M.C., Barthel C.D. & J.S. Greene(1996), *A new spatial synoptic classification: application to air-mass analysis*, 16:983-1004

Kalkstein, L. S. & K. E. Smoyer (1993). *The Impact of climate on canadian mortality: present relationships and future scenarios*, Canadian Climate Program, report n° 93-7, 50 pp

Karl T.R., Knight R.W., Easterling D.R. & R.G. Quayle (1996). *Indices of climate change for the United States*, Bull. Of American Meteo. Society, 77(2) :279-292

Karl T.R. (1986). *The sensitivity of the Palmer Drought severity index and Palmer's Z-index to their calibration coefficient including potential evapotranspiration*, Journal of Climate and Applied Meteorology, 25 :77-86

Karnosky D.F., Berrang P.C., Sholz F. & J.P. Bennett (1989). *Variation in a natural selection for air pollution tolerances in trees. Genetic effects of air pollutants in forest tree populations*, Berlin, Springer-Verlag, 29-38 (consulté mais non cité dans le texte)

- Kauppi P. & M. Posch (1988). *A case study of the effects of CO₂-induced climate warming on forest growth and the forest sector: A. Productivity reactions of northern boreal forest*, Dans: PARY, M.L., T.R. CARTER et N.T. KONIJIN, [éditeur]. The impact of climatic variations on agriculture. Kluwer academic publisher, Dordrecht, p. 183-195
- Keddy P. A. & A. A. Reznicek (1986). *Great Lakes vegetation dynamics: the role of fluctuating water levels and buried seeds*, J. Great lakes res., 12: 25-36
- Keeling C.D., Chin J.F.S. & T.P. Whorf (1996). *Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements*, Nature, 382:146-149
- Kelly P.M. & P.D. Jones (1996), *The spatial response of the climate system to explosive eruptions*, Journal of International Climatology, 16:537-550
- Kozlowski T.T., Kramer P.J. & S.G. Pallardy (1991). *The physiological ecology of woody plants*, San Diego, California, Academic Press, 657 pp
- Kramer P.J. (1981). *Carbon dioxide concentration, photosynthesis and dry matter production*, BioScience, 31:29-33
- Kreutzweiser R.D. (1988). *Municipal land use regulation and the Great Lakes shoreline hazard in Ontario*, J. Great Lakes Res., 14:152-147
- Kurz W.A. & M.J. Apps (1993). *Contribution of northern forests to the global Carbon cycle : Canada as a case study*, Water, Air and Soil Pollution, 70 :163-176
- Kurz W.A., Apps M.J., Webb T.M. & P.J. McNamee (1992). *The carbon budget of the Canadian forest sector, Phase I*, For. Can. Northwest Reg., Edmonton, Alberta, Inf. Report, NOR-X-326, 93
- Labrecque B. (1994). *Analyse des zéros des cartes et des lignes des hautes eaux utilisés sur le fleuve Saint-Laurent entre Montréal et le lac Saint-Pierre*, Service hydrologique du Canada, Région du Québec, 26 pp
- Lachance D. (1990). *Atelier sur les prospectives climatiques en foresterie*, Le Climat, numéro spécial, (ACFAS-ACLIQ) octobre: 42-46
- Lachapelle Y. & J.P. Martel (1990). *Effet de serre : le secteur forestier fait-il face à un front chaud ?* Le Climat, numéro spécial, (ACFAS-ACLIQ) octobre: 23-32
- Lacroix J. (1997). *L'impact du climat sur la population*, Actes du colloque, Association canadienne-française sur l'avancement des sciences, juin 1995, Chicoutimi, 113-128
- Lacroix J. (1997), *Communication personnelle*, Direction Générale de la Sécurité Publique, Gouvernement du Québec, Québec
- Lacroix J. & D.J. Boivin (1992). *Étude du phénomène de sécheresse en tant que catastrophe naturelle ; une évaluation en matière de protection civile et de vulnérabilité municipale*, La Météorologie, 41 :16-27

Lacroix J. & D.J. Boivin (1991a). *Étude du phénomène des tempêtes de neige en tant que catastrophe naturelle: une évaluation en matière de protection civile et de vulnérabilité municipale*, Université de Sherbrooke, Département de géographie et de télédétection, Bulletin de recherche no 102, ISSN 0710-0868, 67 pp

Lacroix J. & D.J. Boivin (1991b). *Étude du phénomène de pluies diluviennes en tant que catastrophe naturelle: une évaluation en matière de protection civile et de vulnérabilité municipale*, Cahiers du CRAD (Centre de recherches en Aménagement et en Développement), Volume 13, no 2, 85 pp

Lacroix J. & D.J. Boivin (1991c). *Étude du phénomène des vents violents au Québec en tant que catastrophe naturelle*, Bulletin climatologique, 25(2) :92-102

Lacroix J. & D.J. Boivin (1990). *Étude du phénomène des vagues de froid au Québec en tant que catastrophe naturelle*, Bulletin climatologique, 24(3) :138-157

Lacroix M.J. (1991). *Mon pays, ce n'est pas un pays...Quelques faits d'hiver et statistiques pour vous rafraîchir la mémoire !*, Le bel âge, novembre, 88-90

LaHaye M., Branchaud A., Gendron M., Verdon R. & R. Fortin (1992). *Reproduction, early life history, and characteristics of the spawning grounds of the lake sturgeon (Acipenser fulvescens) in Des Prairies and l'Assomption rivers, near Montréal, Québec*, Can. J. Zool., 70(9):1681-1689

LaHaye, M. & R. Fortin (1990). *Caractérisation de l'habitat de frai et l'habitat des juvéniles de l'esturgeon jaune (Acipenser fluvescens) dans la région de Montréal*, Rapport de recherche pour le Plan d'action Saint-Laurent, 81 pp

Lambert S.J. (1995). *The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths*, Journal of Climate, 8 :1447-1452

Lamothe, A.M. & G. Périard (1988). *Répercussions d'un changement climatique sur l'industrie du golf au Québec*, Rapport préparé pour Environnement Canada, 81 pp

Lamothe, A.M. & G. Périard (1987). *Prospective du changement climatique pour les ressources naturelles du Québec phase 1: l'industrie du ski alpin*, Rapport préparé pour Environnement Canada, 142 pp

Landry B. & M. Mercier (1983). *Notions de géologie*, 2^e édition, Modulo Éditeur, Outremont

Landsea C.W., Nicholls N., Gray W.M. & L.A. Avila (1996). *Downward trends in the frequency of intense Atlantic hurricanes during the past five decades*, Geo. Res. Letters, 23 :1697-1700

Lane, P. & Associates Ltd. (1988). *Preliminary Study of the Possible Impacts of One Metre Rise in Sea Level at Charlottetown, Prince Edward Island*. Climate Change Digest CCD 88-02. Environment Canada, Downsview, Ontario, 8 pp.

Langlois C., Lapierre L., Léveillé M, Turgeon P. & C. Ménard (1992). *Synthèse des connaissances sur les communautés biologiques du lac Saint-Pierre*, Environnement Canada, Rapport technique, Zone d'intervention prioritaire no 11

Lanzante J.R. (1996). *Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data : theory and examples, including applications to historical radiosonde station data*, International Journal of Climatology, 16 :1197-1226

Lapel Groupe-conseil (1989). *Conséquences du changement climatique sur le Saint-Laurent: évaluation potentielle des impacts physiques, biologiques, chimiques et sociaux*, Rapport présenté à Environnement Canada, Service de l'Environnement Atmosphérique, 79 pp

LaRue A., Grondin J., Lévesque B., LaRue R. & D. Boudreault (1996). *La baignade dans le secteur d'eau douce du Saint-Laurent : discours et pratique à propos des risques de santé*, Rapport Saint-Laurent Vision 2000, octobre, Centre de Santé publique de Québec et Direction générale de santé publique de la Montérégie (consulté mais non cité dans le texte)

Lasserre J.C. (1980). *Le Saint-Laurent, grande porte de l'Amérique*, Cahiers du Québec, Collection Géographie, Éditions Hurtubise HMH

Lavallée P. (1989). *La gestion des eaux usées en temps de pluie. L'impact sur le milieu récepteur des événements fréquents*. Thèse de doctorat. Présenté à l'Université du Québec. INRS-Eau, 196 pp + 5 annexes

Lavallée P., Shoiry P. & J.P. Villeneuve (1984). *Propagation longitudinale et latérale des eaux usées déversées en cours d'eau*, Sciences et techniques de l'eau, 17(4) :361-366,

Lavoie C. (1997), *Communication personnelle*

Lavoie C. (1994). *Méthode et suivi des changements climatiques dans les écosystèmes dans les écosystèmes forestiers et tourbeux du Québec*, Centre d'études nordiques, Université Laval, 89 pp

Lavoie C. & S. Payette (1994). *Recent fluctuations of the lichen-spruce forest limit in subarctic Quebec*, Journal of Ecology, 82 :725-734

Lavoie C. & S. Payette (1992). *Black spruce growth forms as a record of changing winter environment at treeline, Québec, Canada*, Arctic and Alpine Research, 24: 40-49

Lavoie J.G. & J. Talbot (1988). *Stratégies de reproduction des espèces de poissons frayant en eau douce au Québec*, Document interne, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 39 pp

Leclerc A. & L. Cartier (1951). *Étude des inondations, bassin de la rivière Sainte-Anne-de-la-Pérade*, Département des ressources hydrauliques, 82 pp

Leduc R., Ferland M., Gariépy J., Jacques G., Lelièvre C. & G. Paulin (1980). *Îlot de chaleur à Québec : cas d'été*, Boundary-layer meteorology, 19 :471-480

Lee E.H., Tingey D.T. & W.E. Hogsett (1988), *Evaluation of ozone exposure indices in exposure-response modeling*, Environmental Pollution, 53:43-62 (consulté mais non cité dans le texte)

Lefohn A.S. & H.M. Benedict (1982), *Development of a mathematical index that describes ozone concentration, frequency and duration*, Atmospheric Environment, 16:2529-2532 (consulté mais non cité dans le texte)

Legendre P. & Y. Legendre (1984). *Postglacial dispersal of freshwater fishes in the Quebec Peninsula*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 41:1781-1802 (consulté mais non cité dans le texte)

Lemay A.B. (1997). *Analyse descriptive des milieux caractérisant les espèces menacées et vulnérables au Québec*, Pour le ministère de l'Environnement du Québec (consulté mais non cité dans le texte)

Lemieux R. (1993). *Écosystèmes et habitats*, Présentation au colloque « Adaptation aux contraintes climatiques des aspects socio-économiques et environnementaux du bassin du Saint-Laurent : un plan d'action », Association de Climatologie du Québec, UQAM, mai 1993

Lehoux D. (1996). *Restauration naturelle des rives du Saint-Laurent entre Cornwall et l'île d'Orléans. Guide d'interventions*, Environnement Canada, Service Canadien de la Faune, Ministère des transports du Québec, Société d'énergie de la baie James, Canards Illimités Canada et Les Consultants en environnement ARGUS inc

Les Affaires (1997). *Le Saint-Laurent : le port de Montréal consolide son leadership dans le trafic des conteneurs*. Samedi 26 juillet, page 21.

Lewis J.P. & I.E. MacSwain (1996). *A temperature-precipitation departure index as an indicator of climate variability - a case study of the maritime provinces of Canada*, Report MAES 1-96, Environment Canada, 17 pp

Lighthill J., Holland G., Gray W.M., Landsea C., Craig G., Evans J., Kurihara Y. & C. Guard (1994). *Global climate change and tropical cyclones*, Bull. Of American Meteorological Society, 75(11) :2147-2157

Loring D.H. & D.J. Nota (1973). *Morphology and sediments of the Gulf of St. Lawrence*, Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada, no 182 (consulté mais non cité dans le texte)

Lovrich G.A., Sainte-Marie B. & B.D. Smith (1995), *Depth distribution and seasonal movements of Chionocetes opilio (Brachyura : Majidae) in Baie Sainte-Marguerite, Gulf of St. Lawrence*, Can. J. Zool., 73 :1712 -1726 (consulté mais non cité dans le texte)

Lough J.M. (1997). *Regional indices of climate variation : temperature and rainfall in Queensland, Australia*, International Journal of Climatology, 17 :55-66

Lüdeke M.K.B., Dönges S., Otto R.D., Kindermann J. Badeck F.W., Ramge P., Jäkel U. & G.H. Kohlmaier (1995). *Responses in net primary production and carbon stores of the northern biomes to a CO₂-induced climatic change, as evaluated by the Frankfurt Biosphere Model (FBM)*. Tellus, 47B:191-205 (consulté mais non cité dans le texte)

Lunardini V. (1981). *Heat transfer in cold climates*, New York, Van Nostrand Reinhold, 731 pp

MacCracken M.S. & F.M. Luther (1985). *Projecting the effects of increasing carbon dioxide*, U.S. Department of Energy, Washington

- Mailhot Y. (1990). *Les pêcheries sportive et commerciale du fleuve Saint-Laurent en eau douce : gestion, récolte et rendement*, ABQ 1990 - Symposium sur le fleuve Saint-Laurent, Compte-rendu de conférence, 3 au 5 novembre 1989, Édités par Messier D., Legendre P. & C.E. Delisle, vol 11, Collection Environnement et Géologie, Université de Montréal, 427-443
- Mailhot Y. (1989). *Communication personnelle*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la pêche, Région de Trois-Rivières
- Mailhot, Y., Scrosati J. & D. Bourdeau (1988). *La population du poulamon atlantique de la Pérade: bilan, état de la situation actuelle en 1988 et nouveaux aspects de l'écologie de l'espèce*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la pêche, Direction régionale de Trois-Rivières, 77 pp
- Malcolm J.R. & A. Markham (1996). *Ecosystem resilience, biodiversity and climatic change: setting limits*, Parks, 6:38-49 (consulté mais non cité dans le texte)
- Manabe R.J., Spelman M.J. & J.J. Stouffer (1992). *Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂. Part II: Seasonal response*, Journal of Climate, 5:105-126
- Manabe S., Stouffer R.J., Spelman M.J. & K. Bryan (1991). *Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of Atmospheric CO₂. Part I: Annual mean response*, Journal of Climate, 4:785-818
- MAPAQ (1993). *Pêches et aquiculture commerciales. Bilan 1992 et perspectives*, Service des analyses et politiques, Québec
- Martec Limited (1987). *Effects of a one metre rise in mean sea level at Saint John, New Brunswick and the lower reaches of the Saint John River*, Climate Change Digest, CCD 87-04, Canadian Climate Centre, Downsview
- Massé G. & P. Dumont (1993). *Survie œufs-juvéniles et force des classes d'âge des grands brochets (Exos lucius L.) de la rivière des Pins, près de Montréal, Québec*, Can. J. Zool., 71:368-375
- Massé, G., Dumont P., Ferraris J. & R. Fortin (1991). *Influence des régimes hydrologiques et thermiques de la rivière des Pins (Québec) sur les migrations de fraie du grand brochet et sur l'avalaison des jeunes brochets de l'année*, Aquat. Living Resour., 4: 275-287
- Massé G., Fortin R., Dumont P. & J.Ferraris (1988). *Étude et aménagement de la frayère multispécifique de la Rivière aux Pins et dynamique de la population du Grand Brochet, Esox Lucius L., du fleuve Saint-Laurent, Boucherville, Québec*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction régionale de Montréal, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune, Rapport technique no 06-40, 224 pp
- Masterton J.M. & F.A. Richardson (1979). *Humidex, a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity*, Atmospheric Environment Service, Downsview, CLI 1-79, 45 pp

McBean G.A., Slaymaker O., Northcote T., LeBlond P. & T.S. Parsons (1992). *Review of Models for Climate Change and Impacts on Hydrology, Coastal Currents and Fisheries in B.C.*, Climate Change Digest 92-02, Environment Canada

McCabe C. (1995). *Winter disruption in metropolitan Toronto : Climate change and the effects on snow maintenance programs*, Unpublished BES thesis, Department of Geography, University of Waterloo, 60 pp

McCoy C. (1993). *A study on how sensitive sand and salt use is to weather on highways situated around the towns of Wiarton and Owen Sound*, Unpublished BES thesis, Department of Geography, University of Waterloo, 38 pp

McGillivray D. & G. McKay (1993). *Scoping study for the Great Lakes-St.Lawrence river basin Pilot Project on responses to the impacts of climate change*, Final report, MEP Inc.

McGregor J.(1993), *Refugees and the Environment*, In: Geography and refugees: patterns and processes of change, Black, Richard and Vaughan Robinson Eds., New York: Halsted Press

Meadows G.A., Meadows L.A., Wood W.L., Hubertz J.M. & M. Perlin (1997). *The relationship between Great Lakes water levels, wave energies and shoreline damage*, Bulletin of the American Meteorological Society, vol 78(4): 675-683

Meisner J.D. (1990). *Effect of climatic warming on the southern margins of the native range of brook trout, Salvelinus Fontinalis*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 47:1065-1070

Melillo J.M., McGuire A.D, Kicklighter D.W., Moore III B., Vorosmarty C.J. & A.L. Schloss (1993). *Global climate change and terrestrial net primary production*, Nature, 363:234-240

Melillo J.M, Callaghan T.V., Woodward F.I., Salati E. & S.K. Sinha (1990). *Effects on ecosystems*, Dans: Climate change. The IPCC scientific assessment, Great Britain, Cambridge University Press, 283-310

Mende J.I. (1982). *An analysis of snowstorm related accidents in Metropolitan Toronto*, Unpublished M. Eng. Thesis, Civil Engineering Department, University of Toronto, Ontario

Mercier O. (1993). *Adaptations aux changements climatiques : écosystèmes et habitats du bassin du Saint-Laurent (Cornwall-Québec)*, Le Climat, 11(spécial) :46-95

Météoglobe Canada (1989). *Conséquence des scénarios de changement climatique sur les infrastructures liées à la production d'hydro-électricité au Québec*, Préparé pour le Service de l'environnement atmosphérique, Environnement Canada. 147 pp

Michel B. (1976). *Les problèmes de glace du Saint-Laurent*, L'ingénieur, 312 :28-33

Miller, T.R. (1988). *Impacts of Global Climate Change on Metropolitan Infrastructure*, Proceedings - Second North American Conference on Preparing for Climate Change, Washington, 366-388.

Milton J. (1995). *Inondations en 1994 au Québec: les facteurs climatiques*, Préparé par Environnement Canada, Région du Québec, pour la Protection Civile du Canada, 26 pp + figures et annexes

Ministère des Affaires municipales (1995). *Répertoire des municipalités du Québec - 1995*, Les Publications du Québec

Ministère des Pêches et des Océans (1995). *Les pêches maritimes au Québec*, Revue statistique annuelle, 1993-1994

MLCP - Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec (1993). *Considérations fauniques pertinentes à l'étude sur les niveaux d'eau du bassin du fleuve Saint-Laurent et des Grands Lacs*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, 40 pp

MLCP - Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec (1988). *Volet : Pêche, chasse et piégeage*, Rapport présenté au Groupe de travail Dagenais sur le projet de mise en valeur du Saint-Laurent

MLCP - Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec (1987a). *Importance de la pêche sportive au lac Saint-Pierre en 1986*, Direction régionale de Trois-Rivières, Service de l'aménagement et de la faune, Document produit dans le cadre du plan de développement de la pêche au lac Saint-Pierre, 12 pp

MLCP - Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec (1987b). *Répertoire des marinas, quais pour petites embarcations et rampes de mise à l'eau*, Gouvernement du Québec

Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec et Ministère des Pêches et des Océans (1985). *La pêche récréative au Québec en 1985*

Ministère des Pêches et des Océans (1996). *Marine Environmental Assessment of the Gulf of St. Lawrence and estuary*, Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci (sous presse)

Minns C.K., Rendall R.G., Chadwick E.M.P., Moore J.E. & R. Green (1995). *Potential impact of climate change on the habitat and population dynamics of juvenile Atlantic Salmon (Salmo salar) in Eastern Canada*, In : R.J. Beamish (ed), Climate change and northern fish population, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., 699-708

Miranda, P. (1993). *Climat et santé*, Le Climat, vol. 11, numéro spécial, p. 19-45

Mongeau J.R. (1979). *Recensement des poissons du lac Saint-François - comtés de Huntingdon et Vaudreuil-Soulanges. Pêche sportive et commerciale, ensemencements de maskinongés 1963 à 1977*, Ministère du Tourisme, de la Chasse et de la Pêche, Rapport technique no 06-25 (consulté mais non cité dans le texte)

Moreno, R.A., Skea, J., Gacuhi, A., Greene, D.L., Moomaw, W., Okita, T., Riedacker, A., Lien, T.V., Ball, R., Breed, W.S., & E. Hillsman (1996). *Industry, Energy and Transportation: Impacts and Adaptation*, in R.T. Watson, M.C. Zinyowera and R.H. Moss (eds.), Climate Change 1995 Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses - Intergovernmental Panel on Climate Change Second Assessment Report, Cambridge.

Monserud R.A., Tchebakova N.M. & R. Leemans (1993). *Global vegetation change predicted by the modified Budyko model*, Climatic change, 25 :59-83

Morin G. & M. Slivitzky (1992). *Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique: le cas de la rivière Moisie*, Revue des sciences de l'eau, 5:179-195

Morin A. & S. Payette (1984). *Expansion récente du mélèze à la limite des forêts (Québec nordique)*, Canadian journal of Botany, 62: 1404-1408

Morneau F., Lambert D., St-Georges M., Desgranges J.L. & J. Milton (1997). *Évaluation de la variabilité des oiseaux nicheurs du Québec au changement climatique*, Poster présenté au Symposium binational sur l'adaptation aux impacts du changement et de la variabilité climatique dans le bassin des Grands lacs et du Saint-Laurent, 13 au 15 mai 1997, Toronto, Ontario

Morrison I.K., Foster N.W. & P.W. Hazlett (1993). *Carbon reserves, carbon cycling and harvesting effects in three mature forest types in Canada*, New Zealand Journal of Forestry science, 23(3):403-412

Morstch L.D. & F.H. Quinn (1996). *Climate change scenarios for Great Lakes Basin ecosystem studies*, Limnol. Oceanogr., 41(5) :903-911

Myers N.(1993). *Environmental refugees in a globally warmed world*, BioScience, 43(11):752-761

Mysak L.A. (1993). *Variabilité et changement climatiques et les aménagements hydroélectriques dans le nord du Québec*, Dossier synthèse no 1. Évaluation environnementale du projet Grande Baleine. 98 pp

Mysak L.A., Kanak D.K. & R.F. Marsden (1990). *Sea-ice anomalies observed in the Greenland and Labrador seas during 1901-1984 and their relation to an interdecadal Arctic climate cycle*, Climate dynamics, 5:111-133

Neilson R.P. (1995). *A model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance*, Ecological Applications, 5:362-385

Newark M.J. (1983). *Tornadoes in Canada for the period 1950 to 1979*, Environment Canada, CLI-2-83, 88 pp

Newark M.J. (1977). *Tornadoes in Ontario before 1900*, Ontario History, vol 69(4) :257-276

Nilo, P., Dumont P. & R. Fortin (1996). *Climatic and hydrological determinants of year-class strenght of St.Lawrence River lake sturgeon*, Can. J. Fish. Aquat Sci., 54:774-780.

Nix, F.P. (1995). *Transportation In Canada: A Statistical Overview*. Ottawa: Transportation Association of Canada.

Nix, F.P., Boucher, M. & B. Hutchinson (1992). *Road Costs*, In Directions: The Final Report Of The Royal Commission On National Passenger Transportation - Volume 4, Ottawa, Ontario, 937-1058.

- Ordre des ingénieurs forestiers (1996). *Manuel de foresterie*, Édité par l'Université Laval
- Oshima R.J., Taylor O.C., Braegelmann P.K. & D.W. Baldwin (1975). *Effects of ozone on the yield and plant biomass of a commercial variety of tomato*, Journal of Environmental Quality, 4(4):463-464 (consulté mais non cité dans le texte)
- Ouellet P. (1997). *Characteristics and vertical distribution of Atlantic cod (Gadhus morhua) eggs in the northern Gulf of St. Lawrence, and the possible effect of cold water temperature on recruitment*, Can. J. Fish. Aquat. Sci., 54 :211-223
- Ouellette G. (1990). *Les ressources halieutiques du Saint-Laurent : problématique de conservation et de mise en valeur*, Dans : Symposium sur le Saint-Laurent, un fleuve à reconquérir, Collection environnement et géologie, volume 11, Université de Montréal
- Overpeck J.T., Rind D. & R. Goldberg (1990). *Climate-induced changes in forest disturbance and vegetation*, Nature, 343:51-53
- Owen G. & I. Wiles (1975). *Causes, consequences and control of excessive plant growths in lake St-Francis*, Rapport manuscrit du Ministère de l'environnement de l'Ontario, 34 pp
- Palmer W.C. (1965). *Meteorological drought*, Research paper 45, Washington, D.C., U.S. Weather Bureau
- Parent R. (1997). *Une richesse trop importante - Le PQ propose de rationaliser l'eau*, Le Journal de Montréal, 23 août 1997
- Parker D.E., Wilson H., Jones P.D., Christy J.R. & C.K Folland (1996). *The impact of Mount Pinatubo on world-wide temperatures*, Journal of International Climatology, 16:487-497 (consulté mais non cité dans le texte)
- Patoine A. (1983). *Étude de cas des tornades sur le nord-ouest québécois, le 19 août 1982*, Rapport interne, Environnement Canada, Centre météorologique du Québec, 13 pp
- Payette S., Fortin M-J. & C. Morneau (1996). *The recent sugar maple decline in southern Quebec : probable causes deduced from tree rings*, Canadian Journal of Forest Research, 26 :1069-1078
- Payette S. & A. Delwaide (1991). *Variations séculaires du niveau d'eau dans le bassin de la rivière Boniface (Québec nordique): une analyse dendroécologique*, Géographie physique et Quaternaire, 45: 59-67
- Payette S. Filion L. & A. Delwaide (1990a). *Disturbance regime of cold temperature forest as deduced from tree-ring patterns: The Tantaré ecological reserve, Québec*, Canadian Journal of Forest Research, 20: 1228-1241
- Payette S., Filion L. & P. Marin (1990b). *Sensibilité des conifères aux changements climatiques au Québec*, Préparé pour Environnement Canada, Contrat KM351-9-S102/01-XSD, 71 pp + annexes
- Payette S. & L. Filion (1985). *White spruce expansion at the tree line and recent climatic change*, Canadian journal of forest research, 15: 241-251

Payette S., Filion L., Gauthier L. & Y. Boutin (1985). *Secular climate change in old-growth tree line vegetation of northern Quebec*, Nature, 315 :135-138

Payette S. (1974). *Classification écologique des formes de croissance de Picea glauca (Moench) Voss et de Picea mariana (Mill.) BSP. en milieux subarctiques et subalpins*, Naturaliste canadien, 101: 893-903

Pêches et Océans (1995). *Les pêches maritimes du Québec - Revue statistique annuelle 1993-1994*, Direction de l'économique, de la statistique et de l'informatique, Division de la statistique et de l'informatique, Québec.

Pêches et Océans (1993). *Les pêches maritimes du Québec - Revue statistique annuelle 1991-1992*, Direction de l'économique, de la statistique et de l'informatique, Division de la statistique et de l'informatique, Québec.

Pêches et Océans (1992). *Les pêches maritimes du Québec - Revue statistique annuelle 1990-1991*, Direction de l'économique, de la statistique et de l'informatique, Division de la statistique et de l'informatique, Québec.

Peixoto J.P. & A.H. Oort (1992). *Physics of climate*, American Institute of physics, New York, 520 pp

Pépin R. (1997). *L'état des routes*, Québec Science, mai, 42-43

Perrier R.(1978). *Historique des inondations au Québec*, Compte-rendu du congrès conjoint AQTE-FACE du 14 au 17 mai 1978 - L'eau, une industrie, 34 pp

Peters R.L. (1990). *Effects of global warming on forests*, Forest Ecology and Management, 35:13-33

Pham, T.T. & S. Proulx (1996). *Caractérisation des biphényles polychlorés et des hydrocarbures aromatiques polycycliques dans les eaux de la station d'épuration de la Communauté urbaine de Montréal et dans le panache de son effluent dans le Saint-Laurent*, Environnement Canada - région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent, Rapport scientifique et technique ST-43, 96 pages.

Phillips D. (1984). *1985 Canadian Weather Trivia Calendar*, Environment Canada

Phillips D.W. & R.B. Crowe (1984). *Climate severity index for Canadians*, Environment Canada, Atmospheric Environment Service, CLI-1-84, 43 pp

Photosur Géomat Inc. (1991). *Cartographie de l'utilisation des sols de Cornwall à Tadoussac par télédétection*, Pour Environnement Canada, Centre St-Laurent

Pigamon Inc. (1996). *Appréciation sommaire des effets environnementaux des inondations de juillet 1996 au Saguenay*, Préparé pour Environnement Canada, Région du Québec, 69p.

Plamondon M. (1990). *Le sel de déglacage routier est-il un produit miracle ?*, Le Climat,8(2):95-97

- Plamondon M.(1979). *Étude des tempêtes de neige survenues dans la ville de Québec (1965-1975) et de leur incidence sur la circulation routière*, Thèse de maîtrise, Département de géographie, Université Laval, 262 pp
- Poirier R. (1997). *Communication personnelle - Données de gravité moyenne des feux de forêts*, Bureau des Services Météorologiques et Environnementaux, Environnement Canada, Québec
- Potvin C. & D. Tousignant (sous presse). *Evolutionary consequence of simulated global change: genetic adaptation or adaptive phenotypic plasticity*, Oecologia
- Potvin C. (1993). *Interactive effects of temperature and atmospheric CO2 on physiology and growth*, In : Plant responses to the gaseous environment. Eds : R.G. Alocher & A.R. Wellburn, Chapman & Hall, 39-53
- Pouliot L. (1991). *Prévision des indices forêt-météo*, Centre météorologique du Québec, Environnement Canada, 84 pp
- Powe N.N. (1969). *The climate of Montreal*, Climatological studies number 15, Department of Transport, Meteorological Branch, 51 pp
- Power G. (1989). *Salmonid communities in Quebec and Labrador : temperature relations and climate change*, Polskie archiwum Hydrologii, 37 :13-28
- Quayle R. & F. Doehring (1981). *Heat stress, a comparison of indices*, Weatherwise, 34(3) :120-124
- Ravelo A.C. & W.L. Decker (1979). *The probability distribution of a soil moisture index*, Agric. Meteor., 20 :301-312
- Read J.F. & W.J. Gould (1992). *Cooling and freshening of the subpolar North Atlantic Ocean since the 1960s*, Nature, 360 :55-57
- Richardson S. (1992), *Overview on Trade, Environment and Competitiveness*, National Round Table on the Environment and the Economy, 1992
- Rizzo B. & E. Wiken (1992). *Assessing the sensivity of Canada's ecosystems to climatic change*, Climatic change, 21: 37-55
- Robichaud A. (1997,en cours). *Les effets de la modification des niveaux d'eau du Saint-Laurent*, Rapport technique (version préliminaire), Rapport 1998 sur l'état du Saint-Laurent, Document de travail
- Robitaille J.A., Choinière L., Trecia G. & G. Verreault (1994). *Pêche sportive de l'Éperlan arc-en-ciel (Osmerus mordax) sur la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent en 1991*, Ministère de l'Environnement et de la Faune, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la Faune, Directions régionales de Québec et du Bas Saint-Laurent/Gaspésie/Iles de la Madeleine, Rapport technique, ix + 69 pp
- Robitaille L. (1982). *Mortalité des érables*, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la recherche, Terres et Forêts, 33 pp.

Robitaille J.A. & Y. Mailhot (1989). *Dynamique et statut des populations de poissons du Saint-Laurent: état des connaissances*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche du Québec, Direction de la gestion des espèces et des habitats, Direction régionale Mauricie, Bois-Francs, Rapp. Tech., 51 pp

Roche et associés Itée (1985a). *Rapport des études environnementales. Volume 2. Un milieu à connaître, Tome 1 - Milieu physique et biologique*, Étude d'impact présenté à la Direction Environnement d'Hydro-Québec. (consulté mais non cité dans le texte)

Roche et associés Itée (1985b). *Rapport des études environnementales. Volume 7. Dossier cartographique*, Étude d'impact pour Hydro-Québec, Direction Environnement. (consulté mais non cité dans le texte)

Rose D.W., Ek A.R. & K.L. Belli (1987). *A conceptual framework for assessing impacts of carbon dioxide change on forest industries*, In: Shands W.E. et J.S. Hoffman (Eds.). *The Greenhouse Effect, climate change and U.S. forests*, The Conservation foundation, Washington, D.C. 259-275

Russell G.L., Miller J.R. & D. Rind (1995). *A coupled atmosphere-ocean model for transient climate change studies*, *Atmosphere-Ocean*, 33 :683-730

Ryan B.F., Watterson I.G. & J.L. Evans (1992). *Tropical cyclone frequencies inferred from Gray's yearly genesis parameter. Validation of GCM tropical climates*, *Geophysical Research Letters*, 19(18) :1831-1834

Samuels J. (1989). *To salt or not to salt : what are the alternatives ?* *Civic Public Works*, 41(9) :12-20

Sanderson M.E., Choi T., Howe D.A., Marchand D.S. & P.K. Stoke (1985). *Socio-economic assessment of the implications of climatic change for futur water ressources in Great Lakes/St. Lawrence river system. Hydro-electric power generation and commercial navigation*, DSS Contract no. 02 SE.KM147-4-1414. 127 pp

Saporta R., Malcolm J. & D. L. Martell (1997). *The impact of climate change on Canadian Forests*, Canada Country Study on climate change impacts - sector chapter, (draft version)

Schaefer C.T., Smith J.N. & R. Côté (1990). *The Saguenay fjord: a major tributary to the St.Lawrence estuary*, Dans M.I. EL SABH et N. SILVERBERG [éditeur]. *Oceanography of a large-scale estuarine system. The St.Lawrence*. *Coastal and Estuarine Studies*, 39:378-420 (consulté mais non cité dans le texte)

Schimel D., Enting I.G. ,Heimann M., Wigley T.M.L., Raynaud R., Alves D. & U. Siegenthaler (1995). *CO₂ and the Carbon cycle*, Dans: *Climate change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, Great Britain, IPCC, Cambridge University Press, 35-71 (consulté mais non cité dans le texte)

Scott S., Vézina R. & M. Webb (1989). *Le fleuve Saint-Laurent : son économie et son environnement*, La fondation des Grands lacs, Toronto, Canada, 36 pp

Sécurité publique (1995). *Indemnités versées aux municipalités les plus touchées par les inondations entre 1974 et 1991*. Direction générale de la sécurité publique.

Sérodès J.B. (1980). *Étude de la sédimentation intertidale de l'estuaire moyen du Saint-Laurent*, Environnement Canada, DGEI, Région du Québec, 28 pp (consulté mais non cité dans le texte)

Shugart H.H., Antonovsky M.Y., Jarvis P.G. & A.P. Sanford (1986). *CO₂, climatic change and forest ecosystems*, In: Bolin B., Döös B.R., Jäeger J. et R.A. Warrick (Eds). The greenhouse effect, climatic change and ecosystems. John Wiley et Sons, New York, 521 pp

Singh B., El Maayar M., André P., Bryant C.R. & J.P. Thouez (1997). *Impacts of a GHG-induced climate change on crop yields : effects of acceleration in maturation, moisture stress and optimal temperature*, Climatic Change, 7 :1-36

Singh B., El Maayar M., André P., Thouez J.P., Bryant C. & D. Provençal (1995). *Influence d'un changement climatique dû à une hausse de gaz à effet de serre sur l'agriculture au Québec*, Atmosphère-Océan, 34 (2). 379-399

Singh, B. & R. B. Stewart (1991). *Potential impacts of a CO₂ - induced climate change using the GIS scenar on agriculture in Québec, Canada*, Agriculture, Ecosystem and Environment, 35 : 327-347

Singh B., Viau A. & M.P. David-Trudel (1990). *Potential impacts of climate change due to an effective doubling of atmospheric CO₂ on net basin supply and hydro-electric generation in Québec*, Departement of geography publication deries, occasional paper no 11, 247-257, University of Waterloo

Singh B. (1989). *Prospectives d'un changement climatique dû à un doublement de CO₂ atmosphérique pour la distribution forestière du Québec-Labrador*, Climatological bulletin, 23: 24-36

Singh B. (1987). *Prospectives d'un changement climatique dû à un doublement de CO₂ atmosphérique pour les ressources naturelles du Québec*, Rapport préparé pour le Service de l'Environnement Atmosphérique (région du Québec). Environnement Canada. 291 pp

Siple P. & C. Passel (1945). *Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures*, Proceedings of the American Philosophical Society, vol 89, no 1

Sirois L. (1995). *Initial phase of postfire forest regeneration in two lichen woodlands of northern Québec*, Ecoscience, 2(2) : 177-183.

Slivitzky M. (1997). *Les ressources , leurs usages et disponibilités et les variations climatiques*, Les défis des changements environnementaux à l'échelle planétaire, Colloque présenté dans le cadre du 63^{ième} congrès de l'ACFAS, Le Climat, vol 14 (2): 103-109

Slivitzky M. (1997). *Communication personnelle. Débits moyens annuels du Saint-Laurent à Cornwall (1861- 1995)*, Graphique.

Slivitzky M. (1993). *Water management: water supply and demand the St.-Lawrence*, Adapting to the impacts of climate change and variability. Dans L. Mortsch, G. Kosida et D. Taveres [éditeur], p 32-34

Slivitzky M., Cartier L. & A. Leclerc (1962). *Bassin de la rivière Bécancour : Inondation du 3 août 1957 (Région de Thetford-Mines)*, 2 volumes, Département des Ressources hydrauliques, Rapport 33-2, Gouvernement du Québec, 29 pp

Slivitzky M. & G. Morin (1996). *Impacts of climatic changes on the hydrological regime: The Moisie river case revised*, Canadian meteorological and Oceanographic Society, vol 24(4): 77-81

SLV2000-Santé (1996). *Reflets du Saint-Laurent - la parole aux riverains*, Saint-Laurent Vision 2000, volet Santé, 19 pp

Smith J.N. & R. Côté (1990). *The Saguenay fjord: a major tributary to the St.Lawrence estuary*, Dans M.I. EL SABH et N. SILVERBERG [éditeur]. *Oceanography of a large-scale estuarine system. The St.Lawrence*. Coastal and Estuarine Studies, 39:378-420 (consulté mais non cité dans le texte)

Smith T.M., Shugart H.H., Bonan G.B. & J.B. Smith (1992). *Modeling the potential response of vegetation to global climate change*, Advances in ecological research, 22: 93-116

SODES (1991). *Le Saint-Laurent, un géant économique*, Société de Développement économique du Saint-Laurent

Solomon A.M. (1992). *The nature and distribution of past, present and future boreal forest: Lesson for a research modeling agenda*, Dans: HUGART, H.H., R. LEEMANS et G.B. Bonan, [éditeur]. A systems analysis of the global boreal forest. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 291-307

Solomon A.M., Thorp M.L., West D.C., Taylor G.E., Webb J.W. & J.L. Trimble (1984). *Response of unmanaged forests to CO₂-induced climate change : available information, initial tests and data requirements*, U.S. Department of Energy, Report TR-009, Washington D.C.

SOPFEU (1997). *Informations sur les feux de forêts au Québec*, Service d'information, Gouvernement du Québec

Starfield A.M. & F.S. Chaplin III (1996). *A dynamic model of arctic and boreal vegetation change in response to global changes in climate and land use*, Ecological Applications, 6:842-864

Statistique Canada (1991). *Profil agricole du Québec*, Partie 1, Division de l'agriculture

Steadman R.G. (1971). *Indices of windchill of clothed persons*, Journal of Applied Meteorology, 10 :674-683

Stein O. & A. Hense (1994). *A reconstructed time series of the number of extreme low pressure events since 1880*, Meteorol. Zeitschrift, N.F. 3 :43-46

Stephenson N.L. (1990). *Climatic control of vegetation distribution: the role of water balance*, American Naturalist, 135:649-670 (consulté mais non cité dans le texte)

- Stewart J. & C. Potvin (1996). *Effects of elevated CO₂ on an artificial grassland community: competition, invasion and neighbourhood growth*, Functional Ecology, 10, 157-166
- Storch H.V. & A. Navarra (1995). *Analysis of climate variability : applications of statistical techniques*, Proceedings of an Autumn School organized by the Commission of the European Community, Springer, 335 pp
- Suffling R. (1995). *Can disturbance determine vegetation distribution during climate warming? A boreal test*, Journal of biogeography, 22:501-508
- Sulzman E.W., Poiani K.A. & T.G.F. Kittel (1995). *Modelling human-induced climatic change: a summary for environmental managers*, Environmental Management, 19:197-224 (consulté mais non cité dans le texte)
- Sutcliffe W.H. Jr (1973), *Correlations between seasonal river discharge and local landings of American lobster (Homarus americanus) and Atlantic halibut (Hypoglossus hipoglossus) in the Gulf of St. Lawrence*, J.Fish. Res. Board. Can, 30 :856-859
- Sweeney B.W., Jackson J.K., Newbold J.D. & D.H. Funk (1992). *Climate change and the life histories and biogeography of aquatic insects in eastern North America*, In: FIRTH P. et S.G. FISHER, éditeur. Global climate change and freshwater ecosystems, Springer-Verlag, New York, 321 pp (consulté mais non cité dans le texte)
- Taylor B. (1997). *Climate change scenarios for Canada. A user's guide for climate impact studies*, Environment Canada, Pacific and Yukon Region, Vancouver, British Columbia, 14 pp
- Terjung W.H. (1966). *Physiologic climates of the conterminous United States : a bioclimatic classification based on man*, Annals of the Association of American Geographers, 56 :141-179
- Therrien, J. Marquis H. & G. Shooner (1991). *Caractérisation des habitats recherchés pour la fraie des principales espèces de poissons du Fleuve Saint-Laurent (Cornwall à Montmagny)*. Rapport scientifique par le groupe Shooner pour le Centre Saint-Laurent, 16 pp (consulté mais non cité dans le texte)
- Thomas M.K. (1971). *A survey of the urban effect on the climates of Canadian cities*, Climate Documentation Sheet CDS no 11-71, Environment Canada, Downsview, 13 pp
- Tousignant, D. & C. Potvin (1996). *Selective responses to global change: Experimental results on Brassica juncea (L.) Czern*, Carbon dioxide, populations and communities, Academic Press Inc., 23-30
- Tremblay, A & P. Dumont (1990). *La pêche d'hiver dans la plaine du Saint-Laurent : portrait de l'activité et comparaison des techniques de pêche utilisées*, Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction régionale de Montréal, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune et Direction générale des espèces et des habitats, Service de la faune aquatique. Rapport de travaux, n° 06-06.
- Trewin B.C. & C.F. Trevitt (1996), *The development of composite temperature records*, Journal of International Climatology, 16:1227-1242 (consulté mais non cité dans le texte)

Troude J.P. & J.B. Sérodes (1988). *Le rôle des glaces dans le régime morpho-sédimentologique d'un estran de l'estuaire moyen du Saint-Laurent*, Canadian Journal of Civil Engineering, 15:348-354 (consulté mais non cité dans le texte)

Trueman M.E.H. (1970). *Montreal's Great snowstorm of 69*, Weatherwise, 270-273

U.S. Bureau of the Census (1991). *Statistical abstract of the United States, 1991, 11th edition*, The national Data Book, U.S. Department of commerce, Washington, DC.

Vaillancourt P. (1997). *Étude climatologique du temps violent estival 1981 - 1996*, Bureau des services météorologiques et environnementaux de Montréal, Environnement Canada, Région du Québec

Vaillancourt P. & M. Gaudette (1996). *Rapport de temps violent estival pour la saison 1995*, Note technique 96N-001, Environnement Canada, Région du Québec, 43 pp + annexes

Vaillancourt P. (1994). *Climatologie du temps violent estival au Québec 1981-1993*, Note technique 94N-002, Environnement Canada, Centre météorologique du Québec, 30 pp

Van Wagner C.E. (1987). *Élaboration et structure de la méthode canadienne de l'indice Forêt-Météo*, Environnement Canada, Service des forêts, Institut forestier national de Petawawa, No. Cat: 64-35/1987F, ISBN: 0-6762-99113-6

Van Wagner C.E. (1970). *Conversion of Williams' Severity rating for use with the fire weather index*, Service canadien des forêts, Ministère des Pêches et Forêts, Station expérimentale forestière de Petawawa, Rapport d'information PS-X-21

VEMAP (1995). *Vegetation/ecosystems modelling and analysis project: comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling*, Global Biogeochemical cycles, Vol 9:407-437

Verreault D. (1996). *Un regard critique sur l'état du Saint-Laurent vu sous l'angle du développement*, Présentation faite dans le cadre du 21^e congrès de l'Association des biologistes du Québec, 31 oct au 2 novembre 1996, Québec

Vigeant G. & G. Renaud (1997). *Les fluctuations climatiques du passé : leçons pour le futur*, Présentations faites aux Forums de Montréal (24 avril) et Québec (29 avril) sur les répercussions et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique, Dans le cadre de l'Étude pan-canadienne - chapitre québécois

Villeneuve J.P. & al. (1992). *La gestion dynamique des eaux de débordement de réseaux unitaires sur le territoire de la CUQ*, Eau du Québec et Sciences et techniques de l'eau, 25(3)

Villeneuve M. (1995). *La conservation des ressources génétiques dans les forêts du Québec*, Forest genetic resource conservation and management in Canada: Proceedings of a workshop, Toronto (Ontario). 15-18 novembre 1993, Petawawa Nat. For. Inst. Information Report, 62-73 (consulté mais non cité dans le texte)

- Vitousek P.M. (1994). *Beyond global warming: ecology and global change*, Ecology, 75(7):1861-1876
- Walsh G. & A. Bourgeois (1996). *Inondations de juillet 1996 au Québec : identification des impacts potentiels sur le milieu marin et les habitats d'eau douce dans les régions du Saguenay, de la Côte-Nord et de Charlevoix*, Ministère des Pêches et Océans, Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques, 2382
- Walsh J.E. (1993). *The elusive Arctic warming*, Nature, 361: 300-301
- Wang, B. & M. Allard (1995). *Recent climatic trend and thermal response of permafrost in Salluit, northern Québec, Canada*. Permafrost and Periglacial Process, 6 : 221-233
- Wang, Z. M., Lechowicz M.J. & C.Potvin (1994). *Early selection of Black Spruce seedlings and global change: wich genotypes should we favor?* Ecological applications, 4 (3) :604-616
- Waring R.H. & W.H. Schlesinger (1985). *Forest ecosystems: concepts and management*, Academic Press, Orlando, Florida, 340 pp
- Watson R.T., Rodhe H., Oeschger H. & U. Siegenthaler (1990). *Greenhouse gases and aerosols*, Dans: Climate change: the IPCC scientific assessment, Great Britain, Cambridge University Press, 1-40
- Williams, P.J. & M.W. Smith (1989). *The frozen earth: Fundamentals of geomorphology*, Cambridge: University Press, 306 pp
- Wood W.L., Woods R.W. & G.A. Meadows (1995). *The climatology of cyclones over the Great Lakes in relation to lake level change and wave climate*, Programs and abstracts of the 38th Conf. On Great Lakes Res., 22
- Wright S. (1978). *Evolution and the genetics of populations, Volume 4, Variability within and among natural populations*, University of Chicago Press, Chicago (consulté mais non cité dans le texte)
- Ye H. & J.R. Mather(1997), *Polar snow cover changes and global warming*, International Journal of Climatology, 17:155-162
- Zishka K.M. & P.J. Smith (1980). *The climatology of cyclones and anticyclones over North America and surrounding ocean environs for January and July, 1950-1977*, Mon. Wea. Rev., 108:387-401.
- Zuidema G., van den Born G.J., Alcamo J. & G.J. Kreileman (1994). *Simulating changes in the global land cover as affected by economic and climatic factors*, Water, Air and Soil pollution, 76:163-198 (consulté mais non cité dans le texte)

ANNEXE A. LISTE DES INONDATIONS IMPORTANTES AU QUÉBEC*

<u>Date</u>	<u>Type</u>	<u>Région touchée</u>	<u>Informations recueillies sur l'événement</u>	<u>Source</u>
1798		Trois-Rivières/Montréal	« considéré comme la pire dans la mémoire collective du temps » - peu d'informations sur cet événement	Environnement Canada(1990b)
14 avril 1861	Crue	Montréal	Le quart de Montréal est inondé. Les gens se retrouvent dans près de 2 mètres d'eau	Environnement Canada(1988)
12 avril 1865	Embâcle	Lac St-Pierre	Le niveau du fleuve monte de 3 à 4 m et inonde les régions de Sorel, Trois-Rivières et Berthier. 45 noyades	Environnement Canada(1987a, 1989)
1876	Fonte et embâcle	Montréal et Outaouais		Perrier(1978)
1885		Beauce	Inondation sur la rivière Chaudière	Perrier(1978)
1888	Embâcle	Montréal	Les rues de la ville sont recouvertes d'eau	Andrews(1993)
1896		Beauce	Inondation sur la rivière Chaudière	Perrier(1978)
11 mars 1901	Crue	Montréal	La station météorologique de McGill rapporte 56,9 mm de pluie tombée	Phillips(1984)
1909	Fonte et embâcle	Montréal et Outaouais		Perrier(1978)
9-13 août 1912	Crue	Québec-Estrie	Superficie : 75 000 km ² . Pluie max de 228,6 mm. Durée : 108 h	Perrier(1978)
16-17 juil 1916	Crue	Mauricie-Estrie	Superficie : 25 000 km ² . Pluie max de 127 mm. Durée : 48 h	Perrier(1978)
17-18 juin 1917	Crue	Chaudière	Superficie : 25 000 km ² . Pluie max de 101,6 mm. Durée : 24 h	Perrier(1978)
21-22 juil 1917	Crue	St-François	. Superficie : 5 000 km ² . Pluie max de 158,8 mm. Durée : 18 h	Perrier(1978)
30 juil 1917	Crue	Chaudière	1 pont de chemin fer emporté. 56 km de chemin de fer inutilisable. 98 bâtisses emportées. 113 maisons déplacés. A affecté une population de 16 000 personnes. Superficie : 25 000 km ² . Pluie max de 139,7 mm. Durée : 18 h. Dommages de 1,3 millions de \$ (1917).	Perrier(1978)
1920	Embâcle	Chaudière		Perrier(1978) ; Cartier et Leclerc(1965) Perrier(1978)
17-23 juin 1922	Crue	Montréal-Estrie	Superficie : 100 000 km ² . Pluie max de 233,7 mm. Durée : 144 h.	Perrier(1978)
18-19 juil 1922	Crue	Estrie Beauce	243 mm de pluie à Drummondville	Environnement Canada(1991)
9-15 sept 1922	Crue	Mauricie, Lac St-Jean	Superficie : 250 000 km ² . Pluie max de 139,7 mm. Durée : 150 h.	Perrier(1978)
15-20 mai 1923	Crue	Lac St-Jean/Estrie	Superficie : 75 000 km ² . Pluie max de 152,4 mm. Durée : 138 h.	Perrier(1978)
23-26 oct 1923	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 230 000 km ² . Pluie max de 139,7 mm. Durée : 96 h.	Perrier(1978)

18-23 avr 1924	Crue, fonte et embâcle	Vallée St-Laurent	Superficie : 150 000 km ² . Pluie max de 101,6 mm. Durée : 144 h.	Perrier(1978)
9-14 sept 1924	Crue	Estrie, Saguenay et Québec	Superficie : 75 000 km ² . Pluie max de 215,9 mm. Durée : 138 h	Cartier et Leclerc (1966c) ; Perrier (1978)
28 sept au 2 oct 1924	Crue	Outaouais - Rive Nord - Québec	Superficie : 250 000 km ² . Pluie max de 184,2 mm. Durée : 114 h	Perrier(1978), Bourbonnais et al(1964)
22-23 nov 1924	Crue	Yamaska, St-François	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 101,6 mm. Durée : 42 h	Perrier(1978)
6-9 août 1926	Crue	Montréal, Laurentides	Superficie : 170 000 km ² . Pluie max de 114,3 mm. Durée : 72 h	Perrier(1978)
2-5 nov 1927	Crue	Mauricie - Estrie	Superficie : 110 000 km ² . Pluie max de 158,8 mm. Durée : 66 h	Boucher et al. (1966) ; Perrier(1978), Vigeant et Renaud(1997)
14-18 nov 1927	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 160 000 km ² . Pluie max de 152,4 mm. Durée : 102 h. 84,3 mm de pluie en 24h et 125 mm en 3 jours sont déversés à Montréal	Perrier(1978) ; Environnement Canada(1989)
8 avril 1928	Fonte et embâcle	Estrie	4 pertes de vie. Également, mention par Environnement Canada(1990b) du débordement des rivières Rideau, Chaudière et Quyon au printemps 1928 avec plusieurs personnes noyées. On ignore si on parle du même événement	Perrier (1978); Environnement Canada(1990b)
23-26 mai 1928	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 250 000 km ² . Pluie max de 127,0 mm. Durée : 96 h	Perrier(1978)
24-25 juin 1929	Crue	Montréal - Estrie - Mauricie	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 109,2 mm. Durée : 24 h	Perrier(1978)
23-25 mai 1931	Crue et fonte	Parc des Laurentides	Superficie : 50 000 km ² . Pluie max de 110,5 mm. Durée : 60 h	Perrier(1978)
7-9 juin 1931	Crue	Québec, Beauce	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 108,0 mm. Durée : 66 h	Perrier(1978)
7-10 juil 1932	Crue	Mauricie - Estrie	Superficie : 100 000 km ² . Pluie max de 134,6 mm. Durée : 108 h	Perrier(1978)
16-20 août 1932	Crue	Outaouais - Parc des Laurentides	Superficie : 180 000 km ² . Pluie max de 127,0 mm. Durée : 114 h	Perrier (1978)
24-28 août 1932	Crue	Parc des Laurentides	Superficie : 25 000 km ² . Pluie max de 152,4 mm. Durée : 108 h	Perrier (1978)
14-18 sept 1932	Crue	Lac St-Jean, Beauce	Superficie : 150 000 km ² . Pluie max de 215,9 mm. Durée : 102 h	Perrier (1978)
5-7 oct 1932	Crue	Gatineau - Montréal - Estrie - Mauricie	Superficie : 110 000 km ² . Pluie max de 129,5 mm. Durée : 72 h	Perrier (1978)
1 juil 1933	Crue	Du Lièvre - Vallée Saint-Laurent	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 127,0 mm. Durée : 24 h	Perrier(1978)
24-26 août 1933	Crue	Vallée Saint-Laurent	Superficie : 60 000 km ² . Pluie max de 177,8 mm. Durée : 66 h	Perrier(1978)
11-13 avril 1934	Crue et fonte	Outaouais	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 106,7 mm. Durée : 54 h	Perrier (1978)
15-19 juil 1935	Crue	Lac St-Jean	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 88,9 mm. Durée : 96 h	Perrier(1978)

21-22 août 1935	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 15 000 km ² . Pluie max de 134,6 mm. Durée : 18 h	Perrier(1978)
18-20 sept 1935	Crue	Parc des Laurentides	Superficie : 12 000 km ² . Pluie max de 177,8 mm. Durée : 42h	Perrier(1978)
19 mars 1936	Fonte et embâcles	Etrie - Rive Nord - Charlevoix	11 pertes de vie dans le comté de Charlevoix, près de Baie St-Paul	Perrier (1978)
13-16 mai 1936		Du Lièvre/Gatineau		Perrier(1978)
10-13 août 1937	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 130 000 km ² . Pluie max de 152,4 mm. Durée : 90 h	Perrier(1978)
11-15 sept 1937	Crue	Mauricie - Parc des Laurentides - Beauce - Bas du fleuve	Superficie : 180 000 km ² . Pluie max de 127,0 mm. Durée : 120 h	Perrier(1978)
18-24 oct 1937	Crue	Outaouais- Saguenay	Superficie : 200 000 km ² . Pluie max de 165,1 mm. Durée : 168 h	Perrier(1978)
31 août - 1 sept 1938	Crue	Ste-Anne-de-la-Pérade, Portneuf et Montmorency	9 pertes de vie. Estimé partiel des dommages : 1,0 million de dollars (ponts et routes seulement). Superficie : 20 000 km ² . Pluie max de 113,0 mm. Durée : 18 h	Perrier(1978)
28 juin - 1 juil 1939	Crue	Gatineau, Lièvre, Mauricie, Estrie	Superficie : 90 000 km ² . Pluie max de 160,0 mm. Durée : 66 h	Perrier(1978)
27-31 juil 1939	Crue	Gatineau, Lièvre, Mauricie, Estrie	Superficie : 110 000 km ² . Pluie max de 180,3 mm. Durée : 114 h	Perrier(1978)
30 août - 3 sept 1940	Crue	Parc des Laurentides, Saguenay, Côte-Nord	Superficie : 125 000 km ² . Pluie max de 172,7 mm. Durée : 108 h	Perrier(1978)
12-17 juin 1942	Crue	Parc des Laurentides, Estrie	Estimé partiel des dommages : 0,9 million de dollars (ponts et routes seulement). Superficie : 125 000 km ² . Pluie max de 193,0 mm. Durée : 108 h	Boucher et al(1953) ; Perrier (1978)
18-20 sept 1942	Crue	Lac St-Jean, Côte Nord	Superficie : 220 000 km ² . Pluie max de 116,8 mm. Durée : 54 h	Perrier(1978)
15 juin 1943	Crue	Etrie	Dommages de 0,5 million de dollars	Boucher et al(1952) ; Perrier(1978)
5-7 juin 1944	Crue	Lac St-Jean, Côte Nord	Superficie : 250 000 km ² . Pluie max de 121,9 mm. Durée : 72 h	Perrier(1978)
13-15 août 1945	Crue	Lac St-Jean, Péribonka	Superficie : 80 000 km ² . Pluie max de 119,3 mm. Durée : 72 h	Perrier (1978)
29 sept - 2 oct 1946	Crue	Parc des Laurentides, Côte Nord	Superficie : 125 000 km ² . Pluie max de 111,8 mm. Durée : 72 h	Perrier(1978)
17-19 juil 1947	Crue	Mauricie, Lac St-Jean	Superficie : 25 000 km ² . Pluie max. De 170,2 mm. Durée : 60 h	Perrier(1978)
25-28 mai 1949	Fonte et crue	Côte Nord	Superficie : 125 000 km ² . Pluie max de 124,5 mm. Durée : 78 h	Perrier(1978)
13-16 juin 1949	Crue	Lac St-Jean, Mauricie	Superficie : 200 000 km ² . Pluie max de 114,3 mm. Durée : 78 h	Perrier(1978)
28-30 août 1949	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 180 000 km ² . Pluie max de 116,8 mm. Durée : 48 h	Perrier(1978)
19-22 avril 1950	Crue et fonte	Québec, Côte-Nord	Superficie : 80 000 km ² . Pluie max de 121,9 mm. Durée : 72 h	Perrier(1978)
26-30 nov 1950	Crue	Parc Laurentides, Côte Nord	Superficie : 130 000 km ² . Pluie max de 157,5 mm. Durée : 102 h	Perrier(1978)
5 juillet 1951	Crue	Bas du Fleuve	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 154,9 mm. Durée : 42 h	Perrier(1978)
8-11 juil 1952	Crue	Gatineau, Lièvre	Superficie : 80 000 km ² . Pluie max de 160,0 mm. Durée : 78 h	Perrier(1978)

1-7 oct 1952	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 280 000 km ² . Pluie max de 177,8 mm. Durée : 156 h	Perrier (1978)
21-22 août 1952	Crue	Outaouais	Superficie : 15 000 km ² . Pluie max de 144,7 mm. Durée : 24 h	Perrier(1978)
12-13 déc 1952	Crue	St-Raymond de Portneuf		Cartier et Leclerc(1966a)
25-26 mars 1953	Crue	St-Raymond de Portneuf		Cartier et Leclerc(1966b)
6-7 juil 1953	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 15 000 km ² . Pluie max de 101,6 mm. Durée : 48 h	Perrier(1978)
7-8 sept 1953	Crue	Côte-Nord	Superficie : 40 000 km ² . Pluie max de 109,2 mm. Durée : 24 h	Perrier(1978)
26-28 juin 1954	Crue	Yamaska	Superficie : 15 000 km ² . Pluie max de 101,6 mm. Durée : 36 h	Perrier(1978)
27-28 juin 1954	Crue	Québec	Superficie : 12 000 km ² . Pluie max de 223,5 mm. Durée : 48 h	Perrier(1978)
10-12 août 1954	Crue	Vallée St-Laurent	Superficie : 65 000 km ² . Pluie max de 114,3 mm. Durée : 48 h	Perrier(1978)
5-7 août 1955	Crue	Outaouais, Estrie	Superficie : 100 000 km ² . Pluie max de 152,4 mm. Durée : 66 h	Perrier(1978)
18-21 sept 1955	Crue	Côte Nord, Gaspésie	Superficie : 100 000 km ² . Pluie max de 119,3 mm. Durée : 66 h	Perrier(1978)
22-24 août 1956	Crue	Outaouais	Superficie : 110 000 km ² . Pluie max de 146,1 mm. Durée : 72 h	Perrier(1978)
3-4 août 1957	Crue	Estrie, Bécancour	4 pertes de vie. Dommages de 2,0 millions de dollars. Superficie : 15 000 km ² . Pluie max de 254,0 mm. Durée : 6 h	Slivitzky et al(1962); Perrier(1978)
2-5 sept 1957	Crue	Outaouais, Vallée St-Laurent	Superficie : 300 000 km ² . Pluie max de 190,5 mm. Durée : 96 h	Perrier(1978)
20-22 déc 1957	Embâcle	Beauce, Ste-Anne-de-la Pérade		Perrier(1978), Cartier et Leclerc(1966)
7-11 oct 1958	Crue	Outaouais, Vallée St-Laurent	Superficie : 80 000 km ² . Pluie max de 109,2 mm. Durée : 96 h	Perrier(1978)
13-16 juin 1959	Crue	Côte Nord, Gaspésie	Superficie : 180 000 km ² . Pluie max de 139,7 mm. Durée : 66 h	Perrier(1978)
23-25 juin 1960	Crue	Abitibi	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 129,5 mm. Durée : 42 h	Perrier(1978)
12-14 sept 1960	Crue	Estrie, Côte-Nord	Superficie : 150 000 km ² . Pluie max de 132,0 mm. Durée : 48 h	Perrier(1978)
12-13 sept 1963	Crue	Montréal, Trois-Rivières	Superficie : 40 000 km ² . Pluie max de 104,1 mm. Durée : 24 h	Perrier(1978)
6-8 nov 1963	Crue	Nord de Montréal	Superficie : 25 000 km ² . Pluie max de 116,8 mm. Durée : 42 h	Perrier(1978)
6-8 nov 1963	Crue	Charlevoix	Superficie : 20 000 km ² . Pluie max de 132,0 mm. Durée : 42 h	Perrier(1978)
28-30 juil 1964	Crue	Québec, Bas du fleuve	Superficie : 30 000 km ² . Pluie max de 127,0 mm. Durée : 48 h	Perrier(1978)
22-24 sept 1966	Crue	Saguenay, Côte Nord	Superficie : 150 000 km ² . Pluie max de 129,5 mm. Durée : 60 h	Perrier(1978)
2-3 nov 1966	Crue	Rive Nord	4 pertes de vie. Dommages de 1,3 millions de dollars. Superficie : 150 000 km ² . Pluie max de 355,6 mm. Durée : 72 h	Perrier(1978)
28 août 1967	Crue	Outaouais, St-Maurice	Superficie : 15 000 km ² . Pluie max de 134,6 mm. Durée : 24 h	Perrier(1978)

22-25 sept 1967	Crue	Côte Nord, Gaspésie Maritimes	Superficie : 220 000 km ² . Pluie max de 190,5 mm. Durée : 66 h	Perrier(1978)
jan 1968	Embâcle	Québec à Trois-Rivières	Embâcle nécessitant l'emploi de 9 brise-glaces	Michel(1976) ; Andrews(1993)
24-25 avril 1968	Crue et Fonte	Rive Nord	1 perte de vie. Dommages de 1,5 million de dollars. Superficie : 10 000 km ² . Pluie max de 146,1 mm. Durée : 24h	Perrier 1978)
mars 1971	Crue et embâcle	Région de Châteauguay	Pas d'informations disponibles	Anonyme
mai 1973	Crue	St-Casimir de Portneuf		Perrier(1978)
mai 1974	Fonte et embâcle	Outaouais, Montréal,	Ste-Clothilde, Châteauguay	Perrier(1978)
14 mai - 2 jul 1974	Fonte et embâcle	Gatineau	Les pires inondations en 75 ans. Les eaux ont envahi plus de 1000 maisons, 600 chalets, 3 000 résidents furent évacués. 4 000 familles touchées. 30 millions de \$(1974) versés aux sinistrés par le fédéral/provincial	Environnement Canada(1996), Lacroix(1996), Bergeron(1995)
avril 1976	Fonte et embâcle	Outaouais, Montréal	Récurrence de 1 en 100 ans. Forte et prolongée. La pire au Québec en termes de superficie affectée, 30 millions de \$ versés aux sinistrés	Perrier(1978), Lacroix (1996), Bergeron(1995)
juillet 1976	Crue	Charlevoix		Perrier(1978)
6-12 mars 1979	Crue et fonte	St-Jean, Nord du comté de Missisquoi, Cantons de l'Est	Inondations dans le centre-ville de Sherbrooke. Maisons mobiles à Cookshire. Moulin à papier à Brompton. Contamination de l'eau potable à St-Jean.	Boivin et Lacroix (1990a)
24-25 mars 1979	Embâcle	St-Théodore de Chertsey	30 familles emprisonnées dans leurs chalets. Embâcle de la rivière Ouareau	Boivin et Lacroix(1990a)
25-26 mars 1979	Crue	Sept-Iles	Sous-sols inondés. 58 mm de pluie en 24h	Boivin et Lacroix(1990a)
17-23 avril 1979	Crue et fonte	Sept-Iles	Sous-sols inondés	Boivin et Lacroix(1990a)
27-30 avril 1979	Crue	Est du Québec Côte-Nord, Gaspésie	Fermeture des routes 138 et 132. 125,2 mm de pluie à Sept-Iles en 3 jours	Boivin et Lacroix(1990a)
2 mai 1979	Crue	Ste-Marthe-sur-le-lac, Outaouais, Fort Coulonge, Matapédia	Évacuation de familles. Fermeture de routes	Boivin et Lacroix(1990a)
5 juin 1979	Crue	Région de Montréal	Maraîchers, Pomiculteurs 2,5 millions de \$(1979). Sous-sols inondés, Arbres brisés. Pannes électriques	Boivin et Lacroix(1990a)
16 juin 1979	Crue	Québec	Incapacité des égoûts à fournir. 78 mm de pluie en 2 heures	Boivin et Lacroix(1990a)
1-2 juil 1979	Crue	Sud des Laurentides Région de Ste-Agathe	Érosion entraînant la fermeture de l'autoroute 15. Glissements de terrain et inondations. 38,4 mm le 1 ^{er} juillet à Ste-Agathe et 16,8 mm le 2	Boivin et Lacroix(1990a)
14 sept 1979	Crue	Sud du Québec	Sous-sols inondés. Refoulement d'égoûts. Accidents de circulation. Arbres brisés. Pannes électriques. Glissements de terrain à Québec. Rstes de l'ouragan Frédéric. Records battus 109,5 mm à St-Anicet	Boivin et Lacroix (1990a)

23-24 avril 1980	Crue	Gaspésie	Pluie diluvienne laissant 253,1 mm d'eau à Gaspé (108,9 mm le 23, 144,2 le 24). Inondations, Un pont emporté. Évacuation de familles.	Phillips(1984); Environnement Canada(1991) ; Boivin et Lacroix(1990a)
6 juillet 1980	Crue	Gaspésie	Du jamais vu depuis 1940. Grande-Vallée reçoit 137,8 mm en 24 heures. Ponts et routes emportés. Hélicoptère utilisé pour évacuer 75 familles (150 personnes).	Phillips(1984) ;Environnement Canada(1991) ; Boivin et Lacroix(1990a)
15 juillet 1980	Crue	Pontiac	Inondations	Boivin et Lacroix(1990a)
21-22 juillet 1980	Crue	Montréal	Sous-sols inondés. 79,8 mm en 48h à Dorval	Boivin et Lacroix(1990a)
4 août 1980	Crue	Saguenay, Sept-Iles	Inondations. Grêle confirmé à Sept-Iles	Boivin et Lacroix(1990a)
6 août 1980	Crue	Pontiac, High Falls	Inondations	Boivin et Lacroix(1990a)
15 août 1980	Crue	Baie Comeau, Gaspésie, Ste-Anne-des-Monts	Inondations	Boivin et Lacroix(1990a)
1 ^{er} sept 1980	Crue	Montréal(Laval Nord et Est de l'île de Montréal)	Crues subites laissant 40 mm en 30 minutes et causant l'inondation de sous-sols et de refoulements d'égoûts. 3 morts indirectement liés aux inondations. Personnes emprisonnées dans leurs véhicules	Phillips(1984) ; Boivin et Lacroix(1990a)
20-21 sept 1980	Crue	Québec, Cantons de l'Est	Refoulement d'égoûts, multiples pannes électriques à Québec. 58,9 mm le 20 à Québec et 20,8 mm le 21. Foudre sur une maison à Magog	Boivin et Lacroix(1990a)
26 octobre 1980	Crue	Est du Québec	Pannes électriques. Sous-sols inondés à Sept-Iles. Rafale à 95 km/h à Sept-Iles	Boivin et Lacroix(1990a)
11 fév 1981	Crue et fonte	Sainte-Agathe et Trois-Rivières	38 mm de pluie dans la région de Sainte-Agathe et de Trois-Rivières mettant les eaux des rivières avoisinantes en furie.	Lacroix(1991)
17-23 février 1981	Fonte, crue et embâcle	Outaouais et Montréal	Températures chaudes records, pluies abondantes et débâcles causant le débordement de la rivière Rideau à Ottawa et de la rivière aux Chiens à Sainte-Thérèse	Environnement Canada(1989) ; Boivin et Lacroix(1990a)
25 mai 1981	Crue	Abitibi-Amos	Inondations probables	Boivin et Lacroix(1990a)
22 juin 1981	Crue	Nord du Saint-Laurent : de l'Outaouais à Baie Comeau	Domages de débordements des égoûts pluviaux à Shawinigan. Hydro-Québec a relevé 95 mm en 24h. Roberval : 82,3 mm. Inondations à St-Hubert et Québec.	Boivin et Lacroix(1990a)
20-21 juil 1981	Crue	Abitibi vers Québec, Est de la province	Inondations. Abitibi, 35,6 mm. Manicouagan-Gagnon : 45,8 à 51,9 plus 40,2 mm. Québec : 58,6 mm. Outaouais : 49,3 mm. Gaspé : 51,4 mm. Basse-Côte-Nord : 62,8 mm	Boivin et Lacroix(1990a)
5-6 août 1981	Crue	Sud et Est de la province - Montmagny	Sud de Montmagny inondé. 250 maisons touchées. Ottawa : 110 mm en 6 h	Boivin et Lacroix(1990a)

6-7 août 1981	Crue	Est du Québec	Inondations. Rimouski-Matane : 100 mm. Baie-Comeau : 80 mm. Ste-Anne-des-Monts : 75 mm. Gaspé : 57 mm. Sept-Iles : 58 mm. Saguenay : 60 mm	Boivin et Lacroix(1990a)
15-17 août 1981	Crue	Sud et Est du Québec	Effondrement d'une route pavée sur une longueur de 30 pieds dans la région de St-Louis-de-Blandford en Estrie. 2 ponts emportés. 6 personnes blessées. Dorval : 90,2 mm entre le 11 et le 17. Mont-Joli : 91,7 mm pour la semaine. La rivière St-Francois est à un niveau jamais atteint en août	Boivin et Lacroix(1990a)
7-9 octobre 1981	Crue	Gaspésie	Plusieurs rivières sorties de leur lit. Inondation de la route 132. Routes inondées. Pannes électriques et téléphoniques généralisées. 20 familles évacuées à Grande-Vallée. Mont-Louis a enregistré 244,6 mm de pluie en 3 jours	Environnement Canada(1991) ; Boivin et Lacroix(1990a)
26-28 oct 1981	Crue	Cantons de l'Est	Inondations mineures le long de la rivière St-Francois à Sherbrooke. 64,3 mm de pluie tombée	Boivin et Lacroix(1990a)
17-19 avril 1982	Fonte, crue et embâcle	Cantons de l'Est et Beauce	Pires inondations en 42 ans. 80 mm en 24h. La rivière St-Francois inonde Sherbrooke (réurrence de 125 ans) causant 4 millions de \$ (1982) de dommages. Fonte rapide des neiges. 35 à 67,2 mm de pluie à Val Racine en 24 h. Ascot Corner : 185 vaches noyées. 1 noyade en Beauce. Zone déclarée sinistrée. À Sherbrooke, 300 personnes évacuées, 10 millions de dollars de dommages estimés	Phillips(1984) ; Boivin et Lacroix(1990a)
22 juillet 1982	Crue	Anticosti, Gaspésie	Ponts détruits sur rivières. Inondations locales. Gaspésie - segments de routes emportés. 95 mm sur l'île d'Anticosti. Natashquan : 50 mm. La région de Ste-Anne-des-Monts, Parc de la Gaspésie et Gaspé ont reçu entre 50 et 90 mm de pluie	Boivin et Lacroix(1990a)
29-30 juillet 1982	Crue	Gaspésie	Inondations locales (Parc Forillon). Routes emportées. 50-80mm / 24h	Boivin et Lacroix(1990a)
25 août 1982	Crue	Estrie, Rive sud de Montréal, sud-est Ottawa	Cultures maraichères endommagées dans la région de Napierville. À Montréal, sous-sols inondés. 45-70 mm de pluie / 12 h	Boivin et Lacroix(1990a)
4-5 nov 1982	Crue	Sud et Est du Québec	Inondations locales. Baie Comeau : 86,6 mm. Bagotville : 55,2 mm/24h	Boivin et Lacroix(1990a)
2 fév 1983	Crue	Sud du Québec	Sous-sols inondés. Québec : 59,0 mm/24 h et Dorval : 45,8 mm/24h	Boivin et Lacroix(1990a)
3 fév 1983	Embâcle	Mascouche	0,5 million de \$(1983) à une demeure historique et à la Polyvalente locale	Boivin et Lacroix(1990a)

18-19 mars 1983	Crue et fonte	Sud du Québec	8 décès d'automobilistes dus aux chaussées glissantes à Montréal. Dégâts estimés à 1,5 millions entre Montréal et Trois-Rivières dont 1 million à 300 habitations, commerces et manufactures de Louiseville. Glissement de la falaise Cap Blanc (région de Québec)-1 maison détruite. Inondations à Yamachiche et St-Roch de l'Achigan. 36mm de pluie /24h à Québec ;24,6mm à Montréal	Boivin et Lacroix(1990a)
16-17 avril 1983	Crue et fonte	Est du Québec	Quelques inondations dans les basses terres. Certaines routes inaccessibles temporairement	Boivin et Lacroix(1990a)
18-24 avril 1983	Crue et fonte	Est du Québec	Secteurs inondés dans les régions de Sept-Iles, Matane et Gaspésie	Boivin et Lacroix(1990a)
30 avr-1 mai 1983	Crue et fonte	Région du Québec	Débordement de rivières. Sous-sols inondés	Boivin et Lacroix(1990a)
2-8 mai 1983	Crue	Outaouais à Québec	Inondations des principales rivières. Retard des activités agricoles. 90 mm à Québec. 87 mm à Trois-Rivières	Boivin et Lacroix(1990a)
9-12 mai 1983	Crue	Montréal à Québec	Semences de 2 à 3 semaines en retard	Boivin et Lacroix(1990a)
14 déc 1983	Crue et fonte	Estrie-Beauce	Dizaines de commerçants du centre-ville de Sherbrooke déménagent en lieu sûr. La Yamaska sort de son lit près de Granby. La Chaudière est à 30 cm au-dessus de son niveau normal	Boivin et Lacroix(1990a)
18 juin 1984	Crue	Montréal	Plusieurs artères stratégiques de Montréal inondées (eous-sols, puisards,garages). Dommages plus de 1 million de \$\$ 1984). 53,6 mm de pluie en 24 h à Dorval	Boivin et Lacroix (1990a)
6-7 juillet 1984	Crue	Cantons de l'Est	25 routes touchées. Ponceaux emportés. Routes sectionnées par érosion et bloquées par la chute des arbres. Pylônes d'Hydro-Québec frappés par la foudre. Plusieurs milliers de résidences privées de courant. Maisons inondées en bordure de la Magog. 77,9 mm en 12h à Sherbrooke. 87 mm en 24h à Bishopton	Boivin et Lacroix(1990a)
Fin sept -début oct 1984	Crue	Rivière Caniapiscou près de Kuujjuaq	Noyade de milliers de caribous	Boivin et Lacroix(1990a)
25 fév 1985	Crue et Embâcle	Huntingdon	La rivière Châteauguay inonde la région	Boivin et Lacroix(1990a)
27-28 sept 1985	Crue	Sud du Québec	Tempête tropicale Gloria. Refoulement d'égoûts à Québec. 79,8 mm à Deschambault.	Boivin et Lacroix(1990a)
25-27 jan 1986	Crue et fonte	Sud du Québec, Estrie	La rivière Eaton inonde la région. Plusieurs écoles fermées	Boivin et Lacroix(1990a)
25-31 mars 1986	Crue, fonte et embâcle	Estrie-Beauce	Débâcle dans la rivière St-François, la Chaudière en Estrie et l'Etchemin. En Beauce : du Bras et Montmagny	Boivin et Lacroix(1990a)
2 avril 1986	Fonte et embâcle	Saguenay	Le pont couvert de l'Anse St-Jean est emporté (verso des billets de 1000\$)	Environnement Canada(1989)

9 août 1986	Crue	Montréal	Tunnel Ville-Marie inondé. 20 mm en 1h ; 50-60 mm en 24 h à Dorval	Boivin et Lacroix(1990a)
12 sept 1986	Crue	Sud du Québec	Sous-sols inondés. Ponceaux emportés. Routes fermées. Brèche dans un barrage hydro-électrique de 11 m de hauteur à Lachute sur la rivière du Nord. Une partie des quais des marinas privées et 60 embarcations de plaisance entraînées à plus de 2 km en aval vers Nicolet. En 48 heures : Angers, 116 mm, Lachute, 102 mm, Ste-Agathe, 112 mm (60,5 en 6 h le 12), Sept-Iles, 41 mm en 6 h le 12. Rafales à 98 km/h	Environnement Canada(1989) ; Boivin et Lacroix(1990a)
27 mars 1987	Embâcle	Beauce	La rivière Chaudière déborde sur les terres basses	Boivin et Lacroix(1990a)
1-2 avril 1987	Crue et embâcle	Trois-Rivières et Beauce	À Ste-Anne-de-la-Pérade, 3 des 6 sections du pont ferroviaire enjambant la rivière emportées par les eaux et la glace. En Beauce, le niveau de la Chaudière augmente de 8 m : 600 bâtiments inondés et 2000-2500 maisons sans électricité, 450 personnes évacuées à Ste-Marie-de-Beauce	Environnement Canada(1987a,1989) ; Boivin et Lacroix(1990a)
2 juin 1987	Crue	Abitibi et sud-ouest du Québec	Terres inondées à St-Amable et Ste-Madeleine : 250-300 sous-sols inondés à Varennes. Presque tous les sous-sols et rues d'Amos inondés. En 2 heures, 87,2 mm à St-Amable, 46,6 mm à Ste-Madeleine. 95,7 mm en 18h à Amos	Boivin et Lacroix(1990a)
8 juin 1987	Crue	Montréal	Inondations locales. 61,6 mm en 24h et 44,3 mm en 1 heure à Dorval	Boivin et Lacroix(1990a)
14 juillet 1987	Crue	Montréal	Voie rapide Décarie inondé jusqu'à 3,6 m. 1 mort. Autos submergées dans viaduc. 40 000 résidences inondées. 350 000 abonnés privés d'électricité. 100 millions de pertes en \$\$\$. 101,2 mm de pluie en 2 h à McGill et 86 mm en 1 heure. Plus de 100 mm au parc Lafontaine et 91,8 mm au Jardin botanique	Environnement Canada(1987b) ; Deaudelin(1989) ; Boivin et Lacroix(1990a)
6 avril 1988	Fonte et embâcle	Sud du Québec	Débordement de la rivière Mille-Isles à Laval-ouest. Embâcle de plusieurs km avec amoncellements de glace jusqu'à 5 m de hauteur sur la Saint-Maurice entre La Mauricie et Latuque.	Boivin et Lacroix(1990a)
14 août 1988	Crue	Estrie-Beauce	Routes endommagées. Sous-sols inondés. La rivière Chaudière déborde à Beauceville. Accident de la route : 1 mort à Bromptonville	Boivin et Lacroix(1990a)
28 mars 1989	Fonte et embâcle	Sud du Québec	Plus de 1000 personnes évacuées	Environnement Canada(1989)

Annexe A (suite...page 10)				
Avril 1991	Crués	Rivière Chaudière	1000 personnes affectées et près de 10 millions de dollars (1991) de dommages	Lacroix(1997, comm. pers.)
12 mai 1991	Crue	Rivières Matane et Ste-Anne	Évacuation de plusieurs résidences	Anonyme
9-17 avril 1994	Crue et Fonte	Gaspésie, Estrie, Québec, Beauce		Milton(1995)
19 janvier 1996	Fonte, crue et embâcle	Rivières Châteauguay et Saint-Francois	1 100 résidents du sud-ouest de Montréal évacués de leurs demeures devant le débordement de la rivière Châteauguay. Fortes précipitations, fonte des neiges, dérive de gigantesques morceaux de glace, températures avoisinant les 13 °C et vents forts, ces inondations furent les pires depuis le printemps 1971 à frapper la région 72 municipalités affectées, 3250 résidences touchées en janvier, aide financière dépassant les 3,3 millions de dollars	Lacroix (1997, comm. pers.), Environnement Canada (1996a)
18-20 juillet 1996	Crue	Saguenay, Charlevoix, Côte Nord	Nombre de décès: 10. Dommages estimés à plus de 700 millions de dollars	Environnement Canada(1996b)
8-9 nov 1996	Crue	Région de Montréal	Plusieurs sous-sols inondés	Environnement Canada(1997)

Note *: Cette liste n'est pas exhaustive et a été élaboré à partir des sources et des références disponibles lors de la préparation de l'étude.

ANNEXE B. LISTE DES TEMPÊTES HIVERNALES IMPORTANTES AUX QUÉBEC*

<u>Date de la tempête</u>	<u>Région touchée</u>	<u>Informations additionnelles</u>	<u>Source</u>
31 déc 1775 et 10 fév 1776	Québec	Le siège du général américain Benedict Arnold sur Québec avec ses 2000 soldats est agrémenté de 2 violentes tempêtes de neige	Environnement Canada(1991 ;1996)
18 sept 1875	Rivière-du-Loup/La Malbaie	Un hiver hâtif avec 40 à 60 cm et des vents violents !!	Environnement Canada(1988) ;Lacroix (1991)
16 fév 1876	Québec	66 cm de neige sur 3 jours. Des vents violents arrachent une partie du toit de l'Assemblée nationale, 2 cheminées et détruisent 2 maisons	Environnement Canada (1989) ; Lacroix (1991)
28 fév 1886	Bas Saint-Laurent	100 cm de neige en 3 jours. Un train enseveli à Trois-Pistoles sous des congères de 3 m de hauteur	Environnement Canada(1989)
28 déc 1887	Montréal	41 cm de neige en 24 heures	Environnement Canada(1989)
29 jan 1894	Ottawa	60 cm de neige paralysant tout le trafic ferroviaire durant 2 jours	Phillips (1984)
1 mars 1900	Montréal	La station de McGill rapporte sa plus grosse chute de neige en 112 ans durant le mois de mars soit 42,2 cm	Phillips(1984)
4 mai 1907	Ottouais	19,1 cm de neige tombe à Ottawa en 1 jour constituant un record pour le mois de mai	Phillips(1994)
29-30 déc 1942	Région de Montréal	39 mm de pluie verglaçante déversée sur Montréal	Environnement Canada(1987a)
3 mars 1947	Région d'Ottawa	73 cm de neige en 2 jours	Environnement Canada(1996)
25 fév 1961	Montréal	Une des pires tempêtes de verglas. 3 à 6 cm de glace sur les fils électriques - vents de 90 km/h avec rafales à 115 km/h. Dommages estimés de 7 millions de dollars \$ (1961)	Phillips(1984) ; Environnement Canada (1991) ; Lacroix (1991)
10 mai 1963	Montréal	21,8 cm de neige tombée si tard dans la saison	Environnement Canada(1987a)
19 mars 1964	Basse Côte-Nord	99,1 cm de neige tombée à Cape Whittle ;	Lacroix(1991)
6-13 nov 1969	Côte-Nord/Centre du Québec	Pluie verglaçante endommageant la ligne de haute tension liant Manicouagan à Québec. 30 tours renversées	Lacroix (1991)

26-28 déc 1969	Région de Montréal	70 cm de neige en 60 heures. 15 pertes de vie associées à la tempête. Du jamais vu depuis 1902	Lacroix (1991), Trueman(1970)
4 mars 1971	Sud du Québec	47 cm de neige avec rafales de 100 km/h paralyse Montréal pendant plusieurs jours. Électricité coupée de 2 à 7 jours	Environnement Canada(1989, 1990b) ; Lacroix (1991)
25 janvier 1972	Région de Montréal	Vents violents du OSO atteignant 114 km/h et causant poudrerie et embouteillages dans la ville	Phillips(1984)
22-23 mars 1972	Basses Laurentides, Laval	Forte tempête de verglas qui a couvert une superficie de 900 km ² . 60 000 personnes privées d'électricité. Plus de 900 poteaux électriques s'effondrèrent sous le poids du verglas sur les lignes électriques atteignant parfois 2 à 5 cm d'épaisseur. Dommages aux services publics estimés à environ 1,5 million de dollars (1972).	Chaîné (1973)
2 avril 1975	Sud du Québec	Entre 25 et 50 cm de neige tombée	Phillips(1984)
21 janv 1979	Sud du Québec	Neige. Référé mais non documenté	Lacroix & Boivin (1991a)
13-14 mars 1979	Val d'Or et Ville-Marie	30 et 46 cm de neige. Fermeture d'écoles	Lacroix & Boivin (1991a)
14 mars 1980	Sud du Québec	20 à 30 cm de neige. Fermeture d'écoles et de routes	Lacroix & Boivin (1991a)
8-9 mai 1980	Sept-Iles	23 cm de neige. Accidents de circulations causant des morts	Lacroix & Boivin (1991a)
29 nov 1980	Gaspé à la Basse Côte-Nord	À Sept-Iles, 45,4 cm de neige avec vents de 103 km/h.	Lacroix & Boivin (1991a)
3 déc 1980	Parc de la Vérendrye jusqu'à l'est de la Province	Neige et verglas. Cône de verglas de 30 cm dans la région de Clarke City. 40 cm de neige dans le Parc de la Vérendrye. Congères de 90 cm à St-Paul-de-Montmagny. Routes fermées. Poteaux fracturés sous la glace	Lacroix & Boivin (1991a)
14 avril 1981	Sud du Québec	Neige et poudrerie. Vents à 130 km/h à Nicolet. Pannes électriques. Arbres brisés. Antennes de TV, toitures endommagées	Lacroix & Boivin (1991a)
18-22 nov 1981	Est du Québec	34 cm à Sept-Iles. Accumulation de gadoue. Vents supérieurs à 100 km/h	Lacroix & Boivin (1991a)
6-7 déc 1981	Cantons Est - Beauce	41,8 cm de neige à Sherbrooke. Hôpitaux en état d'alerte	Lacroix & Boivin (1991a)
18 jan 1982	Côte-Nord, Est du Québec	Blizzard (fortes chutes de neige, vents de 110 km/h, températures de -30 °C). 2 000 personnes évacuées de Labrador City à Wabush Lake à cause de pannes électriques. Toitures arrachées par le vent	Lacroix (1991) ; Lacroix & Boivin (1991a)

21-22 fév 1982	Iles-de-la-Madeleine	60 cm de neige, vents de plus de 100 km/h, congères de 7 m, températures de -30 à -40 °C. 7000 personnes sans chauffage ni communication. État d'urgence. Activités paralysées. Aucun transport aérien ou maritime	Environnement Canada(1990b,1991) ; Lacroix (1991) ; Lacroix & Boivin (1991a)
5-8 avril 1982	Etrie, Beauce, Est du Québec	33 cm de neige à Sept-Iles. Records de bas max et min. Vent à 83 km/h. Accidents de la route à Sherbrooke, Richmond, Thetford-Mines	Lacroix & Boivin (1991a)
29-30 avr 1982	Côte-Nord, Anticosti	2 cm de verglas et 30 cm de neige. Aéroport de Blanc-Sablon fermé pour 2 jours	Lacroix & Boivin (1991a)
15-16 janvier 1983	Est du Québec	34 cm de neige à Gaspé. Rafales à 93 km/h à Sept-Iles. Accrochages et routes fermées	Lacroix & Boivin (1991a)
2 février 1983	Sud du Québec	Verglas. Plus de 200 accrochages sur le territoire de la CUM	Boivin et Lacroix(1990a)
22 et 28 mars 1983	Sud du Québec	10 à 20 cm. Routes dangereuses avec de nombreux accidents.1 mort suite à un dérapage dans le Parc des Laurentides	Boivin & Lacroix (1991a)
16 nov 1983	Sud du Québec	Neige (20 cm) et verglas. Embouteillages et accidents. Pannes d'électricité. 30 000 foyers touchés dans la région de Montréal, 18 000 dans les Laurentides. Accident mortel à Matane	Lacroix & Boivin (1991a)
6-7 déc 1983	Est du Québec	Violente tempête d'hiver, la plus forte depuis l'ouragan Donna le 17 décembre 1960. 41 cm de neige le 7 à Sept-Iles. Nombreuses pannes. Routes fermées. Évacuation de 20 familles à Matane et Ste-Anne-des-Monts causée par la mer déchaînée. Grande marée d'automne. Rafales à 130 km/h à Sept-Iles causant des vagues de 7 m. Cargo en difficulté à Chandler. 35 marins secourus. Minéralier échoué à Baie-Comeau. Pétrolier en difficulté à 30 km de Sept-Iles qui perd 1000 barils de mazout. Un train percute 1 auto à Roberval : 1 mort. La route 132 en Gaspésie lessivée causant d'importants dégâts.	Boivin et Lacroix (1990a) ; Boivin & Lacroix (1991a)
13 déc 1983	Sud du Québec	Pire tempête de verglas des 22 dernières années. Plus de ½ million de Montréalais laissés sans électricité pendant un minimum de 36 heures	Bachand (1984) ;Environnement Canada (1988) ; Lacroix (1991)

28-29 fév 1984	Sud du Québec	50 cm, vents de 90 km/h. 6 pertes de vie. Pire tempête sur le sud depuis le 21 janvier 1979. 25 à 35 cm de neige. Vents de 80 à 90 km/h. 4 morts dans la circulation. Routes impraticables. Accident majeur à St-Bruno causant 15 blessés	Lacroix (1991) ; Lacroix & Boivin (1991a)
11 mars 1984	Québec et Ontario	4 morts et une centaine de blessés. Congères. Routes fermées	Lacroix & Boivin (1991a)
3 déc 1984	Sud-ouest du Québec	30 accrochages à Montréal, une centaine à Sherbrooke. 21 cm à Sherbrooke	Lacroix & Boivin (1991a)
6 déc 1984	Estrie	33,6 cm de neige à Sherbrooke. Écoles fermées	Lacroix & Boivin (1991a)
1 ^{er} janv 1985	Sud-ouest du Québec	20-25 cm neige/grésil à Montréal. Rafales à 65 km/h. 2,4 mm de verglas en Estrie avec accumulation de glace 5-10 mm.	Lacroix & Boivin (1991a)
16 janvier 1985	Est du Québec	Gaspé : 26 cm de neige. Vents 70 à 95 km/h. Écoles, bureaux et commerces et routes fermés. Aéroport de Gaspé fermé.	Lacroix & Boivin (1991a)
22 janv 1985 16-17 avr 1985	Sud du Québec Est du Québec	Accident voiture/autobus - 3 morts Rafales à 113 km/h à Sept-Iles. 25 cm de neige dans la vallée de la Matapédia/Gaspésie. Écoles fermées. 5 pêcheurs se noient à Baie Johan-Beetz	Lacroix & Boivin (1991a) Lacroix & Boivin (1991a)
19-21 nov 1985 3 janv 1986	Centre du Québec Nord de Montréal	Blizzard. 40 cm de neige Neige et poudrerie. 100 à 150 véhicules impliqués dans des accidents/dérapages. 1 mort et plusieurs blessés	Lacroix & Boivin (1991a) Lacroix & Boivin (1991a)
25-27 jan 1986	Vallée du Saint-Laurent	30 à 50 cm de neige et blizzard. Un Boeing 747 d' Air France sort de la piste à Mirabel. 153 passagers impliqués.	Environnement Canada(1987) ; Lacroix & Boivin (1991a)
9-10 avril 1986	Moitié sud du Québec	44,4 cm de neige et vents à 124 km/h à Sept-Iles. Jusqu'à 55-60 cm par endroits. Dommages aux résidences	Environnement Canada(1991) ; Lacroix & Boivin (1991a)
20-22 nov 1986	Sud du Québec	32 cm à Québec, 52 cm à Sherbrooke et 71 cm à Gaspé. Routes fermées. Fermeture d'écoles. 3 décès à Montréal.	Lacroix & Boivin (1991a)
9 déc 1986	Sud-ouest du Québec	15 à 25 cm de neige avec grésil. 6 accrochages avec blessés.	Lacroix & Boivin (1991a)
24 déc 1986	Vallée de l'Outaouais et sud du Québec	30 mm de verglas tombent en 14h . Un foyer sur 4 est privé d'électricité. Arbres, fils électriques et toits écrasés sous l'amas de glace.	Environnement Canada(1987a) ; Lacroix (1991)
11-12 jan 1987	Estrie à la Gaspésie	25 à 30 cm. Route fermée entre rivière-au-Renard et Percé	Lacroix & Boivin (1991a)

22-23 janv 1987	Sud du Québec et Côte-Nord	30 cm de neige avec vents de 130 km/h. Plusieurs dommages et décès. 1 mort à Pont-Rouge et 1 mort à Ste-Catherine en banlieue de Québec. 2500 abonnés privés d'électricité à Montréal-Est.	Environnement Canada(1987a) ; Lacroix & Boivin (1991a)
31 jan-1 fév 1987	Gaspé	50 cm et plus. Vols annulés à Gaspé	Lacroix & Boivin (1991a)
7-8 nov 1987	Val d'Or	Chutes de neige importantes. Routes glissantes. 1 mort et 3 blessés	Lacroix & Boivin (1991a)
25-26 nov 1987	Sud-Ouest du Québec	de 30 à 50 cm.	Lacroix & Boivin (1991a)
19 jan 1988	Matapédia et bas du fleuve	50 cm de neige à Gaspé. 113 km/h à Cap-Chat. Écoles et routes fermées	Lacroix & Boivin (1991a)
12-13 fév 1988	Sud du Québec	20 à 35 cm. 60 à Baie Comeau. Carambolage de 100 véhicules dans l'est de Montréal. 1 mort à Laval	Lacroix & Boivin (1991a)
16-17 avril 1988	Sud du Québec	10 à 20 cm de neige. 3 morts à Victoriaville et région de Sherbrooke	Lacroix & Boivin (1991a)
18-19 avril 1988	Côte-Nord	40 cm à Baie Comeau et Sept-Iles. Panne générale. 80% des Québécois dans le noir. Plusieurs millions de dollars de perte	Lacroix & Boivin (1991a)
2 nov 1988	Entre Shawinigan et LaTuque	75 cm. 35 chasseurs immobilisés	Lacroix & Boivin (1991a)

Note *: Cette liste n'est pas exhaustive et a été élaboré à partir des sources et des références disponibles lors de la préparation de l'étude.

ANNEXE C. LISTE DES TORNADES ET DES TEMPÊTES IMPORTANTES DE GRÊLE AU QUÉBEC*

TORNADES

<u>Date de l'événement</u>	<u>Région touchée</u>	<u>Informations additionnelles sur l'événement</u>	<u>Source</u>
18 sept 1847	Cornwall, Ontario à Saint-Édouard, Qué	57 bâtiments détruits	Newark (1977)
17 juillet 1878	Québec	Plusieurs navires rompent leurs amarres et dérivent sur le Saint-Laurent. Le navire Tivoli échoue à Sillery et le brigantin Neptune touche le fond à Cap-Blanc	Environnement Canada(1989)
22 août 1883	Ottawa	Poteaux de télégraphe et bâtiments détruits, clôtures arrachés	Newark (1977)
6 juin 1888	Lanark, Ottawa, Cornwall, vallée du St-Laurent	500 maisons rasées; corridor de 300 to 800 m de largeur. 3 pertes de vie. Plusieurs blessés	Newark (1977) ; Environnement Canada(1991)
11 juillet 1888	Frontière Ontario-Québec près de Morrisburg	1 personne tuée en Ontario et 4 aux Etats-Unis	Newark(1977)
16 août 1888	Sud-ouest du Québec	Un orage dévastateur se déplace de St-Zotique à Valleyfield. 9 morts et 14 blessés	Phillips(1984) ; Environnement Canada(1987)
14 juin 1892	Outaouais (de Renfrew à Montréal)	12 morts et 43 blessés, Un corridor de dommages de 800 m de largeur observé.	Newark (1977) ; Phillips(1984)
23 mai 1893	Montréal	Tornade causant plusieurs blessures et quelques morts	Environnement Canada(1987a,1988)
19 juillet 1949	Chêneville	Tornade d'une durée de 3 minutes et demie. Clocher de l'église renversé. Dommages estimés à 200 000 \$ (1949)	Environnement Canada (1996)
Période 1950 à 1979	Un total de 98 tornades identifiées dans Newark(1983). Pour plus de détails, se référer à l'auteur		
24 juin 1972	Maniwaki	2 décès. 11 blessés	Non disponible
31 mai 1975	St-Rémi de Napierville	Non disponible	Non disponible
24-25 juillet 1975	Saint-Bonaventure	Tornade détruisant la moitié de la ville. 4 décès, 47 blessés et 2 million de \$ de dommages (1975). 100 immeubles ravagés incluant le château d'eau de la ville	Phillips(1984) ; Environnement Canada(1989, 1991, 1996)
13 juillet 1977	Région de Montréal	Dommages aux bâtiments	Ducharme(1977)
27 juin 1978	Lac-des-Loups, Lac Masson, Buckingham	Tornade observée ayant une trajectoire irrégulière de 45 km. 35 blessés et des pertes matérielles de 2 millions de \$(1978)	Phillips(1984) ; Environnement Canada(1991)

5 juin 1979	Région de Montréal	Violents orages causant des pertes de 2,5 millions \$ aux producteurs de légumes. Nombreux sous-sols inondés et toits emportés	Phillips(1984) ; Environnement Canada(1987a) ; Boivin et Lacroix(1990a)
2 août 1979	Région de Montréal	Tornade observée dans l'ouest de l'île avec des vents de 108 km/h et de la grêle causant 1 million de \$ de dommages aux cultures de tabac, au sud de Joliette	Environnement Canada(1988)
21 mai 1980	Gagnon	Informations non disponibles	Lacroix (1997, comm. pers.)
7 août 1980	Quyón (Outaouais)	Informations non disponibles	Lacroix (1997, comm. pers.)
8 août 1980	Messine (Maniwaki)	1 blessé, maison détruite	Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Droit, 9 août - pp 1 et 25
14 août 1980	Outaouais - Pembroke	Informations non disponibles	Lacroix (1997, comm. pers.)
2 sept 1980	Outaouais-Lancaster	Informations non disponibles	Lacroix (1997, comm. pers.)
13 juillet 1981	Maxville (Outaouais)	Tornade d'intensité inconnue	Deaudelin(1993) ;Boivin et Lacroix(1990b)
14 juin 1982	Basses-Laurentides/ Laval	Tornade qui frappa Ste-Rose. 6 morts, 26 blessés, plusieurs centaines de bâtiments ravagés.	Environnement Canada(1990b)
19 août 1982	Messine (Pontiac-Gatineau) ; Abitibi	Tornade d'intensité inconnue . Roulotte de 2 à 3 tonnes déplacée de 20 m à Malartic. Arbres pliés et brisés. Inondations au centre-ville de Val d'Or. Crue subite, grêle et vents forts. À Rivière Dumoine (46N 77O), arbres déracinés sur 100 m en forêt. À Danford Lake, 6 chalets endommagés, 1 arrché, trace de 3 km en forêt	Patoine(1983) ; Boivin et Lacroix (1990a) ; Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Droit, 21 août - pp 1
7 juin 1983	Québec	Tornade ou vents violents avec grêlons et des rafales à 100 km/h. Avions endommagés à l'aéroport de Saint-Nicolas. Lignes de haute tension et gros arbres abattus	Phillips(1984) ; Environnement Canada(1987)
1 juillet 1983	Sainte-Marguerite Marie (Lac St-Jean)	Tornade F1 à F2 avec grêle 5 à 10 cm. 10 blessés et maison mobile emportée. Toits de maisons et de grandes culbutés, arbres et poteaux brisés. 300 000\$ de dégâts dans la région de Mistassini et St-Ambroise	Deaudelin (1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Soleil, 4 juillet, pp A6
28 octobre 1983	Valleyfield	Tornade F2 à Saint-Timothée endommageant 45 bâtiments. 2 immeubles détruits, 7 blessés et dégâts matériels de 1,5 millions de \$(1983). Vents estimés à 200 km/h	Dubreuil et al. (1983) ; Environnement Canada (1988) ; Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.) ; La Presse, 31 octobre, pp A3

7 juillet 1984	Cantons de l'est	Forts coups de vent à Bury. Maison déplacée sur 2 m. Grange détruite. Arbres brisés/déracinés	Boivin et Lacroix(1990a)
15 juillet 1984	Blue Sea Lake (Gatineau) Campbell's Bay Village Guénette près Mont-Laurier	Tornade d'intensité F3 à Blue Sea Lake. 1 décès. 30 blessés. Vents estimés à 160 km/h. À Campbell's Village, 10 blessés, 16 maisons détruites, église endommagée	Courbin(1988) ; Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Droit, 16 juillet - pp 1-2
20 mai 1985 18 juin 1985	Saint-Raphael de Bellechasse Saint-Sylvère (Trois-Rivières)	Tornade F0 Tornade F2 à F3. 3 blessés, 6 maisons lourdement endommagées, dégâts estimés à 1 millions de dollars	Deaudelin(1993) Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Soleil, 19 juin - pp A6
6 juillet 1985	Lacolle/Hemmingford St-Paul de l'île aux Noix, Henryville	Tornade F0 et F1. Plusieurs milliers de dollars. Blessures corporelles légères. Toitures partiellement arrachées sur une école et un centre d'accueil	Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.) ; La Presse, 8 juillet - pp A3
16 juin 1986	Lac Gareau (Gatineau)	Tornade F3. Vents estimés entre 250 et 330 km/h. 1 blessé. 12 maisons touchées dont 8 lourdement ou détruites. Demande de déclaration de zone sinistrée	Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Droit, 17 juin - pp 1-2
24 juin 1986	Sherbrooke (Estrie)	Tornade ou vents violents faisant plus de 1 million de \$(1986)	Environnement Canada(1988)
29 juin 1986 1-3 août 1986	Lac des Deux Montagnes Chertsey(1) : Lachute, Ste-Agathe (2) : Richelieu, Château-Richer, Pintendre, Ste-Anne-de-Beaupré, Chibougamau, Lac Inman(3) Maniwaki (Pontiac)	Trombes marines Orage violent et grêle de 5-10 mm	Boivin et Lacroix(1990b) Boivin et Lacroix(1990a)
15 août 1986		Tornade d'intensité F0. Dégâts mineurs dans un couloir de 150 m de large par 1200 m de long au barrage Lytton	Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.)
28 mai 1987 8 juin 1987	Glen-Sutton (Estrie) Outaouais et région de Montréal	Tornade F0 Des tornades et des gros grêlons causent d'importants dégâts matériels. 44 mm de pluie en 1 heure à Dorval. Tornade identifiée F0 à Fort Coulonge	Deaudelin(1993) Deaudelin(1993) ; Environnement Canada(1987a)
18 juillet 1987	Ouest de Montréal - Rive sud	Section de l'autoroute 20 inondée sur l'ouest de l'île. Toit arrachée à Ste-Catherine (Laprairie). Tente-roulotte renversée à Lachute - 3 blessés	Boivin et Lacroix (1990a)
24 juillet 1987 24 juillet 1987	Alexandria (Cornwall) Parc du Mont-Tremblant Extrême sud-ouest du Québec	Tornade F1 à F2 Tornade d'intensité inconnue Chablis. Clocher d'église pulvérisé par la foudre. 35 000 foyers privés d'électricité dans la région de Montréal	Deaudelin(1993) Deaudelin(1993) Boivin et Lacroix(1990b)

26 juillet 1987	Kinnear's Mills (Estrie)	Tornade F0 à F1. 1 blessé, famille entière soulevée dans les airs, 3 granges endommagées, 1 maison complètement détruite	Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Soleil, 27 juillet - pp A1-A2
5 juin 1988 20 juin 1988	Thetford Mines St-Bernard au sud du Québec	Tornade d'intensité inconnue Tornade avec vents estimés à 200 km/h. 3 millions de dollars de dommages	Deaudelin(1993) Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Soleil, 21 juin - pp C3
10 juillet 1988	Région de Québec	Vents forts détruisant 2 granges avec arbres déracinés à Honfleur	Boivin et Lacroix(1990a)
2 août 1988 10 sept 1989	Montcerf(Pontiac-Gatineau) Entre Lac Viceroy et Chéneville (65 km NE de Hull)	Tornade d'intensité inconnue 300 000\$ de dommages, cimenterie détruite à 70%, toits arrachés, murs de ciments détruits, chalets lourdement endommagés, arbres déracinés	Deaudelin(1993) Lacroix (1997, comm. pers.) ; Le Droit, 11 sept - pp 1-3
16 nov 1989	Mont St-Hilaire	Tornade F2. Dégâts de 2 millions de dollars. Corridor de plus de 1 km sur 500 m de large entre la rivière Richelieu à Otterburn Park et le centre-ville de Saint-Hilaire	Deaudelin(1993) ; Lacroix (1997, comm. pers.)
12 juin 1991 30 juin 1991	Saint-Barnabé Gatineau	Tornade F0 à F1 Orages causant Vents de 120 km/h rapportés. 16 avions renversés à l'aéroport	Deaudelin(1993) Environnement Canada(1996)
27 août 1991	Louvicourt, lac Némiscachingue et Parc de la Mastigouche Maskinongé	3 Tornades d'intensité inconnue Tornade F3 appelée « 27 secondes de terreur » rapportée et accompagnée de vents entre 250 et 330 km/h au nord du lac St-Pierre. 90 immeubles ravagés en totalité. 100 personnes sans abri et 15 blessés. Aucun décès. Électricité coupée pendant 2 jours avec 100 poteaux jetés par terre et 6,5 km de fils électriques endommagés	Deaudelin(1992) Biron et Benjamin(1992) ; Deaudelin(1993) ; Environnement Canada(1996)
17 mai 1992	Notre-Dame-de-Pierreville	Tornade F3	Deaudelin(1993)
2 août 1992	Chichester (Pontiac-Gatineau)	Tornade d'intensité inconnue	Deaudelin(1993)
4 juillet 1993	Sainte-Elizabeth	Tornade F0 à F1	Deaudelin(1993)
10 juillet 1993	Saint-Léonard	Tornade F0 à F1	Vaillancourt (1994)
20 juillet 1993	Lac du Fils(Témiscamingue)	Tornade F0 à F1	Vaillancourt (1994)
	Saint-Mathieu (lac Edem)	Tornade F0 à F1	Vaillancourt (1994)

3 août 1993	Lévis	Tornado probablement F0	Vaillancourt (1994)
31 août 1993	Wottonville/St-Camille Wolfe (Beauce)	Tornado probablement F1	Vaillancourt (1994)
3 sept 1993	Saint-Césaire/Granby	Tornado F1	Vaillancourt (1994)
27 avril 1994	Ville Lorraine	Tornado F1	Vaillancourt (1997)
22 mai 1994	Saint-Augustin	Tornado F0 à F1	Vaillancourt (1997)
31 mai 1994	St-Nicholas/Bernières/Shawinigan /Lac à la Tortue	Tornades F1 à F2	Vaillancourt (1997)
12 juin 1994	Saint-Cuthbert/Avenmore	Tornades F0 à F1	Vaillancourt (1997)
21 juin 1994	Parc de la Mauricie	Tornado F1 probable	Vaillancourt (1997)
9 juillet 1994	St-Charles sur Richelieu	Tornado F2	Vaillancourt (1997)
21 juillet 1994	Lac St-Louis	Tornado F0	Vaillancourt (1997)
26 juillet 1994	Roxton Falls	Tornado F0	Vaillancourt (1997)
30 juillet 1994	Franklin	Tornado F0	Vaillancourt (1997)
4 août 1994	Aylmer, Rawdon/Ste-Béatrix, Laurel, St-Pascal, Alexandria	Tornado F3 à Aylmer observée avec vents estimés entre 180 et 330 km/h. Corridor de 8 km de long et 300 m de largeur. 15 blessés. 284 immeubles endommagés dont 10 ravagés. Dommages de plus de 5 millions de \$(1994). Les autres tornades sont des F0 à F1	Gaudette (1994) ; Environnement Canada(1996) ; Vaillancourt (1997)
28 août 1994	Ile Perrot	Tornado F0 à F1	Vaillancourt (1997)
21 mai 1995	Aéroport de Trois-Rivières	Entonnoir vu, dommage à un avion (F0) vers 14h HAE	Vaillancourt & Gaudette (1996)
20 juil 1995	Lac Newcombe/Brin de Scie	Tornado F0 ; gros arbres déracinés, Couloir de 1 km par 50 m	Vaillancourt et Gaudette (1996)
21 avril 1996	Ormstown	Tornado F0 à F1	Vaillancourt (1997)
11 juillet 1996	Saint-Stanislas	Tornado F1	Vaillancourt (1997)
15 juillet 1996	Elgin	Tornado F2	Vaillancourt (1997)
8 août 1996	St-Jacques	Tornado F0	Vaillancourt (1997)
25 août 1996	St-Bernard	Tornado F1	Vaillancourt (1997)

CAS DE GROSSE GRÊLE LES PLUS IMPORTANTS

5 août 1689	Lachine	La même journée que l'attaque de Lachine par les Iroquois	Environnement Canada(1987a)
12 juin 1878	Lachute	Grêlons aussi gros que des œufs de pigeon.	Environnement Canada (1989,1996)
17 août 1878	Sud du Québec	Grêle de 2 à 3 cm frappant Saint-Lambert et Laprairie	Environnement Canada (1989)
10 mai 1979	Estrie Beauce	Grêle à St-Edouard de Lotbinière	Boivin et Lacroix(1990b)
5 juin 1979	Région de Montréal	Maraîchers, pommiculteurs. Dommages de 2,5 millions de \$\$ à Laval. Dégâts au Jardin botanique	Environnement Canada(1990b) ; Boivin et Lacroix(1990b)
16 juin 1979	Québec	Grêle de 2,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)

2 août 1979	St-Thomas (sud de Joliette)	Perte de récoltes pour 1 million de \$ et jusqu'à 50% des cultures	Boivin et Lacroix(1990b)
7 mai 1980	Laurentides, Outaouais, Pontiac, Montréal	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
9 mai 1980	Frontière E.U.-Québec, Laurentides, Pontiac-Temiscamingue	Petite grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
31 mai 1980	St-Eustache, Trois-Rivières	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
25 juin 1980	Noranda, Amos, Remigny	Grêle 2 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
10-11 juillet 1980	Val d'Or (10), Ste-Agathe(11)	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
17 juillet 1980	St-Joseph du Lac	Grêle	
4 août 1980	Bagotville, Saguenay, Sept-Iles	Grêle confirmée	Boivin et Lacroix(1990a ;1990b)
30 août 1980	Abitibi	Grêle de 2 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
4 avril 1981	Val d'Or	Grêle de 0,5 cm	Boivin et Lacroix (1990b)
15 mai 1981	St-Jean-Baptiste de Rouville	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
6 juin 1981	Montréal, lac St-Jean, Parc des Laurentides	Grêle de 0,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
15 juin 1981	Val d'Or	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
17 juin 1981	Mirabel	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
4 juillet 1981	Chibougamau	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
13 juillet 1981	Sherbrooke	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
19 juillet 1981	Outaouais, Arnprior	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
11 août 1981	Abitibi, Val d'Or	Grêle de plus de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
22 juin 1982	Basses Laurentides, Outaouais	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
2 juillet 1982	Ste-Malachie, Valcartier	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
7 juillet 1982	Jonquière, Chicoutimi Nord	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
14 juillet 1982	Amos	Grêle de 2,5 à 3 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
31 juillet 1982	Napierville	Grêle. Champs de légumes détruits	Boivin et Lacroix(1990b)
16 août 1982	50km au sud-est de Val d'Or	Grêle de 2 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
19 août 1982	Malartic	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
20 avril 1983	Trois-Rivières	Grêle de 0,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
7 juin 1983	Trois-Rivières et Québec	Petite grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
14 juin 1983	Région de Sherbrooke	Grêle. Vitres fracassées	Boivin et Lacroix(1990b)
1 ^{er} juillet 1983	Nord du lac Saint-Jean	Grêle (balle de baseball) 5-10 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
14 juillet 1983	Témiscamingue	Grosse grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
25 juillet 1983	Sud du Québec	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
12 mai 1984	Région de Montréal, Estrie, Hull	Grêle de 5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
15 mai 1984	Canton d'Ascot (Estrie)	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
23 mai 1984	Pohenegamook (bas du fleuve)	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
21 juin 1984	Québec, Roberval	Grêle de 1 cm. Dommages mineurs aux cultures et aux jardins de la région	Boivin et Lacroix(1990b)
3 août 1984	Région de Trois-Rivières	Grêle de 0,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
1 sept 1984	Trois-Rivières, Shawinigan	Grêle de 0,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
20 sept 1984	Outaouais, sud des Laurentides, Région de Montréal	Grêle de 0,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
13 mai 1985	Cantons de l'Est	Grêle (agglomérations de 7 cm). Dommages aux pare-brises et toitures des autos.	Boivin et Lacroix(1990b)
31 mai 1985	St-Canut près de Mirabel	grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
2 juin 1985	Parc des Laurentides	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)

14 juin 1985	Entre Parent et Mont-Laurier. Également à Mirabel	Grêle près de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
15 juin 1985	Pont-Rouge	Grêle de près de 5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
18 juin 1985	St-Sylvère, Estrie et rive sud de Montréal	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
23-24 juin 1985	Ste-Agathe et LaTuque (23) ; Sherbooke (nuit 23-24) ; Estrie-Beauce jusqu'à Rivière- du-Loup(24)	Grêle de 1 à 2 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
3 juillet 1985	St-Romuald et Bécancour, Rive sud de Montréal	Grêle de 1 à 2 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
5 juillet 1985	Hemmingford ; Gracefield, sud de Maniwaki	Grêle de 1 à 1,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
16 juillet 1985	Aéroport de Sherbrooke	Grêle de 1,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
29 juillet 1985	Entre St-Grégoire et l'Ange- Gardien (région de 20 km par 3 km)	150 exploitations agricoles dévastées, récoltes anéanties, bâtisses démantelées	Boivin et Lacroix(1990b)
8 août 1985	Sud de Maniwaki, Saint- Joachim (Estrie)	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
27 août 1985	Pointe-du-lac (10 km à l'ouest de Trois-Rivières)	Grêle de 0,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
18 avril 1986	Trois-Rivières	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
6 mai 1986	Abitibi	Grêle de 2 à 5 cm. Serre commerciale endommagée à Dubuisson	Boivin et Lacroix(1990b)
7 mai 1986	Val des Monts(Perkins), nord de Gatineau	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
29 mai 1986	Région de Montréal	Grêlons jusqu'à 8 cm de diamètre (balles de golf) à Saint- Hubert et Montréal. Dommages estimés à 70 millions de \$(1986)	Environnement Canada(1987,1989)
29 juin 1986	Sud-ouest du Québec	Grêle de 0,5 à 1,5 cm. Cultures endommagées dans les régions de Montréal et de l'Outaouais	Boivin et Lacroix(1990b)
3 août 1986	Lac Etchemin	Grêle de 2,5 cm)	Boivin et Lacroix(1990b)
8 août 1986	Estrie	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
11 mai 1987	Aéroports d'Ottawa et de Mirabel	Grêle de 0,5 cm. Aucun dommage signalé	Boivin et Lacroix(1990b)
11 mai 1987	Arntfield (Rouyn)	Grêle de 2,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
29 mai 1987	Région de Montréal	Grêle (balles de tennis). Dommages évalués à plusieurs millions de dollars	Environnement Canada(1990b) ; Boivin et Lacroix(1990b)
30 mai 1987	Berthier, St-André d'Argenteuil	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
31 mai 1987	Amos	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
5 juin 1987	Sud-Ouest du Québec	Grêle de 1 à 1,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
8 juin 1987	Outaouais	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
27 juin 1987	Outaouais	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
28 juin 1987	Rimouski, Matapédia	Grêle de 0,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
2 juillet 1987	Trois-Rivières	Grêle. Aucun dommage rapporté	Boivin et Lacroix(1990b)
4 juillet 1987	Trois-Rivières	Grêle de 0,5 cm. Aucun dommage	Boivin et Lacroix(1990b)
24 juillet 1987	Extrême sud-ouest du Québec	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
26 juillet 1987	St-Narcisse (est de Shawinigan), Drummondville et St-Hyacinthe	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)

8 août 1987	Notre-Dame-du-Laus (sud-est de Rivière-du-Loup)	Grêle de 1 à 2 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
19 août 1987	Sud-ouest du Québec	Grêle de 0,5 à 2,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
20 août 1987	Québec	Grêle de 1 à 1,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
22 août 1987	Montréal	Grêle de 0,5 à 1,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
7 oct 1987	Montréal	Grêle de 0,5 à 1,0 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
13 mai 1988	Chibougamau	Petite grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
21 mai 1988	Ormstown	Grêle de 1 cm. Aucun dommage	Boivin et Lacroix(1990b)
23 mai 1988	Val d'Or	Grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
5 juin 1988	Boucherville, Estrie-Beauce	Grêle de 1 à 3 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
12 juin 1988	Trois-Rivières	Grêle de 1 cm. Aucun dommage	Boivin et Lacroix(1990b)
14 juin 1988	Notre-Dame-du-Nord (Témiscamingue)	Grêle de 7 à 10 cm. Aucun dommage	Boivin et Lacroix(1990b)
16 juin 1988	Gaspé	Grêle de 1,5 cm. Aucun dommage	Boivin et Lacroix(1990b)
25 juin 1988	Huntingdon (sud de Montréal)	Grêle de 0,5 cm. Grosse bille à Notre-Dame-du-Laus	Boivin et Lacroix(1990b)
30 juin 1988	Arthabaska (près de Victoriaville)	Grêle (pois à bille). Aucun dommage Grêle de 0,3 à 2 cm à Hull-Ottawa avec dommages aux voitures	Boivin et Lacroix(1990b)
8 juillet 1988	Parc des Laurentides, St-Féréol	Grêle de 0,3 à 2 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
22 juillet 1988	Région de Montréal	Petite grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
28 juillet 1988	Région de Sherbrooke	Grêle de 0,5 à 1,0 cm. 20000\$ de dégâts dans la région de Magog	Boivin et Lacroix(1990b)
3-4-5 août 1988	Sud-ouest du Québec	Grêle de 1 à 6 cm. Aucun dommage rapporté	Boivin et Lacroix(1990b)
13 août 1988	Estrie	Grêle de 1,0 à 1,5 cm.	Boivin et Lacroix(1990b)
14 août 1988	Amos, Rouyn Abitibi	Grêle de 2,5 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
21 août 1988	Sud de Sherbrooke	Petite grêle	Boivin et Lacroix(1990b)
27-28 août 1988	Sud-ouest du Québec	Grêle de 1 cm	Boivin et Lacroix(1990b)
14 sept 1988	St-Hyacinthe	Grêle. Aucun dommage	Boivin et Lacroix(1990b)
21 mai 1995	Saint-Jean-sur-Richelieu, Shawinigan, Lotbinière	Grêle de 1,5 à 2 cm	Vaillancourt & Gaudette (1996)
19 juin 1995	St-Prosper-de-Beauce	Grêle grosseur de balles de golf	Vaillancourt & Gaudette(1996)
6 juillet 1995	Châteauguay, Ste-Monique de Mirabel	Grêle	Vaillancourt & Gaudette (1996)
18 juillet 1995	St-Lin des Laurentides, St-Jacques L'Épiphanie, St-Cyrille, St-Nazaire	Grêle grosseur de balles de golf. Perte de récoltes de plusieurs 100K \$ à St-Lin	Vaillancourt & Gaudette (1996)
23 juillet 1995	Sainte-Foy	Grêle 1 à 1,5 cm	Vaillancourt & Gaudette (1996)
21 avril 1996	Huntingdon	Grêle de 2 cm de diamètre pendant 10 minutes	Vaillancourt (1997)
18 mai 1996	Cadillac (Abitibi)	Grêle grosseur de billes pendant 5 à 10 minutes	Vaillancourt (1997)
5 juin 1996	Abénakis (Estrie)	Grêle de 2 cm avec pannes électriques	Vaillancourt (1997)
8 juillet 1996	Ste-Malachie (Estrie)	Grêlons de 2,5 cm	Vaillancourt (1997)
9 juillet 1996	Sainte-Foy, Québec, Ste-Brigitte de Laval	Grêlons de 1,5 à 2 cm	Vaillancourt (1997)
11 juillet 1996	Saint-Prosper (Trois-Rivières)	Grêlons de 2,5 cm	Vaillancourt (1997)

23-25 juillet 1996	St-Constant, St-Élzéar et Bagotville	Grosneur de balle de golf sauf de 2,5 cm à St-Elzéar le 24	Vaillancourt (1997)
31 juillet 1996	Près d'Ottawa	Grêle grosneur balles de golf	Vaillancourt (1997)
16 août 1996	St-Pierre de Wakefield	Grêle grosneur de billes recouvrant le sol de 1 cm	Vaillancourt (1997)
25 août 1996	Val d'Or, La Malbaie	Grêle de 2 cm	Vaillancourt (1997)

Note *: Cette liste n'est pas exhaustive et a été élaboré à partir des sources et des références disponibles lors de la préparation de l'étude.