

Approvisionnement en eau potable et santé publique : projections climatiques en matière de précipitations et d'écoulements pour le sud Québec

Rapport rédigé pour

L'Institut national de santé publique du Québec

par

Alain Mailhot¹
Sophie Duchesne¹
Guillaume Talbot¹
Alain N. Rousseau¹
Diane Chaumont²

¹INRS-Eau, Terre et Environnement, 490 de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9

²Ouranos, 550 Sherbrooke Ouest, 19^e étage, Montréal (Québec) H3A 1B9

Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau
490, de la Couronne, Québec (Québec) G1K 9A9

Rapport de recherche No R-977

Juin 2008

ISBN : 978-2-89146-566-3

SOMMAIRE

Les changements climatiques (CC) attendus au cours des prochaines décennies entraîneront vraisemblablement une augmentation de la fréquence des situations météorologiques extrêmes, telles les inondations et/ou les périodes de sécheresse. En vue d'identifier les conséquences possibles des CC sur l'approvisionnement en eau potable des municipalités du Québec, deux variables ont été analysées dans ce rapport, à savoir les précipitations et les écoulements mensuels. Ces variables sont deux composantes clés qui détermineront l'évolution future des conditions hydrologiques des eaux de surface. Les résultats issus de simulations de 23 modèles climatiques (modèles de circulation générale) ont été utilisés pour cette analyse. Trois scénarios de gaz à effet de serre (GES) ont été considérés, à savoir les scénarios A2, A1B et B1. L'analyse a porté sur la période 1900-2100. Les tendances statistiques sur cette période ont été analysées et, lorsqu'une tendance significative était détectée, une investigation plus poussée a été réalisée afin de quantifier les variations sur les périodes 1900-2050 et 1900-2100. Quoique la région d'intérêt du présent projet soit la région sud du Québec, les résultats pour l'ensemble du Canada sont présentés, et ce, afin de bien percevoir les tendances nord-sud et est-ouest à l'échelle du pays. Ces projections climatiques ont enfin été examinées à la lumière de leurs impacts potentiels en matière d'approvisionnement en eau potable et diverses pistes de recherche futures sont proposées en conclusion.

L'analyse de tendances des précipitations mensuelles révèle que, pour la région du sud du Québec, la tendance la plus probable pour les mois de janvier, février, mars, avril, novembre et décembre est une tendance à la hausse (sauf pour le scénario B1 pour les mois de février et novembre qui ne subiraient, suivant ce scénario, aucune tendance significative). Les autres mois ne verraient, toujours selon la projection la plus probable, aucune modification de leurs précipitations. L'augmentation moyenne des précipitations mensuelles d'ici 2100, dans la région du sud du Québec, serait de l'ordre de 10 à 20 % pour les mois de janvier à avril (variable selon les scénarios de GES) et de 10 à 15 % pour les mois de novembre et décembre. Les résultats du scénario B1 suggèrent toutefois que les précipitations des mois de février et novembre seraient stationnaires quoique les probabilités d'un régime stationnaire et d'une tendance à la hausse soient très similaires, notamment pour le mois de février. Pour les mois de mai à octobre, on

s'attend à des précipitations mensuelles stationnaires d'ici 2100, pour tous les scénarios de GES analysés.

En ce qui concerne les écoulements mensuels, l'analyse de tendances montre que, pour la région du sud du Québec, la projection la plus probable supporte un scénario d'augmentation des écoulements pendant les mois de janvier, février, mars et décembre pour tous les scénarios de GES, alors que le mois de novembre ne subirait pas de hausse selon le scénario B1 et subirait une tendance à la hausse selon les deux autres scénarios. Pour les autres mois, les probabilités d'un régime stationnaire et d'une baisse des écoulements sont souvent très rapprochées. Dans l'optique où la projection la plus probable est retenue, les mois d'avril, juin, juillet et octobre ne connaîtraient aucune tendance significative alors que les écoulements mensuels pour les mois de mai, août et septembre diminueraient. Il est très important de mentionner cependant que pour les mois d'avril à octobre, les probabilités de tendance à la baisse et de régime stationnaire sont souvent très semblables. On peut donc affirmer qu'aucune tendance nette ne domine pendant ces mois et que, considérant les incertitudes sur ces projections, il demeure possible que l'une ou l'autre de ces projections se réalise effectivement. L'amélioration de la qualité des modèles climatiques et de la représentation hydrologique des processus est ici cruciale pour raffiner ces estimations. Les baisses anticipées d'écoulements mensuels pour les mois de mai, août et septembre varient de 13 % à 27 % à l'horizon 2100 pour les scénarios A1B et A2; le mois appelé à subir la plus forte baisse est le mois d'août avec des diminutions de 23 % (scénario A1B) à 27 % (scénario A2). À noter que, encore ici, les probabilités de tendance à la baisse et de régime stationnaire sont très similaires pour le mois d'août sous le scénario B1 et, de ce fait, la possibilité d'une baisse des écoulements pour ce mois demeure fort vraisemblable. Ces résultats doivent cependant être traités avec une grande circonspection, puisque la capacité des modèles de circulation générale à bien reproduire les écoulements mensuels n'a pas encore été démontrée.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet financé par le consortium Ouranos ainsi que par le ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec.

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	1
2. Approvisionnement en eau potable au Québec : portrait général.....	7
2.1 Usages de l'eau et sources d'approvisionnement.....	7
2.2 Constat général sur la qualité des eaux et principaux enjeux en matière d'eau potable	9
2.3 Vulnérabilité historique des approvisionnements	11
3. Approvisionnement en eau potable et changements climatiques (CC)	15
3.1 Impacts des CC sur l'approvisionnement en eau potable	15
3.2 Indices climatologiques de sécheresse	19
3.3 Quelques études récentes	21
3.4 Adaptation aux changements climatiques et eau potable	26
4. Modélisation du climat : description générale des approches et modèles.....	29
4.1 Modèles climatiques	29
4.2 Simulations climatiques	31
4.3 Scénarios d'émission des gaz à effet de serre (GES).....	33
4.3.1 Famille A1.....	33
4.3.2 Famille A2.....	34
4.3.3 Famille B1.....	35
4.4 Sources d'incertitudes	35
4.4.1 Incertitudes sur les conditions initiales	35
4.4.2 Incertitudes sur les émissions de GES	36
4.4.3 Incertitudes liées à la paramétrisation des modèles.....	36
4.4.4 Variabilité intermodèles et approches multimodèles	37
4.5 Précipitations, sécheresse et changements climatiques	39
4.6 Gestion de la ressource eau et CC	40
5. Projections climatiques : méthodologie.....	43
5.1 Analyse multi-modèles	45
5.2 Grille de référence	46
5.3 Construction des séries de la grille de référence	46
5.4 Estimation des tendances	48
5.5 Estimation des variations aux horizons 2050 et 2100	48
5.6 Combinaison des résultats issus des différentes simulations	49
6. Projections climatiques pour les précipitations mensuelles.....	51
6.1 Tendances.....	51

6.2	Tendances et scénarios de GES.....	57
6.3	Variations sur la période 1900-2100	61
6.4	Analyse des précipitations pour les tuiles du sud du Québec	67
6.4.1	Variations des précipitations à l'horizon 2100	67
6.4.2	Variations des précipitations à l'horizon 2050	72
7.	Projections climatiques pour les écoulements	73
7.1	Tendances.....	73
7.2	Tendances et scénarios de GES.....	79
7.3	Variations sur la période 1900-2100	79
7.4	Analyse des écoulements pour les tuiles du sud du Québec.....	87
7.4.1	Variations des écoulements à l'horizon 2100	87
7.4.2	Variations des écoulements à l'horizon 2050	90
8.	Discussion et conclusion	93
9.	Référence bibliographiques	107
Annexe A -	Méthode d'agrégation des séries et de combinaison des résultats....	119
Annexe B -	Précipitations mensuelles – tendances – scénarios A1B et B1	125
Annexe C -	Précipitations mensuelles – variations moyennes sur la période 1900-2100 - scénarios A1B et B1.....	135
Annexe D -	Écoulements mensuels – tendances – scénarios A1B et B1	145
Annexe E -	Écoulements mensuels – variations moyennes sur la période 1900-2100 - scénarios A1B et B1.....	155

LISTE DES FIGURES

Figure 4.1	Exemples de découpage utilisés par les modèles	31
Figure 4.2	Émission totale de CO ₂ (en gigatonnes par année) pour la période 1990 à 2100 pour les quatre familles de scénarios (a) A1B; (b) A2; (c) B1 et (d) B2 (tiré de IPCC, 2000).	34
Figure 5.1	Identifiants d'une série donnée.....	44
Figure 5.2	Exemple d'une série de pluies mensuelles (modèle CGCM3, membre 3, mois de juillet, scénario de GES A2).....	44
Figure 5.3	Grille de référence	46
Figure 5.4	Exemple d'application de la méthode d'agrégation des séries.....	47
Figure 6.1	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2	53
Figure 6.2	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2	54
Figure 6.3	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2	55
Figure 6.4	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2	56
Figure 6.5	Différentes régions du graphique des ratios $u_1 = p_{B1}/p_{A2}$ et $u_2 = p_{A1B}/p_{A2}$	58
Figure 6.6	Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les précipitations mensuelles pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de janvier à juin	59
Figure 6.7	Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les précipitations mensuelles pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de juillet à décembre.....	60
Figure 6.8	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES A2).....	63
Figure 6.9	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES A2)	64

Figure 6.10	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES A2).....	65
Figure 6.11	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES A2).....	66
Figure 6.12	Tuiles considérées pour l'analyse sur le sud-Québec	67
Figure 6.13	Probabilités de tendances positives, négatives ou d'absence de tendance significatives pour les précipitations sur les tuiles du sud du Québec pour les scénarios (a) B1; (b) A1B; (c) A2	69
Figure 6.14	Probabilités moyennes pour les tuiles du sud du Québec de ne pas détecter de tendances sur la période 1900-2100 pour les trois scénarios de GES considérés	70
Figure 6.15	Variations moyennes sur la période 1900-2100 conditionnellement à l'occurrence des tendances les plus probables sur les tuiles sud-Québec pour les trois scénarios de GES considérés	70
Figure 6.16	Variations moyennes sur la période 1900-2050 conditionnellement à l'occurrence des tendances les plus probables à l'horizon 2100 sur les tuiles sud-Québec pour les trois scénarios de GES considérés.....	72
Figure 7.1	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2	75
Figure 7.2	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2	76
Figure 7.3	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2	77
Figure 7.4	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2	78
Figure 7.5	Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les écoulements mensuels pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de janvier à juin.....	80
Figure 7.6	Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les écoulements mensuels pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de juillet à décembre.....	81
Figure 7.7	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES A2).....	83

Figure 7.8	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES A2)	84
Figure 7.9	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES A2)	85
Figure 7.10	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES A2).....	86
Figure 7.11	Probabilités de tendances positives, négatives ou d'absence de tendances significatives pour les écoulements sur les tuiles du sud du Québec pour les scénarios (a) B1; (b) A1B; (c) A2	89
Figure 7.12	Probabilités moyennes pour les tuiles du sud du Québec de ne pas détecter de tendances pour les écoulements sur la période 1900-2100 pour les trois scénarios de GES considérés.....	91
Figure 8.1	Évolution possible des distributions dans un contexte non stationnaire : a) translation de la distribution (tous les moments de la distribution restent inchangés); b) moyenne inchangée mais augmentation de la variabilité; c) changement de la moyenne et de la variabilité (tiré de Lemmen <i>et al.</i> , 2008)	99
Figure B. 1	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B	127
Figure B. 2	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B	128
Figure B. 3	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B	129
Figure B. 4	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B	130
Figure B. 5	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1	131
Figure B. 6	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1	132

Figure B. 7	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1	133
Figure B. 8	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1	134
Figure C 1	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES A1B).	137
Figure C 2	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES A1B).	138
Figure C 3	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES A1B).....	139
Figure C 4	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES A1B).....	140
Figure C 5	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES B1).....	141
Figure C 6	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES B1)	142
Figure C 7	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES B1)	143
Figure C 8	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES B1)	144
Figure D 1	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B	147
Figure D 2	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B ...	148

Figure D 3	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B	149
Figure D 4	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B	150
Figure D 5	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1	151
Figure D 6	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1	152
Figure D 7	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1	153
Figure D 8	Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1	154
Figure E 1	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES A1B)	157
Figure E 2	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES A1B)	158
Figure E 3	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES A1B)	159
Figure E 4	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES A1B)	160
Figure E 5	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES B1)	161
Figure E 6	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES B1)	162

Figure E 7	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES B1).....	163
Figure E 8	Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES B1).....	164

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1	Liste des simulations utilisées pour l'élaboration des projections climatiques.....	32
Tableau 7.1	Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A2}$, $p_{B1} > p_{A1B}$ ou $p_{A1B} > p_{A2}$ pour les séries des écoulements	82
Tableau 7.2	Variations moyennes relatives en pourcentage des écoulements mensuels pour les tuiles du sud-Québec à l'horizon 2050 et 2100 pour la tendance mensuelle la plus probable	87

1. Introduction

Les changements climatiques (CC) sont dorénavant considérés par plusieurs organisations gouvernementales et internationales comme l'un des enjeux majeurs auxquels nos sociétés sont et seront confrontées au cours des décennies à venir. Ces changements résultent de l'augmentation marquée des gaz à effet de serre (GES), les principaux étant le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), observée depuis le début de l'ère industrielle (pour une présentation simplifiée de l'effet de serre et de l'histoire scientifique de ce concept, voir Grinevald, 1992). En effet, ces modifications climatiques risquent d'avoir des impacts importants sur plusieurs secteurs d'activités et il importe, dans un tel contexte, de s'interroger sur la nature des changements appréhendés, sur les impacts que ces derniers auront dans divers domaines (par exemple forêt, agriculture, érosion des berges, infrastructures urbaines, etc.) et, le cas échéant, sur les mesures envisageables pour permettre une adaptation face à un climat en évolution (Bourque, 2000; Mailhot et Duchesne, 2005; Mailhot *et al.*, 2007b; Bouwer *et al.*, 2007). Ce dernier aspect mérite toute notre attention puisque considérant l'« inertie » de la machine climatique, il est évident qu'une réduction à court terme des concentrations de GES dans l'atmosphère terrestre ne se traduira pas instantanément par un retour à un climat de l'ère préindustrielle.

L'une des conséquences appréhendées des CC, outre une modification des régimes climatiques moyens, est une recrudescence des événements ou situations météorologiques qui, par le passé, se présentaient rarement ou très rarement, que l'on pense, pour les régions sud du Québec, aux événements de fortes pluies ou encore aux périodes sans pluie. Chaque société a, au fil des décennies, voire des siècles, conçu un ensemble d'infrastructures, d'ouvrages de toutes sortes afin d'offrir à ses populations divers services, ou encore afin de les mettre à l'abri de ces divers aléas météorologiques. Le Canada et le Québec ne font pas exception et les différentes villes disséminées sur leur territoire ont conçu et développé des infrastructures et un ensemble de services adaptés aux conditions climatiques moyennes prévalant en ces endroits, mais aussi adaptés aux conditions extrêmes qu'elles ont pu connaître au fil des ans. L'approvisionnement en eau potable des populations constitue l'un de ces services, sans doute l'un de ceux ayant eu historiquement la plus grande incidence (avec

l'évacuation des eaux usées) en matière d'amélioration de la santé publique de nos sociétés.

Les variables climatiques susceptibles d'affecter les volumes disponibles pour l'approvisionnement en eau potable dans un contexte de CC sont la pluviométrie et la température. Ainsi, une modification substantielle des conditions moyennes de pluviométrie (par exemple une diminution des précipitations moyennes telles que celles que connaît la région sud-est de l'Australie depuis une dizaine d'années; voir Stemp-Morlock, 2007), ou encore de la probabilité d'occurrence de périodes sèches de longue durée, aura une incidence sur les volumes d'eau disponibles pour l'approvisionnement en eau potable. Une augmentation des températures affectera aussi le bilan hydrologique. De tels changements auront une incidence sur les volumes d'eau disponibles mais aussi sur la qualité globale des eaux brutes disponibles, que ce soit suite à l'augmentation de la température de ces eaux, de la diminution du pouvoir de dilution ou encore de toute autre modification physico-chimique susceptible d'affecter les volumes et la qualité des eaux servant de sources d'alimentation, qu'elles soient de surface ou souterraines (de Loë *et al.*, 2001; Rousseau *et al.*, 2004; Mehdi *et al.*, 2006; Bourque, 2000; Environnement Canada, 2004a; Scibek et Allen, 2006). D'autres impacts qui rendront inopérantes diverses composantes des systèmes en place sont aussi possibles, que l'on pense au cas où, suite à une baisse des niveaux d'eau aux sites de prélèvements, les prises d'eau se trouveraient trop près de la surface, diminuant la capacité de prélèvement. Un tel scénario a d'ailleurs déjà été analysé pour les prises d'eau localisées dans le fleuve Saint-Laurent (Carrière *et al.*, 2007). De même, toute modification des conditions hydrauliques d'écoulement pourra avoir une incidence sur la qualité des eaux brutes, par exemple si les panaches émanant des ouvrages de diffusion des eaux usées après traitement sont déviés de leur trajectoire initiale et croisent sur leur parcours une prise d'eau potable située plus en aval.

Advenant donc une modification significative des régimes pluviométriques, modifications vers un régime plus sec ou plus propice à des périodes de sécheresse, les systèmes de production et de distribution d'eau potable seront confrontés à des situations inhabituelles, voire exceptionnelles pour lesquelles ils n'ont pas été conçus. De telles situations augmenteront le niveau de stress global imposé à ces systèmes et placeront

nos sociétés dans une position de plus grande vulnérabilité face à ces aléas. Enfin, la question de l'approvisionnement en eau potable représente un enjeu de santé publique, que l'on songe, pour s'en convaincre, aux risques que ferait peser une interruption de service prolongée ou une défaillance des installations de traitement d'eau potable.

Bien que l'un des scénarios d'évolution climatique susceptible d'avoir un impact sur l'approvisionnement en eau potable soit celui évoqué au paragraphe précédent (réduction de la pluviométrie), d'autres scénarios envisageables risquent d'avoir un impact sur la qualité des eaux brutes utilisées pour la production d'eau potable. Une augmentation de la pluviométrie pourra incidemment affecter la qualité des eaux aux sites de prélèvement lorsque plusieurs ouvrages de surverse de réseaux d'égout unitaires sont localisés près d'une prise d'eau (Mailhot *et al.*, 2007b). Plusieurs auteurs soulignent par ailleurs le lien entre une possible recrudescence des maladies d'origine hydrique dans un contexte futur où les précipitations seront plus abondantes, les inondations plus fréquentes, les sécheresses plus sévères et les températures plus élevées (Charron *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2005). Patz *et al.* (2000), dans un article rendant compte des travaux d'un comité américain dont l'objectif était d'analyser les possibles impacts des CC en matière de santé publique, précisent qu'une détérioration de la qualité des eaux est susceptible de survenir suite à une modification, notamment, des régimes pluviométriques et des températures, favorisant une recrudescence des maladies d'origine hydrique.

Ces quelques exemples montrent l'importance d'établir et d'analyser, même sur une base préliminaire, les projections climatiques actuelles pour le sud du Québec et de voir, à la lumière de ces projections, s'il y a lieu de pousser plus loin l'analyse des impacts que de possibles modifications au climat risquent d'avoir sur les systèmes d'approvisionnement en eau potable, et plus généralement sur la santé publique. Le présent mandat, confié à l'INRS-Eau, Terre et Environnement par l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ), bien que s'inscrivant dans le cadre plus large des enjeux liés aux CC et de leurs impacts en matière de santé publique, s'intéresse plus spécifiquement à la problématique de l'approvisionnement en eau potable. Une série de projections climatiques de certaines variables susceptibles d'avoir une incidence sur les volumes et la qualité des eaux disponibles est élaborée. Les objectifs initiaux du projet

visaient à identifier les variables et indices climatiques conditionnant les étiages et voir comment ces variables et indices seront modifiés en climat futur. Il est toutefois apparu assez rapidement qu'il serait beaucoup plus intéressant de considérer le plus grand nombre de simulations et modèles climatiques possibles et de procéder à une analyse plus globale (tant en matière d'échelle spatiale que temporelle) plutôt que de procéder à une analyse plus fine sur la base des résultats d'un seul ou de quelques modèles climatiques (notamment pour des indices hydriques associés aux étiages).

L'accent a donc été mis sur l'élaboration de projections climatiques des variables sélectionnées qui permettent d'apprécier l'évolution future de celles-ci, mais aussi la variabilité des projections selon les différents modèles. En effet, l'expérience acquise en matière de simulations climatiques montre que, même pour des variables réputées plus « simples » à modéliser, les résultats issus de différents modèles sont parfois très différents. On parle alors de variabilité intermodèle des résultats qui, selon plusieurs auteurs, constitue la plus grande source d'incertitudes sur les projections climatiques (voir par exemple Frei *et al*, 2006 et Tebaldi et Knutti, 2007). La stratégie utilisée pour rendre compte de cette variabilité intermodèle consiste à « regrouper » les résultats de plusieurs modèles (plusieurs approches ont été proposées à cet effet; voir Tebaldi et Knutti, 2007; une discussion plus approfondie de toute cette question des incertitudes sur les projections climatiques et de l'analyse multimodèle est présentée au chapitre 4).

Deux variables ont été considérées comme indicateurs climatiques des tendances futures des conditions d'écoulement : les précipitations mensuelles et les écoulements mensuels tels que simulés par les modèles climatiques. Il est toutefois possible de concevoir plusieurs indicateurs climatiques, sans doute mieux corrélés aux régimes d'écoulement, en général, et au régime d'écoulement en conditions d'étiage, en particulier. Le choix des variables de précipitations et d'écoulements mensuels repose essentiellement sur le fait que des résultats de simulations provenant de plusieurs modèles globaux sont actuellement disponibles pour ces variables. Par ailleurs, puisque ces modèles utilisent une représentation discrétisée, c'est-à-dire découpée, du territoire (par exemple, des tuiles de dimension $2,8^\circ \times 2,8^\circ$ pour l'une des versions du CGCM3) et un pas de temps fini, ils sont plus aptes à représenter les variables simulées à des

échelles temporelles plus grandes, d'où la sélection de l'échelle mensuelle plutôt que l'échelle journalière, par exemple.

L'aptitude des modèles climatiques à simuler la variable d'écoulement est toutefois très discutable, compte tenu des représentations très différentes du cycle hydrologique utilisées par les différents modèles et de leurs échelles spatiales et temporelles qui sont très différentes des échelles caractéristiques des processus hydrologiques (Thomas et Henderson-Sellers, 1990; Sushama *et al.*, 2004; Sushama *et al.*, 2006; Graham *et al.*, 2007b). Les modèles hydrologiques de surface intégrés aux modèles globaux reposent donc sur une représentation très « grossière » du territoire et une version simplifiée des processus hydrologiques. Cette variable a tout de même été retenue mais l'examen des résultats et leur interprétation doivent se faire en gardant en tête ces limites et incertitudes.

Les projections climatiques ont été élaborées en utilisant des résultats de simulations pour l'ensemble du Canada (et la partie nord des États-Unis) provenant de 23 modèles globaux du climat. Les résultats de plusieurs simulations sont disponibles pour chaque modèle, chaque simulation provenant d'un jeu de conditions initiales différentes et/ou de scénarios d'évolution des concentrations des GES différents (voir chapitre 4, section 4.3). Trois scénarios de GES ont été considérés : B1 (réduction des émissions de GES à l'horizon 2100), A1B (stabilisation des émissions à l'horizon 2100) et A2 (poursuite de la croissance des émissions à l'horizon 2100). Une période d'analyse commune a été définie pour toutes ces simulations, à savoir la période 1900 – 2100. Les tendances statistiques sur cette période ont été analysées et, lorsqu'une tendance significative était détectée, une investigation plus poussée a été réalisée afin d'estimer les variations sur les périodes 1900-2050 et 1900-2100. Quoique la région d'intérêt du présent projet soit la région sud du Québec, les résultats pour l'ensemble du Canada sont présentés, et ce, afin de bien percevoir les tendances nord-sud et est-ouest à l'échelle du pays. Ces projections climatiques ont enfin été examinées à la lumière de leurs impacts potentiels en matière d'approvisionnement en eau potable et diverses pistes de recherche futures sont proposées en conclusion.

Le présent rapport est structuré comme suit. Le chapitre 2 présente un portrait général de la situation en matière d'eau potable au Québec et discute notamment de la vulnérabilité historique des approvisionnements en regard des aléas climatiques. Le chapitre 3, pour sa part, s'intéresse plus spécifiquement à la question des systèmes d'eau potable et des CC, identifiant les impacts que ces derniers sont susceptibles d'avoir et donnant quelques exemples d'études récentes visant à quantifier ces impacts à la lumière des projections climatiques disponibles. Le chapitre 4 aborde le thème de la modélisation climatique, présente les principaux types de modèles disponibles et discute de plusieurs concepts et enjeux importants, en particulier la question des incertitudes en modélisation climatique. Le chapitre 5 donne une description de la méthode utilisée. Les chapitres 6 et 7 présentent respectivement les résultats pour les précipitations mensuelles et les écoulements. Les implications en matière d'approvisionnement en eau potable et de santé publique des projections climatiques proposées sont enfin discutées au chapitre 8. Les limites et les hypothèses de base sous-tendant l'approche utilisée sont aussi reprises et analysées. Une série de propositions est enfin formulée quant aux travaux futurs à envisager dans la foulée des conclusions du présent rapport.

2. Approvisionnement en eau potable au Québec : portrait général

Le présent chapitre présente un portrait global de la situation en matière d'approvisionnement en eau potable au Québec. Quelques données relatives aux sites d'approvisionnement et aux consommations associées aux différents types d'usages sont présentées à la section 2.1. La section 2.2 précise les grands enjeux actuels en matière d'eau potable au Québec afin de mieux positionner la problématique des changements climatiques. Enfin, la section 2.3 présente les résultats de diverses études visant à déterminer la vulnérabilité des sites d'approvisionnement actuels en eaux de surface en regard des épisodes d'étiage passés.

2.1 Usages de l'eau et sources d'approvisionnement

Le Québec possède 3 % des ressources d'eau douce renouvelable de la planète (Gouvernement du Québec, 1997), alors qu'à peine 0,1 % de la population mondiale vit sur ce territoire. Ces ressources sont utilisées pour divers usages, qui peuvent être classés selon qu'il s'agit d'usages sur place ou d'usages avec prélèvements.

Les usages sur place comprennent principalement la production hydroélectrique et les activités récréatives, lesquelles peuvent être à contact direct (ex. baignade, planche à voile, ski nautique, plongée sous-marine, etc.) ou indirect (ex. canotage, kayak, camping, chasse, randonnée, observation, etc.) (Rousseau *et al.*, 2004). La stabilité des écoulements s'avère primordiale pour chacun des ces usages, de même que la qualité de l'eau.

Quant aux usages avec prélèvements, ils sont classés selon qu'ils sont de types municipaux, agricoles ou industriels. Au Québec, en 1996, 43 % des prélèvements d'eau douce servaient aux usages municipaux, 3 % à l'agriculture et 54 % au secteur industriel (Environnement Canada, 2004b). Selon Environnement Canada (2005), 56 % des prélèvements municipaux au Québec alimentent le secteur résidentiel, 25 % les secteurs commercial et industriel, tandis qu'environ 19 % du volume prélevé par les municipalités seraient perdus dans les réseaux de distribution. On estime que 69 %

des prélèvements industriels au Québec sont destinés au secteur des pâtes et papiers (MENV, 2002).

Le dernier *Bilan de la qualité de l'eau potable*, publié par le MDDEP (2004), précise qu'environ 88 % de la population québécoise s'approvisionne en eau potable à partir d'un réseau de distribution, tandis que 12 % s'approvisionne à partir d'une installation individuelle de captage (puits privé). La proportion de la population desservie par des installations individuelles est particulièrement élevée dans les régions de l'Abitibi-Témiscamingue, de l'Estrie, du Centre-du-Québec, de l'Outaouais, du Bas-Saint-Laurent et de Chaudière-Appalaches, tandis qu'elle est très faible dans les régions fortement urbanisées.

Parmi les personnes s'alimentant à partir d'un réseau, près de 95 % sont desservies par un réseau municipal; les réseaux privés et les établissements touristiques, généralement de petite taille, sont néanmoins présents en très grand nombre sur le territoire. Parmi les réseaux municipaux, 44 % utilisent une eau de surface (lacs, rivières et/ou fleuve), tandis que 51 % des réseaux s'approvisionnent en eau souterraine et que 4 % puisent dans ces deux sources à la fois; on parle alors d'eaux mixtes. Les réseaux s'alimentant en eau de surface desservent à eux seuls plus de 5,3 millions de personnes au Québec, soit plus de 70 % de la population québécoise. Parmi ces réseaux, la source d'approvisionnement la plus importante est le fleuve Saint-Laurent, qui dessert environ 2,4 millions de personnes (MDDEP, 2004).

En 2001, le volume d'eau moyen distribué par les réseaux municipaux a été évalué à 395 L/personne/j (L/p/j) pour le secteur résidentiel et à 777 L/p/j pour l'ensemble des secteurs municipaux (Environnement Canada, 2005). Le volume d'eau distribué varie considérablement d'une municipalité à l'autre au Québec, pouvant aller d'environ 300 à 820 L/p/j selon Brière (1998) ou de 250 à 700 L/p/j selon les analyses de Nantel (2006). On note même une production d'eau potable d'environ 1 100 L/p/j à Montréal en 2000 (PricewaterhouseCoopers, 2002). Pour la consommation résidentielle seulement, la valeur de référence est fixée à 250 L/p/j au Québec (MDDEP, 2006). En plus de satisfaire cette consommation résidentielle, les municipalités produisent de l'eau potable pour l'arrosage des pelouses et jardins, le remplissage des piscines, la protection contre les incendies, le lessivage des conduites, etc. À cela s'ajoutent également les pertes

pouvant survenir en réseau de distribution. La consommation en eau potable du Québec est l'une des plus élevées au monde. À titre de comparaison, en France la consommation moyenne en milieu urbain est de 210 L/p/j (150 L/p/j pour les usages domestiques) (SIARL, 2007). L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) recommande un minimum de 20 à 40 L/p/j (Burke *et al.*, 2001).

2.2 Constat général sur la qualité des eaux et principaux enjeux en matière d'eau potable

Globalement, le Québec ne prélève que 0,5 % du volume d'eau disponible sur son territoire (incluant la portion renouvelable des eaux souterraines associée à la recharge), comparativement à 1,6 % au Canada et 11 % pour les pays membres de l'OCDE (Gouvernement du Québec, 1997). Malgré cette abondance relative d'eau douce renouvelable au Québec, sa répartition géographique ainsi que sa distribution dans le temps peuvent entraîner des problèmes d'approvisionnement en eau potable en période de fort étiage (ex. pour les municipalités s'alimentant dans la rivière des Mille-Îles), ou de fortes demandes, ou encore dans certaines régions côtières où la géologie est peu favorable à l'accumulation de réserves d'eau douce (ex. les municipalités isolées de la Basse-Côte-Nord). On sait également que la population du Québec est concentrée en majeure partie dans des zones urbanisées relativement petites, où les approvisionnements en eau peuvent être soumis à de fortes sollicitations.

La concentration des activités a non seulement pour effet de condenser la demande en eau sur quelques bassins versants, mais peut également conduire à des conflits d'usage liés à la qualité de l'eau, ce qui peut, dans certains cas, compromettre l'approvisionnement en eau potable. En effet, bien que la qualité des eaux des parties amont des principaux bassins versants qui alimentent le fleuve soit de bonne qualité (Gouvernement du Québec, 1997), on constate dans certains bassins versants du Québec des problèmes d'approvisionnement en eau de bonne qualité qui résultent de l'utilisation du territoire et des usages de l'eau sur ce territoire (Rousseau *et al.*, 2004). On peut penser, à titre d'exemple, aux problèmes d'eutrophisation et de contamination bactériologique causés par des pollutions d'origines urbaine, industrielle, piscicole ou agricole des eaux de surface. La problématique des cyanobactéries, qui occupe de plus en plus l'avant-scène médiatique depuis quelques années, est un exemple de ce type

de contamination, qui peut entraver l'approvisionnement en eau potable de façon ponctuelle dans certaines régions (pour plus de renseignements à cet effet, voir Lavoie *et al.*, 2007). On dénote également dans certaines rivières des problèmes de contamination toxique d'origine industrielle. Dans le fleuve Saint-Laurent, la qualité des eaux est, en général, considérée de satisfaisante à bonne (Gouvernement du Québec, 1997). Toutefois, certains secteurs subissent une contamination toxique d'origine industrielle qui se retrouve surtout dans les sédiments et les organismes aquatiques (Rousseau *et al.*, 2004).

Quant à la qualité des eaux souterraines, elle est généralement bonne au Québec, bien que des problèmes de contamination toxique d'origine naturelle soient observés dans certaines régions (ex. arsenic en Abitibi, fluor à Maria, baryum en Montérégie; Gouvernement du Québec, 1997). La détérioration de la qualité des eaux souterraines en milieu rural, causée par la pollution diffuse d'origine agricole, contribue aussi à limiter l'approvisionnement en eau potable à partir de puits individuels dans certaines régions (Rousseau *et al.*, 2004).

Rousseau *et al.* (2003) rapportent, suite à une revue de presse des grands quotidiens québécois, que les problématiques de pénurie d'eau ou d'anomalies des approvisionnements des municipalités québécoises semblent avoir pris de l'ampleur depuis le début des années 90. Ainsi, un bris accidentel d'infrastructures, une fuite dans un réseau, une trop forte demande ponctuelle ou une faible pluviométrie peuvent être à l'origine d'interdictions d'arrosage, de lavage des automobiles ou de remplissage des piscines, alors qu'une contamination de la source d'eau potable par un fertilisant, un pesticide ou tout autre agent pathogène peut être à la source d'avis d'ébullition ou d'interdiction de boire.

Selon la dernière étude publiée par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs au sujet de la qualité de l'eau potable (MDDEP, 2004), 80 % des réseaux de distribution d'eau potable au Québec n'ont connu aucun dépassement des normes bactériologiques, sur une base annuelle, de 1995 à 2000. L'eau potable distribuée à la grande majorité de la population s'est donc avérée de bonne qualité au regard des paramètres bactériologiques mesurés. La catégorie des

réseaux desservant 1 000 personnes et moins est celle qui a connu les dépassements les plus élevés.

Notons enfin que le nouveau *Règlement sur la qualité de l'eau potable*, adopté en 2001, contient des normes et des exigences plus strictes qu'auparavant relativement au contrôle de la qualité de l'eau (plus grand nombre de paramètres contrôlés, normes plus sévères pour plusieurs des paramètres déjà contrôlés, fréquence des contrôles plus élevée). Ce règlement impose également des traitements minimaux de l'eau de même que la reconnaissance de la compétence des opérateurs. Il s'agit d'éléments qui nécessiteront, dans certains cas, des efforts financiers importants, mais qui permettront une amélioration significative de la qualité de l'eau potable distribuée au Québec.

2.3 Vulnérabilité historique des approvisionnements

Tel que discuté précédemment, bien que les ressources d'eau douce renouvelables soient globalement abondantes au Québec, certaines régions peuvent faire face à des pénuries d'eau potable (ponctuelles ou continues) à cause de problèmes d'accessibilité, de dégradation de la qualité des eaux brutes ou encore en période de fort étiage et/ou de forte demande. Ainsi, certaines municipalités, telles que la ville de Québec (rivière Saint-Charles) et la ville de Rosemère (rivière des Milles-Îles), ont connu au cours des étés 2001 et 2002 des problèmes d'approvisionnement en eau en périodes de fort étiage (Rousseau *et al.*, 2004). Dans le cas de la rivière Saint-Charles, les prélèvements journaliers peuvent représenter près de la totalité des débits en période d'étiage (98 % selon Slivitzky, 1998). Au début de septembre 2002, on pouvait constater à Québec une baisse inquiétante de plus d'un mètre par rapport à la cote normale du niveau du lac Saint-Charles, site d'approvisionnement pour quelque 240 000 habitants de la ville (Radio-Canada, 2002). Une ancienne station de pompage a même dû être remise en opération au coût de 2,5 millions de dollars à Québec au cours de l'été 2002. La sécheresse de l'année 2001-2002 fut l'un des événements climatiques extrêmes le plus coûteux pour le Canada, son coût ayant été estimé à 5 milliards de dollars (Ouranos, 2004; pour fin de comparaison, les coûts associés à la tempête de verglas de 1998 ont été estimés à 5,4 milliards de dollars; Lemmen *et al.*, 2008). Parmi les coûts résultant de cette sécheresse, on peut noter, à titre d'exemple, la perte de production agricole et animale, la diminution de la production hydroélectrique et les coûts d'adaptation des

systèmes d'approvisionnement en eau potable (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2005). L'été 2005 fut également particulièrement éprouvant pour l'alimentation en eau potable au sud du Québec. Les villes de Gatineau, secteur Aylmer (Duquette, 2005), Le Bic (Thériault, 2005), Laval (Champagne, 2005) et Shawinigan (Montminy, 2005) ont notamment connu des situations problématiques au cours de cette saison. D'un point de vue plus général, environ 26 % des municipalités dotées de réseaux d'aqueduc au Canada ont connu des pénuries d'eau de 1994 à 1999 (Marsalek *et al.*, 2004). Parmi les causes évoquées, mentionnons les pénuries saisonnières durant les périodes de sécheresse, l'accroissement de la consommation et le vieillissement des infrastructures. En effet, des réseaux vétustes et mal entretenus peuvent conduire à des volumes de perte plus importants ainsi qu'à une fréquence accrue des arrêts d'approvisionnement pour cause de bris de conduites.

La vulnérabilité historique des sources municipales d'approvisionnement en eau potable au Québec a été étudiée par Carrière *et al.* (2007), pour les municipalités puisant leur eau dans le fleuve Saint-Laurent, ainsi que par Nantel (2006) et Bérubé (2007), pour les municipalités s'alimentant à partir de sources d'eau de surface autres que le fleuve (lacs et rivières). Carrière *et al.* (2007) se sont intéressés plus spécifiquement à l'analyse des niveaux d'eau critiques pouvant rendre les prises d'eau municipales inopérantes. L'étude a été réalisée pour trente stations de traitement d'eau potable (STEP) puisant leur eau dans le fleuve Saint-Laurent, entre Akwesasne et Bécancour (incluant Montréal). Des 30 STEP étudiées, trois ont été identifiées comme vulnérables aux conditions des 100 dernières années. Les niveaux critiques pour les trois STEP les plus vulnérables correspondent à des débits journaliers de récurrence 3, 5 et 16 ans. Ceci signifie donc que, selon les conditions observées au cours des 100 dernières années, ces STEP pourraient faire face à des problèmes d'approvisionnement à cause de niveaux d'eau trop bas dans le fleuve, en moyenne à tous les 3, 5 et 16 ans respectivement.

Quant à Nantel (2006) (voir aussi Nantel *et al.*, 2005), elle s'est intéressée à identifier les municipalités et les sites d'approvisionnement en eau potable les plus vulnérables au Québec, s'alimentant à partir d'eau de surface excluant le fleuve. Pour cette analyse, un site d'approvisionnement était considéré vulnérable si un débit équivalant à 15 % du débit d'étiage Q_{2-7} (débit d'étiage sur sept jours consécutifs ayant une période de

réurrence de deux ans) était comparable au volume quotidien moyen prélevé pour l'approvisionnement en eau potable. Au Québec, l'indice d'étiage Q_{2-7} est généralement employé par les agences gouvernementales afin de préserver les habitats écologiques en aval des prises d'eau. *Le Guide de conception des installations de production d'eau potable* (MDDEP, 2006) mentionne que le débit maximum pouvant être prélevé d'une source d'eau de surface non régularisée (capacité d'approvisionnement) correspond à 15 % du Q_{2-7} . La valeur ainsi obtenue est, par définition, la capacité de la source d'approvisionnement au point de prélèvement. Cette base de calcul est issue de l'article 17 du *Règlement sur les habitats fauniques* (Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune).

Seules dix municipalités répondaient aux critères de sélection de Nantel (2006) et ont donc été retenues pour l'étude¹. La comparaison de la demande en eau de ces dix municipalités, avec les résultats de l'analyse statistique des débits mesurés dans les lacs ou rivières où ces municipalités puisent leur eau, a permis à Nantel (2006) d'identifier quatre municipalités, parmi les dix retenues, particulièrement vulnérables aux débits d'étiage. Pour une de ces municipalités, la demande moyenne en eau correspond au débit d'étiage sept jours se produisant en moyenne tous les cinq ans. Les périodes de retour critiques pour le débit d'étiage sur sept jours des trois autres municipalités identifiées se situent entre dix et vingt ans. Les résultats de cette analyse indiquent que les périodes d'étiage historiques peuvent avoir compromis les besoins d'alimentation en eau potable de ces municipalités à plusieurs reprises au cours des dernières décennies.

En recourant à la technique d'analyse régionale pour reproduire les débits historiques dans les cours d'eau où des mesures de débits n'étaient pas disponibles, Bérubé (2007) a pu reprendre le même type d'analyse sur un plus grand nombre de réseaux. Tout comme pour Nantel (2006), seules les prises d'eau alimentant des réseaux d'aqueduc municipaux à partir d'eau de surface (autre que le fleuve) ont été considérées. Au total, 122 réseaux municipaux ont été retenus pour l'étude, ces réseaux alimentant une population de 1,2 million de personnes, soit 16 % de la population du Québec en 2005. Sur les 122 réseaux étudiés, Bérubé (2007) a identifié sept systèmes municipaux présentent un Q_{2-7} inférieur au volume d'eau moyen distribué.

¹ Les critères comprenaient notamment la disponibilité de mesures de débit en continu sur au moins dix ans à 10 km maximum de la prise d'eau, une seule source d'alimentation par municipalité, etc.

L'ensemble de ces résultats indique que, même en présence de ressources en eau globalement abondantes au Québec, certaines municipalités peuvent faire face à des problèmes d'approvisionnement en eau potable lors de périodes d'étiage. Ces problèmes peuvent provenir soit d'un débit insuffisant pour assurer à la fois un approvisionnement en eau adéquat et la protection des habitats aquatiques ou soit de niveaux d'eau trop faibles pour permettre le fonctionnement des prises d'eau. Les CC anticipés au cours des prochaines décennies pourraient exacerber certaines de ces situations critiques, comme nous le verrons plus en détail aux chapitres suivants.

3. Approvisionnement en eau potable et changements climatiques (CC)

La littérature scientifique traitant de la question des CC et de leurs possibles impacts sur la disponibilité des ressources en eau pour fin d'approvisionnement en eau potable est déjà abondante et s'accroît sans cesse. Le présent chapitre entend aborder cette question et donner un aperçu des principaux enjeux, mettant l'accent sur les impacts appréhendés au Canada et au Québec (section 3.1). La section 3.2 décrit divers indices de sécheresse proposés dans la littérature alors que la section 3.3 présente les résultats d'études récentes portant sur l'estimation des impacts hydrologiques des CC et sur l'analyse des impacts en matière d'approvisionnement en eau. Enfin, la section 3.4 traite de la question de l'adaptation aux CC.

3.1 Impacts des CC sur l'approvisionnement en eau potable

L'observation des températures à l'échelle mondiale révèle que la température moyenne du globe a augmenté d'environ 0,6 à 0,9 °C depuis le XIX^e siècle (IPCC, 2007). Onze des douze dernières années (1995-2006) se retrouvent parmi les douze années les plus chaudes à l'échelle planétaire depuis 1850, date du début des enregistrements de température globale de surface (IPCC, 2007). Des indicateurs indirects, tels par exemple le retrait des glaciers et la hausse du niveau de la mer, confirment le réchauffement observé. Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (IPCC, 2007), le réchauffement observé depuis le milieu du XX^e siècle serait *très probablement* (niveau de confiance supérieur à 90 %) attribuable à l'augmentation de la concentration des GES d'origine anthropique dans l'atmosphère. L'accroissement de la température globale prévue au cours du prochain siècle varie de 1 à 6 °C, selon les modèles climatologiques et les scénarios d'augmentation de GES pris en compte (IPCC, 2007). Tous les modèles s'accordent pour avancer que les variabilités régionales de cette augmentation seront élevées.

L'accroissement global des températures aura des répercussions significatives sur plusieurs autres composantes du climat, dont notamment le cycle hydrologique (Leavesley, 1994). En effet, la modification du mouvement des masses d'air, causée par leur réchauffement, combinée aux changements du taux d'humidité de l'air,

provoqueront des modifications significatives des régimes pluvieux dans plusieurs régions. Les experts du climat s'entendent par ailleurs pour affirmer que l'amplitude des événements extrêmes devrait subir des variations plus importantes que les moyennes (mensuelles ou saisonnières) de précipitations (ex. Emori et Brown, 2005). Ces modifications du cycle hydrologique se traduiront par une fréquence et une amplitude accrues des événements extrêmes, tels que crues éclair, tornades, ouragans ou sécheresses. Les événements extrêmes de précipitations et de canicule pourraient donc survenir plus fréquemment dans le futur (Francis et Hengeveld, 1998). L'ampleur et la nature exacte des changements futurs restent à quantifier, mais l'observation des précipitations au cours du XX^e siècle révèle déjà que le réchauffement global de la planète s'accompagne d'une modification des distributions spatiale et temporelle des précipitations (de très nombreuses études se sont intéressées à analyser les tendances passées en matière de précipitations; voir par exemple Groisman *et al.*, 2005, Tebaldi *et al.*, 2006; Groisman *et al.*, 1999; pour le Canada, voir Vincent et Mekis, 2006 et Zhang *et al.*, 2000). Ceci signifie que les CC pourront engendrer, selon les régions du globe, une augmentation ou une réduction des précipitations moyennes, accompagnée d'une intensification des périodes de pluie intense et/ou de sécheresse prolongée.

La plupart des modèles semblent indiquer des changements importants dans les précipitations aux hautes latitudes de l'hémisphère nord au cours des prochaines décennies (Giorgi *et al.*, 2001a, b; IPCC, 2007; Meehl *et al.*, 2006), ce qui pourrait se traduire, selon Ressources naturelles Canada (2004), par une diminution des débits en été et une augmentation en hiver, dans de nombreuses régions du Canada. Cependant, les résultats de nombreux travaux de recherche concernant les impacts des CC laissent entrevoir que les plus importants défis seront liés à l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes tels que les inondations, les sécheresses, les vagues de chaleur et les tempêtes (Ressources naturelles Canada, 2004). La modification des séquences d'orages et de périodes sèches sont les changements qui entraîneront le plus d'impact sur les processus hydrologiques (Fowler et Kilsby, 2007).

L'ensemble des modèles climatiques mondiaux laissent prévoir une augmentation de l'assèchement des zones situées à l'intérieur du continent nord-américain en été et un risque de sécheresse connexe (Bonsal *et al.*, 2004). Le risque de sécheresse accru est

attribué à l'accroissement des températures et de l'évaporation potentielle non compensée par des précipitations (Watson *et al.*, 2001). Ceci signifie que des températures plus chaudes pourront causer des réductions de débits même en présence d'augmentation des précipitations, ce qui a déjà été démontré dans plusieurs études (voir à titre d'exemple Merritt *et al.*, 2006). Smith *et al.* (2001) estiment par ailleurs que les périodes intenses de canicule surviendront plus fréquemment au Québec en climat futur.

Il est intéressant de noter qu'outre les modifications de températures et de précipitations, la variation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère a un impact sur l'évapotranspiration des plantes, ce qui peut contribuer à modifier le régime hydrologique dans certaines régions. En effet, Chaplot (2007) mentionne que, toutes choses étant égales par ailleurs, on observe une réduction de l'évapotranspiration chez certaines espèces de plantes avec une augmentation des concentrations en CO₂. Cependant, cet effet peut être contrebalancé par la stimulation photosynthétique causée par une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'air, qui, elle, a pour effet d'accroître l'évapotranspiration. Gedney *et al.* (2006) vont même jusqu'à attribuer l'augmentation des débits de ruissellement sur les continents au cours du XX^e siècle à une réduction de la transpiration des plantes (à cause de l'augmentation du CO₂) plutôt qu'aux changements climatiques ou à la déforestation! De telles considérations montrent toute la complexité de l'évaluation des impacts possibles d'un accroissement des GES sur l'hydrologie des eaux de surface, et plus généralement sur la disponibilité de cette ressource.

Durant les 30 à 50 dernières années, le débit moyen des cours d'eau a diminué dans plusieurs régions du Canada, surtout au sud et particulièrement en août et septembre (Zhang *et al.*, 2001; George, 2007). On prévoit que cette tendance se poursuivra sous l'effet des CC (Ressources naturelles Canada, 2004). Certaines études prévoient que les modifications du climat appréhendées entraîneront, selon toute vraisemblance vers 2050, une augmentation des écoulements des principaux tributaires du Saint-Laurent durant les mois d'hiver (novembre à mars) et une diminution des écoulements durant les mois d'été (juillet à octobre) (Environnement Canada, 1997 et 1998; Bruce *et al.*, 2000; MENV, 2000).

Ainsi, on s'attend à ce que les CC entraînent des impacts significatifs sur les sources d'eau potable du sud du Canada. Parmi les répercussions anticipées, on note notamment une diminution des réserves d'eaux souterraines ainsi qu'une réduction des débits et des niveaux des lacs et des cours d'eau, mais également une augmentation de la demande en période de pointe, due au réchauffement de l'air, à des répercussions sur l'eau distribuée en réseau (ex. apparition de bactéries en réseau suite au réchauffement de l'eau) et à une dégradation générale de la qualité des eaux brutes (Marsalek *et al.*, 2004). En effet, l'augmentation possible des déversements de réseaux d'égout unitaires en période de pluie (conséquence d'une augmentation globale du nombre d'événements de précipitations), le réchauffement de l'eau ainsi que la réduction du pouvoir de dilution causée par une baisse des débits sont autant de facteurs qui pourront se combiner pour altérer les propriétés physico-chimiques de l'eau des lacs et des rivières. Sur le bassin des Grands-Lacs et du fleuve Saint-Laurent plus spécifiquement, Moulton et Cuthbert (2000) considèrent que les principaux impacts des CC sur l'approvisionnement en eau potable sont : 1) une détérioration de la qualité de l'eau en certains points d'approvisionnement; 2) une diminution de la capacité de certaines prises d'eau situées trop près de la surface; 3) une diminution de la recharge des aquifères situés près des Grands-Lacs; et 4) une remontée du front salin dans l'estuaire du fleuve Saint-Laurent.

La diminution des débits en été (mentionnée par Environnement Canada, 1997 et 1998; Bruce *et al.*, 2000; Mortsch *et al.*, 2000; MENV, 2000; et Loukas *et al.*, 2002, qui indiquent aussi une tendance à la diminution des écoulements en été pour la partie ouest du pays) pourrait augmenter la fréquence des situations problématiques pour les municipalités qui s'alimentent en eau de surface à partir du fleuve et de ses tributaires (Ouranos, 2004). Également, une diminution de la hauteur d'eau au-dessus des ouvrages de captage d'eau pourrait occasionner des problèmes d'approvisionnement pour les prises d'eau situées dans l'axe du fleuve Saint-Laurent. Selon les travaux de Carrière *et al.* (2007), trois sites d'approvisionnement en eau potable, outre ceux déjà identifiés comme vulnérables face aux conditions climatiques actuelles, deviendraient vulnérables advenant une baisse d'un mètre du niveau d'eau du lac Saint-Louis.

La vulnérabilité d'un système d'approvisionnement dépend de sa sensibilité face aux CC et de la capacité d'adaptation de ses installations (c'est-à-dire de la facilité selon laquelle

ses installations peuvent être modifiées pour faire face aux CC), mais également de la flexibilité des organisations responsables de la gestion de ces systèmes. Par ailleurs, un système ayant déjà connu par le passé des conditions climatiques ayant entraîné des problèmes d'approvisionnement sera, vraisemblablement, plus susceptible d'être affecté par les nouvelles conditions climatiques. Les impacts des CC sur les systèmes hydriques et les mesures d'adaptation à mettre en place dépendront principalement : 1) de la nature et de l'ampleur des changements; 2) des degrés de sensibilité et de vulnérabilité des ressources hydriques et des infrastructures d'approvisionnement; 3) de l'évolution de la demande; et 4) de la sensibilisation des institutions à modifier les pratiques de gestion dans un contexte de CC (Environnement Canada, 2004a et Ressources naturelles Canada, 2004). Aussi, tel que rapporté notamment par Rousseau *et al.* (2004), de nombreux facteurs autres que les CC peuvent avoir une incidence déterminante sur la disponibilité des ressources en eau, dont l'aménagement du territoire.

3.2 Indices climatologiques de sécheresse

Une sécheresse peut être définie comme une période prolongée de temps anormalement sec qui conduit à un épuisement des ressources en eau nécessaires aux activités humaines (Groupe d'étude des sécheresses du SEA, 1986). La prévision des sécheresses nécessite la prévision des anomalies climatiques qui produisent des conditions exceptionnellement sèches pendant une période prolongée. Chaque événement de sécheresse s'avère unique par sa durée, par son intensité, par les conditions antérieures de la région affectée et par la capacité de cette région à s'adapter aux pénuries d'eau. Les sécheresses se distinguent des autres menaces naturelles (ex. inondations) par leur durée et aussi par le fait qu'il soit difficile d'établir le moment exact de leur début ou de leur fin (Bonsal *et al.*, 2004).

Aucune classification standard n'est universellement acceptée pour cataloguer les sécheresses, qui peuvent être classifiées en fonction de conditions météorologiques, hydrologiques, agricoles et/ou socio-économiques (Blenkison et Fowler, 2007). Il existe une panoplie d'indices pour qualifier et classer les sécheresses, afin d'en mesurer la gravité; ces indices peuvent être très simples, lorsque basés sur la seule mesure des déficits de précipitations, ou plus complexes, lorsqu'ils incorporent une approche axée

sur l'équilibre hydrique en utilisant les précipitations, l'évapotranspiration potentielle, l'humidité antérieure du sol et le ruissellement (ex. indice de gravité de la sécheresse de Palmer, 1965). Les deux facteurs clés qui déterminent l'occurrence et la sévérité des sécheresses sont l'évaporation et les précipitations. Il serait donc logique que les indices de sécheresse tiennent compte de ces deux facteurs principaux. Cependant, puisque l'estimation de l'évaporation nécessite des mesures météorologiques qui sont souvent difficiles à obtenir (rayonnement net, déficit de pression de vapeur, vitesse des vents), les indices basés uniquement sur les précipitations offrent un plus grand potentiel d'application (Ghosh et Mujumdar, 2007). Les indices basés uniquement sur les précipitations peuvent néanmoins s'avérer inappropriés dans les régions où l'eau de fonte est une composante significative importante du bilan hydrique (Blenkisop et Fowler, 2007).

Maracchi (2000) a dénombré 17 indices de sécheresse basés sur les précipitations. Les plus couramment utilisés sont le SPI (*standardized precipitation index*) de McKee *et al.* (1993), qui consiste à transformer les séries temporelles de précipitations mensuelles en une distribution normale standardisée, et le DSI (*drought severity index*), qui se base sur les anomalies de précipitations mensuelles accumulées (ex. Phillips et McGregor, 1998). Dans ce contexte, les « anomalies » sont définies comme la différence entre la hauteur de précipitation totale sur une certaine durée (ex. un mois) et la valeur climatique moyenne pour cette même durée (ex. la moyenne mensuelle des précipitations). Ces anomalies sont additionnées sur une période prédéfinie pour caractériser l'ampleur d'une sécheresse. À titre d'exemple, Blenkisop et Fowler (2007) ont appliqué deux indices de sécheresse basés sur le DSI pour qualifier la fréquence, la durée et la sévérité des sécheresses dans les îles britanniques. Pour le premier de ces indices, le cumul des anomalies de précipitations sur trois mois consécutifs était considéré, alors que pour le second, les anomalies de précipitations étaient cumulées sur six mois. Il s'agissait d'une façon de définir des indices pour les sécheresses à court terme, plus caractéristiques des sécheresses d'eau de surface, et à long terme, plus susceptibles d'affecter les ressources en eau souterraine.

3.3 Quelques études récentes

L'évaluation des impacts climatiques sur l'approvisionnement en eau potable et sur les ressources en eau en général a fait l'objet de très nombreuses études depuis déjà quelques années. Ces études peuvent être classées en deux groupes, un premier s'intéressant aux tendances passées (précipitations, débits) alors que le second tente d'estimer, à partir de modèles de simulation du climat, les conditions hydrologiques futures et ainsi évaluer les impacts des CC sur la ressource eau. Il ne saurait cependant être question de présenter dans ce qui suit une liste exhaustive des études publiées à ce jour. Les études retenues et brièvement décrites dans cette section sont récentes et ont été sélectionnées en fonction de leur intérêt et de leur pertinence au regard de la présente étude.

Burns *et al.* (2007) ont analysé les précipitations et les débits observés entre 1952 et 2005 en 12 sites de la région de Catskill Mountain (au sud-est de l'état de New-York), qui est l'une des plus importantes sources d'approvisionnement en eau potable pour la ville de New-York. Les 12 sites étudiés ont affiché des tendances à la hausse dans les précipitations annuelles, tendances qui se sont avérées statistiquement significatives pour six de ces sites. À l'échelle mensuelle, les précipitations des mois de juin, juillet et septembre ont affiché des tendances à la hausse, tandis qu'une forte tendance à la baisse a été rapportée pour le mois de février. En ce qui concerne les débits, tous les sites ont montré une tendance à la hausse des écoulements annuels totaux, mais aucune de ces tendances ne s'est avérée statistiquement significative. Au niveau mensuel, seuls les mois de juillet et octobre montrent une augmentation significative des débits pour la majorité des sites, tandis que les écoulements mensuels du mois d'avril affichent une tendance à la baisse.

De façon plus globale, Zhang *et al.* (2007) ont analysé les tendances dans les précipitations observées sur la période s'étalant de 1925 à 1999, pour toute la portion du globe qui s'étend entre 40° de latitude Sud et 70° de latitude Nord. Les tendances observées ont été comparées avec celles simulées par différents modèles de simulation du climat, en tenant compte ou non de l'impact des activités humaines sur les concentrations des GES dans l'atmosphère. La principale conclusion des analyses de Zhang *et al.* (2007) est que le « forçage anthropique » (effets des activités humaines) a contribué pour 50 à 85 % aux tendances observées pour la période 1925-1999 dans les

précipitations annuelles totales entre le 40° de latitude Sud et le 70° de latitude Nord. Entre le 50° et le 70° de latitude Nord, les tendances observées dans les précipitations annuelles sont à la hausse, tandis qu'on ne peut conclure avec certitude sur le signe de la tendance entre 40° et 50° de latitude Nord (région qui inclut le sud du Québec).

La majorité des études ayant comme objectif de prévoir l'impact des CC sur les ressources en eau disponibles dans le futur ont été réalisées en Europe. Ainsi, Blenkinsop et Fowler (2007) ont appliqué six modèles régionaux, alimentés aux limites par quatre GCM différents, en vue d'évaluer les précipitations moyennes et deux indices de sécheresse pour les îles britanniques, sur les périodes 1961-1990 et 2071-2100 (scénario SRES A2). Les indices de sévérité de sécheresse étudiés étaient basés sur le cumul des anomalies de précipitations mensuelles (voir section 3.2). Blenkinsop et Fowler (2007) ont tout d'abord observé des différences notables au niveau spatial concernant la capacité des modèles à reproduire les précipitations saisonnières. Ainsi, la performance globale des modèles sur la région étudiée est plutôt bonne, mais il en va autrement lorsque les résultats sont examinés tuile par tuile. En outre, les modèles régionaux considérés n'arrivent pas à reproduire la fréquence des sécheresses observées par le passé dans les îles britanniques, et ce, plus particulièrement pour les étiages sévères. Selon les résultats obtenus par ces auteurs, les projections futures suggèrent une augmentation des précipitations moyennes en hiver sur les îles britanniques et une diminution pendant les mois d'été. Concernant les précipitations journalières moyennes, Blenkinsop et Fowler (2007) observent des augmentations importantes en décembre et en janvier en climat futur, et de fortes réductions pour les mois de juin, juillet, août et septembre. De plus, l'augmentation des proportions de jours secs (sans pluie) est plus importante pour les mois d'été que pour les autres mois de l'année. Par conséquent, ces auteurs prévoient que la fréquence des sécheresses d'été de courte durée augmentera sur presque tout le territoire des îles britanniques en climat futur, bien que les incertitudes associées à l'amplitude de ces changements demeurent importantes. Plus spécifiquement, on s'attend à des sécheresses à court terme plus intenses dans plusieurs régions du Royaume-Uni, mais à des événements de longue durée moins sévères.

Fowler et Kilsby (2007) ont également étudié les changements attendus entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 (scénario SRES A2) au niveau des débits au

Royaume-Uni à partir de résultats de modèles régionaux du climat, plus spécifiquement dans le Nord-Ouest de l'Angleterre. Ces auteurs concluent que les impacts des CC sur la distribution mensuelle des débits sont significatifs, avec des réductions de 40 à 80 % pour les mois d'été (mai à septembre) et des augmentations allant jusqu'à 20 % en hiver (novembre à mars). Les impacts sur les faibles débits sont aussi très significatifs, avec une réduction du Q_{95} (débit qui est dépassé 95 % du temps) de 40 à 80 % pendant les mois d'été. Ceci concorde avec les résultats d'autres chercheurs (ex. Arnell, 2003a), qui ont observé que les CC entraînent des impacts plus importants sur les faibles débits que sur les débits moyens. Cette réduction des faibles débits en été pourra entraîner des impacts significatifs sur l'alimentation en eau et sur l'écologie des rivières. Dans tous les bassins versants étudiés par Fowler et Kilsby (2007), on note également une augmentation considérable de la variance des précipitations mensuelles en climat futur. Cet accroissement de la variabilité des précipitations, combiné aux changements de précipitations moyennes, suggèrent que les crues d'hiver et les étiages d'été pourront survenir plus fréquemment que par le passé dans le Nord-Ouest de l'Angleterre. Fowler et Kilsby (2007) soulignent toutefois, à juste titre, qu'il est bien connu que les modèles climatiques ont généralement tendance à sous-estimer le nombre de jours sans pluie puisqu'ils simulent plusieurs journées de très faible précipitation (effet « bruine »). Ce comportement particulier des modèles aura évidemment un impact significatif sur le calcul d'indices de sécheresse basés sur l'estimation d'un nombre de jours consécutifs sans pluie.

Graham *et al.* (2007a, b) ont évalué les modifications attendues dans les débits de grands bassins versants européens entre les périodes 1961-1990 et 2071-2100 (scénarios SRES A2 et B2), à partir de modèles régionaux du climat. Pour les bassins alpins, Graham *et al.* (2007a) constatent que la pointe de débit associée à la fonte des neiges apparaît environ un mois plus tôt en climat futur et qu'elle est réduite d'environ 20 %. Pour le bassin versant de la mer Baltique, ces auteurs calculent une réduction des débits mensuels en été pouvant aller jusqu'à 22 % et une augmentation jusqu'à 54 % des débits mensuels en hiver. Pour le bassin versant du Rhin, une réduction maximale de 42 % des débits mensuels en été est calculée de même qu'une augmentation relative des débits mensuels en hiver pouvant atteindre 14 %. Sur un bassin versant situé en Suède, Graham *et al.* (2007b) constatent également une augmentation du potentiel hydroélectrique en climat futur.

L'approche préconisée par Caballero *et al.* (2007) pour évaluer l'impact des CC sur la disponibilité des ressources en eau a consisté à utiliser un modèle hydrologique pour simuler les débits en rivière à partir de résultats de modèles de climat (quatre GCM européens), puis à comparer l'hydrologie simulée pour la période 2050-2060 (scénario SRES B2) avec celle simulée pour la période 1985-1995, sur un bassin versant du sud-ouest de la France. Ils constatent que le couvert de neige est plus faible et que la fonte de neige commence plus tôt en climat futur en terrain montagneux (recouvert de neige en hiver). Ces modifications du régime hydrologique entraînent une réduction des débits jusqu'en été. Caballero *et al.* (2007) ont également calculé les anomalies de températures et de précipitations pour la décennie 2050-2060 par rapport au climat présent. Ces anomalies montrent une tendance générale à la hausse des précipitations en hiver et une diminution en été, tandis que les températures devraient s'accroître pour tous les mois de l'année. L'impact général de tous ces changements, pour tous les scénarios considérés sur la région d'étude, est une réduction d'environ 11 % des débits pendant la période des faibles débits (juillet à octobre). Malgré la variabilité entre les scénarios, la tendance vers une réduction des débits en période de faibles débits est très forte. L'impact le plus fort est observé en juillet, mois pour lequel le débit mensuel simulé diminuerait de 15 % en moyenne en climat futur.

Plus près de nous, en Amérique du Nord, Elgaali et Garcia (2007) ont estimé l'effet des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau pour l'irrigation dans le bassin de la rivière Arkansas, au Colorado. Les résultats issus de deux GCM pour la période 1994-2099 (en supposant un accroissement annuel progressif de 1 % de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère) ont été comparés à des données météorologiques observées sur la période 1895-1993. Un des résultats inattendus de cette étude est qu'un des GCM utilisés prévoit une augmentation de la disponibilité des ressources en eau pour tous les mois de la saison de croissance en climat futur, alors que le second prévoit une réduction de l'eau disponible pour presque tous les mois. Cette discordance fournit un argument supplémentaire pour appuyer l'utilisation de plusieurs modèles différents de simulation du climat dans le cadre d'études d'impact des CC.

Au Canada, Merritt *et al.* (2006) ont montré qu'une augmentation des précipitations de 5 à 20 % (variant selon le GCM et le scénario d'émission considérés) en Colombie-Britannique serait associée à une réduction des débits de ruissellement de 0 à 35 %. Cette réduction serait attribuable à des diminutions considérables des débits de ruissellement au printemps, causées par une fonte de neige plus précoce. Ces résultats illustrent comment l'impact des CC sur les ressources en eau disponibles ne peut pas être évalué sur la seule base des tendances anticipées pour les précipitations.

Les études portant plus spécifiquement sur l'analyse des impacts des CC sur la vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en eau et sur les mesures d'adaptation à mettre en œuvre afin de faire face aux CC sont moins nombreuses. Il convient de citer d'abord Risbey *et al.* (2007) qui s'intéressent à l'approvisionnement en eau potable de la capitale australienne Canberra frappée depuis déjà une décennie par une sécheresse (comme toute la partie sud-est du continent australien). À partir de différents niveaux d'évolution future des profils pluviométriques, ces auteurs montrent que de faibles modifications des moyennes de pluie auront des impacts importants sur la probabilité d'occurrence de périodes sèches. Par ailleurs, les choix d'adaptation seront essentiellement fonction, selon ces auteurs, du niveau de tolérance des décideurs face au risque de persistance de la période de sécheresse.

Jollands *et al.* (2007) ont considéré quatre scénarios climatiques possibles et ont analysé les impacts de ces scénarios sur plusieurs infrastructures et services municipaux, dont l'approvisionnement en eau potable de la ville de Hamilton en Nouvelle-Zélande. Ces auteurs concluent que, même si l'aspect démographique semble le facteur déterminant à considérer dans la planification future des services et infrastructures municipales de la ville de Hamilton, il serait « imprudent » de ne pas considérer les possibles impacts des CC. Ruth *et al.* (2007), dans le cadre de la même étude, notent que, selon plusieurs scénarios prospectifs, la probabilité que les approvisionnements soient insuffisants en 2030 est de l'ordre de 30 à 40 % et que, dans un tel contexte, il est souhaitable de développer une stratégie visant à diversifier les sources d'approvisionnement et à réduire la demande.

Iglesias *et al.* (2007) examinent la question de la gestion des ressources en eau pour le bassin méditerranéen dans un contexte où la région est appelée à subir de profondes

modifications sociales et environnementales sur fond de raréfaction des ressources en eau. Ces auteurs, après un examen très sommaire des possibles options technologiques, plaident en faveur d'une coordination à l'échelle méditerranéenne pour faire face au problème de raréfaction de la ressource et proposent une démarche en ce sens.

Mukheibir (2007) explore différentes avenues de solutions pour faire face à la variabilité climatique basée sur les stratégies actuellement déployées par les petites municipalités de la province du Cap du Nord (Northern Cape) en Afrique du Sud. Il note, après consultation des intervenants municipaux, que les solutions du type « assainissement sec » ('dry sanitation'), l'instauration de projets éducatifs et la révision de la structure de tarification sont considérées par ceux-ci comme des stratégies efficaces pour lutter contre une possible raréfaction de la ressource.

3.4 Adaptation aux changements climatiques et eau potable

La première action à entreprendre pour s'adapter à la baisse éventuelle des ressources en eau disponibles est certainement de resserrer la gestion de l'eau potable pour réduire la demande, ou, à tout le moins, pour en freiner la croissance. Ainsi, des programmes de sensibilisation des citoyens et de restriction de l'utilisation de l'eau potable à certaines fins spécifiques (ex. arrosage des pelouses) pendant les périodes de forte demande et/ou d'étiage important sont autant de mesures qui peuvent contribuer à l'atteinte de cet objectif. Également, un meilleur entretien des réseaux de distribution d'eau potable (détection et colmatage proactif des fuites) peut réduire de façon significative le volume d'eau à produire par les municipalités afin de satisfaire la demande en eau. Le recyclage des eaux usées peut aussi permettre, dans certains cas, de réduire la demande en eau potable. Selon Marsalek *et al.* (2004), on assiste depuis quelques années, au Canada, à une hausse de la récupération et du recyclage des eaux grises, pluviales et usées (municipales et industrielles) ainsi qu'à leur réutilisation pour des usages qui peuvent se satisfaire d'une eau de qualité inférieure à celle de l'eau potable. Parmi les utilisations courantes, mentionnons l'irrigation à des fins agricoles et d'aménagement paysager, la protection contre les incendies, l'aménagement des paysages aquatiques urbains, les activités récréatives et l'utilisation industrielle. L'eau

récupérée ou recyclée remplace l'eau potable et permet donc de réduire la demande pour une eau de meilleure qualité.

Or, le contrôle de la demande en eau ne peut à elle seule suffire, dans certains cas, à éviter les situations de pénurie. Pour les régions les plus vulnérables, il faut donc veiller à sécuriser les approvisionnements. Ceci pourrait se traduire, à titre d'exemple, par la mise en place d'une prise d'eau d'urgence ou par la connexion à une source supplémentaire (ex. eaux souterraines). Dans le cas de prises d'eau qui doivent être remplacées en raison de leur désuétude, on peut envisager leur relocalisation et/ou la modification de leur dimension. La construction de barrages en vue de constituer des réserves pour les périodes d'étiage s'avère une autre solution possible, à condition bien entendu que ceci puisse se faire sans compromettre l'alimentation en eau pour les municipalités en aval.

Dans les cas extrêmes, comme dans certaines régions des États-Unis et du Moyen-Orient, on peut recourir aux usines de dessalement pour produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer. En 2002, un pour cent (1 %) de l'eau potable consommée à travers le monde était de l'eau de mer dessalée (Lasserre et Descroix, 2002). Le *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) d'Australie travaille actuellement au développement de techniques de dessalement plus efficaces. Ce centre de recherche étudie également la possibilité de réutiliser et de recycler les eaux usées, après que celles-ci aient transité à travers un aquifère souterrain. Ainsi, des eaux usées sont injectées dans le sol afin d'en retirer une variété de pathogènes, de perturbateurs endocriniens et de sous-produits de désinfection. Le taux de dégradation des contaminants dépend de la composition géochimique de l'aquifère et de la communauté biotique qui y vit. Une ville d'Australie, située au sud de Perth, réutilise ses eaux usées pour l'irrigation après que celles-ci n'aient séjourné que de 30 à 40 jours dans un aquifère (Stemp-Morlock, 2007). Cette façon de faire permet non seulement d'améliorer la qualité de l'eau, mais peut s'avérer une façon pratique et économique de stocker l'eau, à l'abri de l'évaporation. Il faut voir que le dessalement de l'eau est une option coûteuse vue comme excessive par les écologistes et, dans le cas de la région de Melbourne, elle fait l'objet d'âpres débats publics.

4. Modélisation du climat : description générale des approches et modèles

L'évaluation des impacts des augmentations des concentrations des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère terrestre sur le climat passe par la modélisation du système climatique terrestre. Ce chapitre entend donner une description générique de ce type de modèle (section 4.1) de même que des principaux concepts nécessaires pour comprendre les différents paramètres caractérisant les simulations et utiles lors de l'interprétation des résultats issus de ces modèles (section 4.2). Une brève description des scénarios d'émission des GES considérés dans le cadre des présents travaux est aussi donnée (section 4.3). Seuls les modèles dits globaux seront considérés dans ce qui suit. La question des incertitudes liées aux projections climatiques proposées par ces modèles est aussi abordée (section 4.4) de même que la question générale des possibles impacts des CC sur les précipitations et l'occurrence de sécheresses (section 4.5). La question de l'évaluation de projections climatiques pertinentes au secteur de l'eau et à la gestion de cette ressource sera abordée à la section 4.6. Cet aspect est crucial considérant les différences parfois importantes entre les projections climatiques issues de différents modèles.

4.1 Modèles climatiques

Les modèles climatiques (aussi appelés « Modèles couplés atmosphère-océan de circulation générale » ou en anglais « Atmosphere-Ocean General Circulation Models », AOGCM; l'acronyme GCM pour « Global Circulation Model » sera utilisé dans la suite de ce document) sont des modèles capables de simuler les multiples interactions (océan-atmosphère-terre) et processus physiques et chimiques impliqués dans la « mécanique » climatique terrestre. À partir d'une description mathématique des lois physiques qui régissent le climat, de paramètres astronomiques (ex. rayonnement solaire), de paramètres planétaires (ex. occupation du sol) et d'une description de la composition chimique de l'atmosphère, ces modèles simulent, sur de longues périodes et sur l'ensemble de la planète, un ensemble de variables climatiques telles que la température, l'humidité de l'air, les précipitations, etc. Ils sont donc en mesure de simuler l'évolution vraisemblable du climat dans un contexte d'augmentation des GES. Puisque ces modèles doivent nécessairement simuler le climat de la planète entière,

leur résolution spatiale est généralement assez grossière, soit de l'ordre de quelques centaines de kilomètres. Ceci signifie que les GCM représentent la terre, les océans et l'atmosphère par un nombre fini de « blocs » ou « tuiles » d'environ 500 km de côté (la valeur exacte varie selon les modèles). Les GCM vont donc fournir comme résultats des variables climatiques (températures, précipitations, etc.) moyennées ou cumulées sur ces tuiles et ne sont donc pas en mesure de reproduire les phénomènes plus locaux. Les GCM ne sont pas conçus pour prédire le temps qu'il fera en un moment et en un lieu précis, mais plutôt pour estimer les tendances climatiques à long terme de diverses variables climatiques (ex. température moyenne dans une région, etc.). Ces « simulateurs du climat », très complexes, existent maintenant sous plusieurs formes, plusieurs équipes de recherche en divers pays ayant développées leur propre modèle (Meelth *et al.*, 2007). Le tableau 4.1 dresse la liste des modèles considérés dans la présente étude pour l'estimation des projections sur les précipitations mensuelles et les écoulements.

Ces modèles sont dits « globaux » par opposition aux modèles régionaux, qui utilisent un découpage plus fin du territoire (par exemple, le Modèle Régional Canadien du Climat considère des tuiles de 45 km x 45 km; voir Plummer *et al.*, 2006 et de Elía *et al.*, 2008) mais qui se limitent toutefois à appliquer ce découpage et donc à simuler une région donnée dont les conditions aux frontières sont définies par un modèle global (plusieurs modèles régionaux ont été développés et appliqués à diverses régions; voir par exemple Ekström *et al.*, 2005; Semmler et Jacob, 2004 et Frei *et al.*, 2006 où une comparaison des résultats de simulations de divers modèles régionaux pour les précipitations extrêmes est présentée). Les projections climatiques développées dans le cadre des présents travaux seront établies sur la seule base de résultats de simulations issues de modèles globaux.

Chaque modèle utilise une représentation discrétisée du territoire qui lui est propre. Pour les modèles du tableau 4.1, les tailles de ces tuiles varient de 4° x 5° (environ 450 km x 380 km à 45° de latitude) pour les modèles GISS-ER, GISS-EH et INM-CM3.0 à 1,1° x 1,1° (soit 120 km x 90 km à 45° de latitude) pour le modèle MIROC3.2 HIRIES. La résolution de ce découpage varie donc d'un modèle à l'autre et les « tuiles » associées à chacun de ces découpages ne se recouvrent pas parfaitement (voir figure 4.1 pour un exemple de découpage spatial du territoire sous étude). Afin de

comparer les résultats des différents modèles, il est donc nécessaire d'interpoler les différentes séries issues de ces modèles afin d'estimer de nouvelles séries sur les tuiles d'une grille de référence commune (voir section 5.3).

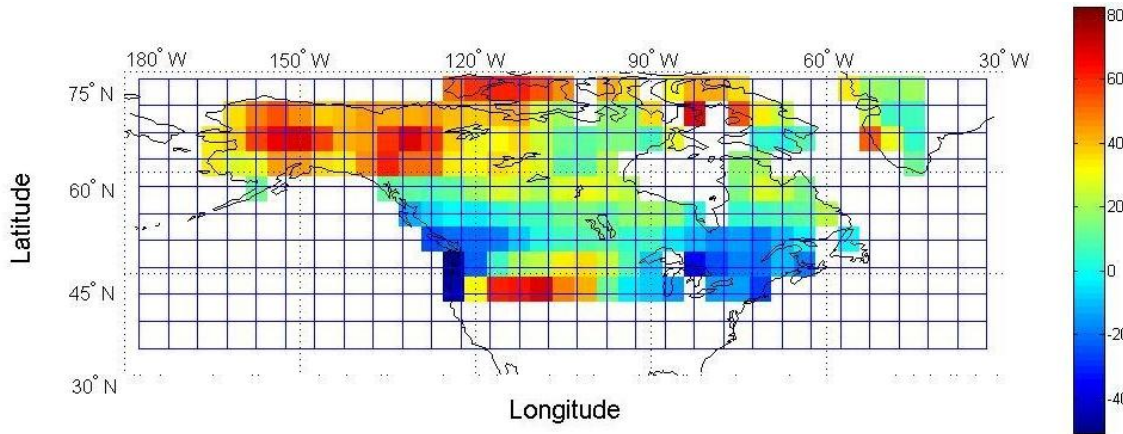


Figure 4.1 Exemples de découpage utilisés par les modèles (les tuiles de couleur correspondent au découpage du modèle CGCM3 alors que le quadrillage correspond à la grille de référence).

4.2 Simulations climatiques

Une simulation climatique se définit par : 1) le modèle utilisé; 2) le scénario de GES considéré; 3) les conditions initiales (on parle alors de différents « membres » issus d'un même modèle); et 4) la période simulée (par exemple 1890 à 2100). Diverses paramétrisations peuvent aussi être considérées afin de voir l'impact sur les résultats du modèle d'une variation plus ou moins grande de certains paramètres servant à décrire divers processus (voir à ce sujet Knight *et al.*, 2007). Cet aspect ne sera toutefois pas couvert dans la présente analyse. Dans ce qui suit, les différentes simulations seront donc caractérisées en fonction du nom du modèle utilisé (par exemple CGCM3), du scénario d'émission de GES utilisé (A2, A1B ou B1) et du numéro de membre. Ce dernier, comme mentionné plus haut, réfère à différentes simulations où les conditions initiales ont été modifiées afin de pouvoir apprécier l'influence de celles-ci sur le signal climatique.

Tableau 4.1 Liste des simulations utilisées pour l'élaboration des projections climatiques

Nom du modèle	Institution	Nombre de membres*		Résolution (lat × lon)	Période simulée
		Précipitation	Écoulements		
BCCR-BCM2	BCCR (Norvège)	1, 1, 1	1, 1, 1	2,8° × 2,8°	1850-2099
CCSM3	NCAR (USA)	6, 4, 7	6, 3, 7	1,4° × 1,4°	1870-2099
CGCM3 T47	CCCMA (Canada)	5, 5, 5	5, 5, 5	3,7° × 3,8°	1850-2099
CGCM3 T63	CCCMA (Canada)	0, 0, 0	1, 0, 1	2,8° × 2,8°	1850-2099
CNRM CM3	CNRM (France)	1, 1, 1	1, 1, 1	2,8° × 2,8°	1860-2099
CSIRO Mk3.0	ABM (Australie)	1, 1, 0	1, 1, 1	1,9° × 1,9°	1871-2099
CSIRO Mk3.5	ABM (Australie)	1, 1, 1	1, 1, 1	1,9° × 1,9°	1871-2099
ECHAM5	MPI (Allemagne)	4, 3, 3	4, 3, 3	1,9° × 1,9°	1860-2099
ECHO_G	MIUB (Allemagne)	3, 3, 3	3, 3, 3	3,7° × 3,8°	1860-2099
FGOALS-g1.0	IAP (Chine)	3, 0, 3	3, 0, 3	2,8° × 2,8°	1850-2099
GFDL-CM2.0	NOAA/GFDL (USA)	1, 1, 1	1, 1, 1	2° × 2,5°	1861-2099
GFDL-CM2.1	NOAA/GFDL (USA)	1, 1, 1	1, 1, 1	2° × 2,5°	1861-2099
GISS-AOM	NASA/GISS (USA)	2, 0, 2	2, 0, 2	3° × 4°	1850-2099
GISS-EH	NASA/GISS (USA)	3, 0, 0	3, 0, 0	4° × 5°	1880-2099
GISS-ER	NASA/GISS (USA)	2, 1, 1	5, 1, 1	4° × 5°	1880-2099
INM-CM3.0	INM (Russie)	1, 1, 1	1, 1, 1	4° × 5°	1871-2099
IPSL-CM4	IPSL (France)	1, 1, 1	1, 1, 1	2,5° × 3,8°	1860-2099
MIROC3.2 HIRES	CCSR (Japon)	1, 0, 1	0, 0, 0	1,1° × 1,1°	1900-2100
MIROC3.2 MEDRES	CCSR (Japon)	3, 2, 2	3, 3, 3	2,8° × 2,8°	1850-2099
MRI-CGCM2.3.2 a	MRI (Japon)	5, 5, 5	5, 5, 5	2,8° × 2,8°	1851-2099
PCM1	NCAR (USA)	4, 4, 2	4, 4, 4	2,8° × 2,8°	1890-2099
UKMO-HadCM3	UKMO (Royaume-Uni)	1, 1, 1	1, 1, 1	2,5° × 3,8°	1860-2099
UKMO-HadGEM1	UKMO (Royaume-Uni)	1, 0, 0	1, 1, 0	1,3° × 1,9°	1860-2099

* Dans les colonnes "Nombre de membres", les trois chiffres réfèrent aux nombres de membres disponibles respectivement pour les scénarios A1B, A2 et B1.

Le tableau 4.1 présente une liste exhaustive des simulations considérées dans le cadre de la présente étude, pour l'estimation des projections sur les précipitations mensuelles et les écoulements. Chacune de ces simulations implique des temps de calcul importants et génère une quantité de données imposante. Ces deux éléments font en sorte que le nombre de simulations actuellement disponible demeure modeste. De plus, les modèles eux-mêmes évoluent et de nouvelles versions naissent (par exemple suite à l'ajout ou à l'amélioration de la modélisation de certains processus) et remplacent des versions plus anciennes de ces mêmes modèles.

4.3 Scénarios d'émission des gaz à effet de serre (GES)

Évidemment, la simulation d'un climat sous un schéma particulier d'évolution des concentrations des GES suppose que l'on dispose d'un tel scénario d'émission. L'élaboration de ces scénarios implique de définir un ensemble de scénarios parallèles pour un ensemble de facteurs susceptibles d'affecter l'évolution des émissions de GES tels que la démographie, l'évolution des technologies et l'économie (IPCC, 2000; pour une description détaillée des scénarios d'émission et de la méthode utilisée pour leur élaboration, le lecteur est invité à consulter cette référence). Quatre grandes familles de scénarios (appelées « storylines ») ont été proposées. Chaque famille de scénarios s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses concernant l'évolution future en matière démographique, sociale, économique, technologique et environnementale. Ces quatre familles de scénarios sont appelées A1, A2, B1 et B2. Une brève description des familles de scénarios A1, A2 et B1, familles de scénarios desquelles sont issus les scénarios de GES utilisés dans ce travail, est donnée aux sections suivantes. La figure 4.2 présente les courbes des émissions de CO₂ selon les quatre familles de scénarios et pour les scénarios A1B, A2 et B1. Comme on peut le constater, ces scénarios peuvent être classés selon leur plus ou moins grand optimisme quant à l'évolution future des GES, le scénario B1 pouvant être qualifié d'optimiste, le scénario A2 de pessimiste, le scénario A1B se trouvant entre les deux.

4.3.1 Famille A1

La famille A1 suppose une croissance économique rapide, une population mondiale qui croîtra jusqu'au milieu du XXI^e siècle et qui décroîtra par la suite, ainsi que la mise en

place et l'utilisation de nouvelles technologies beaucoup plus efficaces d'un point de vue énergétique que celles actuellement disponibles. Cette famille de scénarios suppose aussi une augmentation des échanges culturels et sociaux et une diminution des écarts régionaux en matière de revenus *per capita*. Cette famille de scénarios comporte trois sous-groupes selon la nature des changements technologiques appréhendés, à savoir les scénarios A1F1 (énergie fossile), A1T (énergie non fossile) et A1B (approche énergétique équilibrée). Le scénario A1B suppose donc des sources d'approvisionnement en énergie diversifiées ainsi que des innovations technologiques dans tous les secteurs.

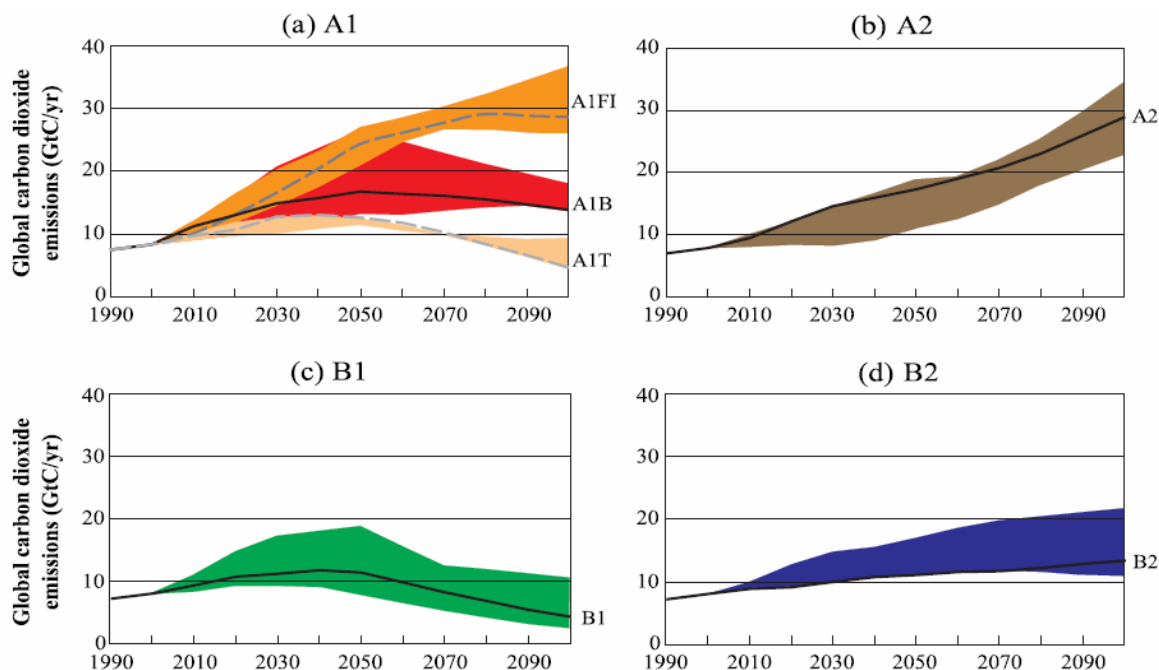


Figure 4.2 Émission totale de CO₂ (en gigatonnes par année) pour la période 1990 à 2100 pour les quatre familles de scénarios. Les traits continus correspondent respectivement aux scénarios représentatifs de chaque famille, à savoir les scénarios (a) A1; (b) A2; (c) B1 et (d) B2. Les bandes de couleurs correspondent aux intervalles où l'ensemble des scénarios appartenant à chaque famille se trouve confiné (tiré de IPCC, 2000).

4.3.2 Famille A2

La famille A2 repose sur l'hypothèse d'un monde hétérogène. Dans un tel contexte, la population mondiale continue d'augmenter pendant la période 1990-2100. Le

développement économique affiche une composante régionale importante et l'évolution des technologies ne s'implante pas de manière homogène à l'échelle planétaire. Il en résulte une croissance très significative des émissions de GES jusqu'à l'horizon 2100 (voir figure 4.2).

4.3.3 Famille B1

La famille B1 suppose, comme pour la famille A1, une population mondiale croissante jusqu'au milieu du XXI^e siècle et décroissante par la suite. Les changements à caractère économique, bien que rapides, favorisent toutefois une économie de l'information et des services. L'accent est mis sur la recherche de solutions durables et globales, tant économiquement, socialement qu'environnementalement. Le profil des émissions de CO₂ qui résulte de ce scénario montre une croissance jusqu'au milieu du XXI^e siècle, suivie d'une décroissance marquée jusqu'à l'horizon 2100.

4.4 Sources d'incertitudes

Plusieurs sources d'incertitudes sont à considérer lorsque les résultats de modèles globaux de simulation du climat sont analysés ou utilisés pour des fins de développement de projections climatiques de diverses variables et/ou indices climatiques. On peut distinguer, à cet effet, les incertitudes : 1) sur les conditions initiales; 2) sur les scénarios d'émission des GES; 3) sur les paramètres des modèles et 4) sur les modèles eux-mêmes (Hagedorn *et al.*, 2005; Fowler *et al.*, 2007b; Tebaldi et Knutti, 2007). Ces diverses sources d'incertitudes seront plus ou moins importantes selon le type de variables climatiques et les échelles spatiales et temporelles considérées. Par exemple, il est peu vraisemblable que les projections à long terme soient sensibles à des variations affectant les conditions initiales même si la dynamique du climat est reconnue comme étant chaotique (Tebaldi et Knutti, 2007).

4.4.1 Incertitudes sur les conditions initiales

Les conditions initiales du système climatique terrestre sont inconnues. En effet, la connaissance des « conditions initiales » supposerait la donnée de tous les champs de toutes les variables simulées en un temps donné sur toute la planète, ce qui relève de

l'impossible. En général, ces « conditions initiales » sont donc définies par les modélisateurs et, partant de ces données, le modèle simule une période d'initialisation du système. La période simulée, pour laquelle les résultats sont effectivement utilisés pour fins d'analyse, correspond alors à la période suivant cette période d'initialisation. Afin d'apprécier les impacts de ces « conditions initiales » sur les résultats de simulation, plusieurs simulations sont effectuées utilisant chacune un jeu différent de conditions initiales (généralement, un premier jeu de conditions initiales est légèrement perturbé pour définir de nouvelles conditions initiales). Ces différentes simulations issues d'un même modèle, et pour lesquelles différentes conditions initiales sont utilisées, sont appelées « membres ». La comparaison et la combinaison des résultats de ces différents membres, appelées prédiction d'ensemble (Hagedorn *et al.*, 2005), permettent, dans une certaine mesure, de tenir compte de la variabilité induite par la méconnaissance des conditions initiales (incertitudes sur les conditions initiales).

4.4.2 Incertitudes sur les émissions de GES

La simulation des conditions climatiques futures implique que soient précisées les émissions de GES pendant la période à simuler. La section 4.3 a montré que plusieurs scénarios ont été élaborés, chacun basés sur des ensembles d'hypothèses quant à l'évolution de différents facteurs ayant un impact sur ces émissions. Il va de soi qu'*a priori*, personne ne peut dire lequel de ces scénarios se produira réellement ni même si l'évolution future des GES correspondra à l'un de ces scénarios. Il est donc important de simuler plusieurs scénarios couvrant une fourchette de futurs vraisemblables. Qui plus est, la simulation et l'analyse de plusieurs scénarios d'évolution des GES permettent de mieux apprécier les gains qui pourraient résulter de divers programmes visant à réduire les émissions de GES. Dans le cas présent, trois scénarios sont considérés : A2, A1B et B1. Les résultats de ces trois scénarios seront notamment comparés afin de voir l'impact du « forçage » imposé par les GES sur l'amplitude des tendances observées.

4.4.3 Incertitudes liées à la paramétrisation des modèles

Pour plusieurs processus simulés par les modèles, il est nécessaire de spécifier un certain nombre de paramètres. Ces paramètres sont nécessaires puisqu'il n'est pas toujours possible, pour des raisons numériques et techniques, de parvenir à une

description fine des processus en jeu, d'où le recours à des paramètres à caractère plus conceptuel dont il faut préciser les valeurs (Tebaldi et Knutti, 2007). Encore ici, cette méconnaissance se traduit par une incertitude sur les valeurs simulées. Plusieurs travaux se sont intéressés à analyser la sensibilité des résultats des modèles en regard de la paramétrisation utilisée (ce sujet ne sera pas explicitement abordé dans le cadre des présents travaux; voir par exemple von Deimling *et al.*, 2006; Piani *et al.*, 2005). Idéalement, même si un tel travail exige une capacité de calcul importante, la prise en compte des incertitudes sur les paramètres du modèle se fait directement en considérant plusieurs simulations réalisées à partir de différents jeux de paramètres tirés aléatoirement de distributions représentant leur probabilité d'occurrence (approche dite du « perturbed physic ensembles » ou PPE; voir Murphy *et al.*, 2007 pour une revue de littérature sur le sujet et Palmer *et al.*, 2005a, Stainforth *et al.*, 2005 et Knight *et al.*, 2007 pour des exemples d'utilisation de cette approche). L'impact de ce type d'incertitudes n'a pas été considéré dans le cadre des présents travaux puisque les différentes simulations issues d'un même modèle ont été générées à partir d'une paramétrisation unique.

4.4.4 Variabilité intermodèles et approches multimodèles

Chaque modèle utilise une représentation du monde réel (discrétisation du système réel, échelles spatiale et temporelle) et des processus qui y ont cours qui lui sont propres. Ces différences « structurales » entre modèles impliquent que, considérant un jeu de données d'entrée identique, chaque modèle simulera une évolution climatique différente. Ces différences pourront être mineures dans certains cas alors que, dans d'autres cas, elles pourront être majeures (par exemple, un modèle pourra prédire une augmentation des précipitations alors qu'un autre pourra prédire une baisse pour une même région). Cette variabilité intermodèles est liée aux incertitudes structurales associées à la représentation imparfaite et incomplète des systèmes réels par les modèles (Hagedorn *et al.*, 2005; Fowler *et al.*, 2007c; Tebaldi et Knutti, 2007).

La prise en compte de ce type d'incertitudes se fait en combinant les résultats issus de plusieurs modèles. Il existe une littérature de plus en plus abondante sur cette approche, que l'on désigne par approche multimodèle (« multi-model approach ») et plusieurs méthodes ont été proposées à cet effet (l'examen de ces méthodes dépasse largement

le cadre du présent rapport; le lecteur intéressé par cette question est invité à consulter Palmer *et al.*, 2005b et Tebaldi et Knutti, 2007 qui présentent une revue de littérature sur le sujet). L'utilisation de l'approche multimodèle est, de fait, de plus en plus répandue dans le cadre d'études d'impacts des CC dans divers domaines d'application (voir Thomson *et al.*, 2006 pour un exemple en santé publique, Cantelaube et Terres, 2005 pour une application en agriculture et Graham *et al.*, 2007a pour un exemple en hydrologie/gestion de l'eau). L'approche multimodèle peut aussi être combinée à la prédiction d'ensemble (simulations avec diverses conditions initiales) pour donner l'approche d'ensemble multimodèle (« multi-model ensemble concept »; Hagedorn *et al.*, 2005).

L'approche multimodèle est souvent utilisée sous prétexte qu'elle permet une estimation plus fiable et plus robuste de diverses variables climatiques. Toutefois, comme le mentionne Hagedorn *et al.* (2005), lorsqu'une seule variable est considérée, il n'est pas clair que le fait d'intégrer les résultats de plusieurs modèles donne un estimateur plus juste de l'évolution future de cette variable. Cependant, il pourra en être autrement si plusieurs variables/indicateurs sont considérés simultanément puisque chaque modèle présente généralement une performance différente pour chacun de ces variables/indices. Ainsi, la bonne performance d'un modèle pourra, dans une certaine mesure, contrebalancer la piètre performance d'un autre modèle. Par ailleurs, l'utilisation de plusieurs modèles permet d'obtenir une performance plus cohérente pour l'ensemble des variables/indices climatiques (Hagedorn *et al.*, 2005). Cet argument s'applique, par exemple, à la performance des différents modèles en fonction des saisons (un modèle pourrait simuler mieux l'été que l'hiver et un autre mieux l'hiver que l'été).

L'on distingue généralement deux types d'approche multimodèle à savoir le « simple multi-model ensembles » et le « optimal multi-model ensembles ». La première de ces approches attribue un poids égal à tous les modèles, alors que la seconde accorde un poids différent aux différents modèles, poids généralement établi en fonction de leur capacité à reproduire diverses caractéristiques du climat présent (plusieurs approches ont été proposées dans le cadre des ensembles optimaux; voir à ce sujet Tebaldi et Knutti, 2007). Deux facteurs plaident toutefois en faveur de l'approche d'ensemble simple : 1) il est difficile d'estimer les valeurs optimales à considérer pour évaluer la performance des modèles, considérant que les historiques disponibles sont courts

(Kharin et Zwiers, 2002); et 2) l'approche d'ensemble simple est un point de référence presque obligé lorsque l'on veut estimer la performance des approches d'ensembles optimaux (Hagedorn *et al.*, 2005). À ces deux avantages pourrait s'ajouter le fait que l'approche simple est beaucoup plus facile d'application. Enfin, il convient de mentionner que, selon un argumentaire présenté par Stainforth *et al.* (2007a), l'approche où des poids sont accordés aux différents modèles selon leur aptitude à reproduire le climat présent serait inappropriée, voire trompeuse, puisque le problème de la science du climat en est un d'extrapolation. Dans un contexte de communication des résultats aux décideurs et au public, ces auteurs plaident plutôt pour une approche où les incertitudes sont clairement présentées et les limites des modèles clairement identifiées et mises en évidence (Stainforth *et al.*, 2007a, b).

Enfin, dans un contexte plus spécifique d'évaluation des incertitudes sur les projections climatiques, il semble évident que les résultats de plusieurs modèles doivent être considérés. L'approche utilisée dans le cadre du présent rapport, dont une description détaillée est donnée au chapitre 5, va dans ce sens et s'inspire de l'approche d'ensemble simple.

4.5 Précipitations, sécheresse et changements climatiques

Plusieurs auteurs, se basant sur des principes physiques de base (thermodynamiques et dynamiques) ont estimé qu'une augmentation des GES dans l'atmosphère terrestre aura globalement comme conséquence une augmentation des précipitations pour les régions de latitude élevée et une diminution pour les régions subtropicales (voir par exemple Emori et Brown, 2005). Par ailleurs, l'analyse des données des modèles globaux va dans ce sens. Ainsi, Cubash *et al.* (2001) rapportent que les modèles du climat, de façon générale, prévoient une augmentation des précipitations moyennes en régions tropicales, une décroissance dans la plupart des régions subtropicales, et enfin une croissance dans les régions de latitudes élevées. Ces projections sont d'ailleurs reprises dans le dernier rapport de l'IPCC (IPCC, 2007). D'autres travaux plus récents vont dans le même sens (voir par exemple Meehl *et al.*, 2007).

Le rapport de l'IPCC fait aussi mention de la possibilité pour certaines régions de connaître un assèchement des sols durant l'été pour les régions continentales

moyennes (Cubasch *et al.*, 2001; IPCC, 2007). Une telle tendance résulterait de la combinaison d'une augmentation des températures et de l'évaporation potentielle sans que ces effets combinés ne soient compensés par une croissance des précipitations. Évidemment, des facteurs locaux pourront jouer en faveur ou en défaveur de ces tendances pour une région donnée. À titre d'exemple, Seager *et al.* (2007) ont montré, après analyse des résultats de simulations de 19 modèles, que la région sud-ouest des États-Unis serait vraisemblablement appelée à connaître un climat beaucoup plus sec au cours du XXI^e siècle, s'apparentant à celui prévalant lors des sécheresses des années 1950 dans cette région.

4.6 Gestion de la ressource eau et CC

L'approche généralement utilisée pour estimer l'impact des CC sur l'hydrologie de surface et plus globalement sur la ressource eau consiste à utiliser les résultats de simulation de modèles globaux, de modèles régionaux ou encore à utiliser des techniques de réduction d'échelle (*downscaling*) statistique et à simuler les écoulements à l'aide de modèles hydrologiques (Graham *et al.*, 2007b; Frigon *et al.*, 2007; voir à titre d'exemple d'application de ce type d'approche : Roy *et al.*, 2001; Cunderlink et Simonovic, 2005; Graham *et al.*, 2007a; Caballero *et al.*, 2007; Ekström *et al.*, 2007a, b; Pietroniro *et al.*, 2006; pour des exemples d'utilisation de la méthode de *downscaling* statistique, voir Dibike et Coulibaly, 2005 et Fowler *et al.*, 2007a). Les modèles hydrologiques sont donc utilisés en complément aux modèles de simulation du climat pour évaluer l'impact des CC sur le régime hydrologique des cours d'eau (ex. Frigon *et al.*, 2007).

Les études récentes tentent de fait à considérer les projections climatiques issues de plusieurs modèles climatiques (approche multimodèle) et à simuler ces différents scénarios à l'aide d'un modèle hydrologique (voir par exemple Graham *et al.*, 2007a; New *et al.*, 2007 et Fowler *et al.*, 2007c). Évidemment, aux incertitudes sur les projections climatiques s'ajoutent, dans ce cas, les incertitudes liées à la modélisation hydrologique, même s'il est généralement admis que les incertitudes sur les projections climatiques demeurent les plus importantes. Par ailleurs, il faut aussi réaliser que ces études hydrologiques reposent sur tout un ensemble d'hypothèses, notamment concernant l'évolution future de l'occupation du territoire.

Le recours aux modèles hydrologiques « externes » pour simuler les impacts des CC est nécessaire puisque la représentation des processus hydrologiques actuellement intégrée aux modèles globaux du climat n'est pas suffisamment détaillée pour une utilisation directe (Bergström *et al.*, 2001; Graham *et al.*, 2007b). Toutefois, la mise en place d'une telle approche et le « transfert » des données depuis les modèles globaux, voire régionaux, aux modèles hydrologiques n'est pas sans poser de difficultés particulières, notamment à cause des échelles spatiales et temporelles de simulations très différentes.

5. Projections climatiques : méthodologie

L'évolution future des précipitations mensuelles a été établie après analyse des simulations issues de 23 modèles globaux du climat. La liste de ces simulations est présentée au tableau 4.1. Au total, pour les précipitations, l'on dispose des résultats de 51 simulations pour le scénario A1B, 36 pour le scénario A2 et 42 pour le scénario B1 alors que, pour la variable écoulement, le nombre de simulations disponibles est de 54 pour le scénario A1B, 37 pour le scénario A2 et 46 pour le scénario B1. Les simulations associées à différents scénarios de GES ont été regroupées et analysées séparément, l'idée étant de voir si l'amplitude du forçage climatique (en l'occurrence les GES) se traduisait par des tendances plus ou moins marquées sur les variables climatiques analysées. Une période d'analyse commune à l'ensemble des simulations a été définie, soit la période 1900-2100. Toutes les tuiles couvrant le Canada, ainsi que la partie nord des Etats-Unis, ont été analysées et les différents résultats sont présentés à cette échelle. Seules les tuiles-terres ont été considérées dans ce qui suit (c'est-à-dire que les tuiles qui couvrent la mer n'ont pas été prises en compte).

Les séries des variables mensuelles sous étude (pluies mensuelles et écoulements) ont été construites à partir des résultats bruts de chaque simulation. Ainsi, chaque série est associée à une variable donnée (pluie ou écoulement), à un scénario de GES (A1B, A2 ou B1), à un membre, à une tuile (de la grille originale du modèle) et à un mois (puisque des séries mensuelles sont considérées, voir figure 5.1). La figure 5.2 présente un exemple d'une telle série.

L'approche multimodèle a ensuite été utilisée pour combiner les résultats issus des différentes simulations. Globalement, il s'agit de : 1) définir une grille de référence; 2) projeter les séries des tuiles originales de chaque modèle sur la grille de référence; 3) effectuer les analyses de tendance de chacune de ces séries; et 4) combiner les résultats des séries en fonction des tendances détectées. Les sections suivantes donnent une description de ces différentes étapes. Les résultats de ces analyses pour les pluies mensuelles et les écoulements sont présentés aux chapitres 6 et 7 respectivement.

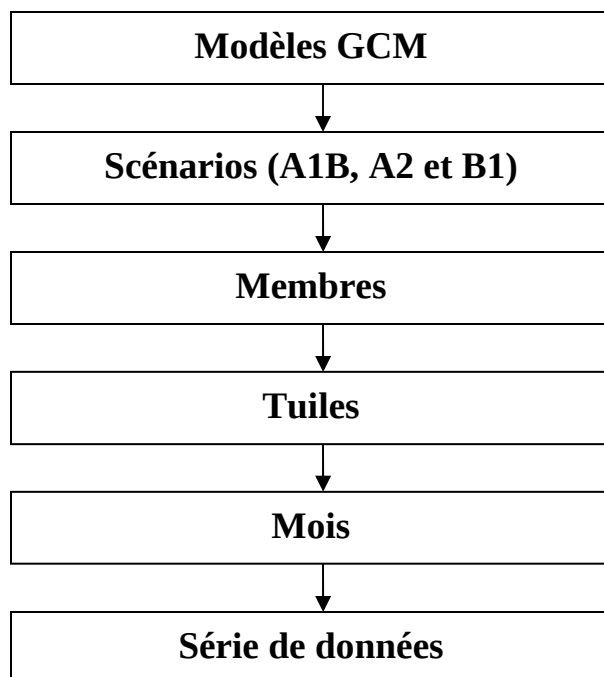


Figure 5.1 Identifiants d'une série donnée

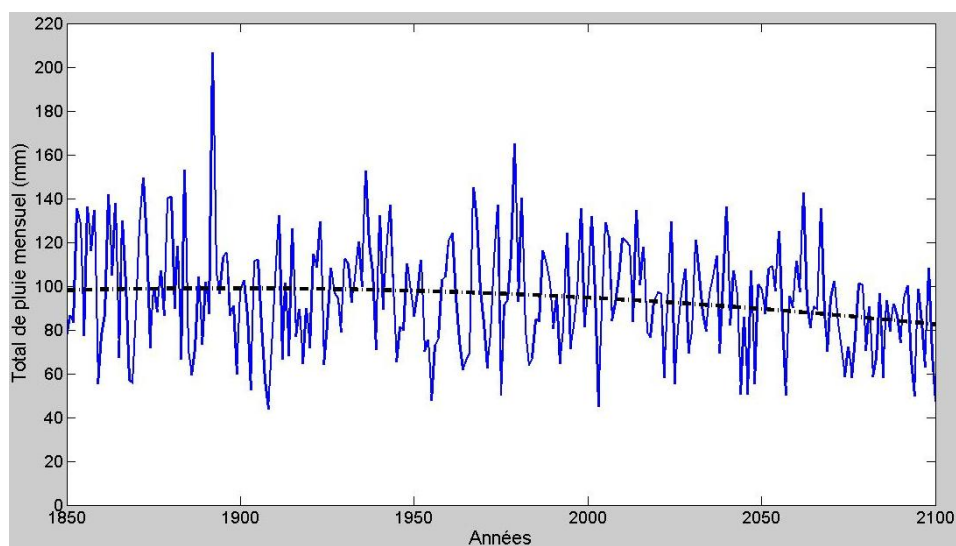


Figure 5.2 Exemple d'une série de pluies mensuelles (modèle CGCM3, membre 3, mois de juillet, scénario de GES A2)

5.1 Analyse multi-modèles

L'analyse multimodèle implique que les résultats issus des différentes simulations soient combinés (voir section 4.4.4). Ce travail, en apparence simple, présente toutefois un défi de taille puisqu'il s'agit de combiner des résultats de modèles ne présentant pas la même discrétisation spatiale, ce qui signifie que les tuiles des différents modèles ne s'emboîtent pas puisqu'elles sont de tailles différentes. Il était donc nécessaire, afin de ramener toutes ces représentations à une représentation unique, de définir une « grille de référence ». Une fois cette grille définie, une procédure a été élaborée afin de « projeter » et de combiner les résultats issus des différents modèles sur cette grille. La grille de référence est présentée à la section 5.2 alors que la procédure d'agrégation des résultats est présentée à la section 5.6.

Les analyses effectuées dans le cadre de l'approche multimodèle ont été réalisées en prenant soin de traiter de façon distincte les trois types de tendance. Ainsi, comme la section 5.3 le montrera plus en détail, les résultats des modèles ont été agrégés à l'échelle de la grille de référence selon qu'ils se rapportent aux tendances '+', '-' ou '0'. Ces trois comportements sont, de fait, exclusifs et il apparaît important de les discerner puisqu'ils sont le reflet d'une information importante, à savoir l'impact du forçage sur la variable climatique considérée. Les résultats ainsi agrégés seront donc une indication de la probabilité que, pour la tuile de référence considérée, la variable subisse une tendance à la hausse, à la baisse ou aucune tendance. De même, les variations moyennes de ces variables pour les diverses périodes considérées seront agrégées et estimées selon qu'elles se rapportent à une tendance positive ou négative. Trois principales raisons motivent un pareil choix. Premièrement, il semble peu raisonnable de combiner ou « moyenner » des résultats associés à des tendances distinctes. Ainsi, une tendance à la hausse pourrait être combinée à une tendance à la baisse pour conclure qu'une variable ne variera pas sur la période considérée. Il semble plus judicieux, dans un tel contexte, de dire que les tendances à la hausse ou à la baisse sont équiprobables au regard des résultats de simulation disponibles, et donc plus logique de comptabiliser le nombre de simulations et/ou modèles selon les tendances enregistrées. Deuxièmement, le résultat fourni par un modèle selon lequel une variable donnée subira une tendance significative pendant la période d'intérêt est un résultat important en soi puisqu'il est la réponse fournie par le modèle à la question la plus importante, à savoir

l'impact du forçage sur l'évolution future de la variable (croissance, décroissance ou sans effet). Enfin, on peut penser que ce type de résultat sera plus robuste à de possibles biais induits par les différents modèles, à condition évidemment que ces biais demeurent, pour ainsi dire, « stationnaire » sur toute la période simulée.

5.2 Grille de référence

La grille de référence a été définie afin que sa résolution ne soit pas trop grossière ni trop fine par rapport à la résolution des grilles des différents modèles et qu'elle couvre autant que possible l'ensemble des grilles des modèles. Après examen et comparaison des différentes grilles, la grille du modèle INM-CM3.0 a été retenue pour la grille de référence. Cette grille est présentée à la figure 5.3. La résolution de la grille de référence est de $4^\circ \times 5^\circ$, ce qui signifie qu'environ de 10 à 16 tuiles des grilles de plus fine résolution ($1,4^\circ \times 1,4^\circ$) couvrent en tout ou en partie chaque tuile de la grille de référence.

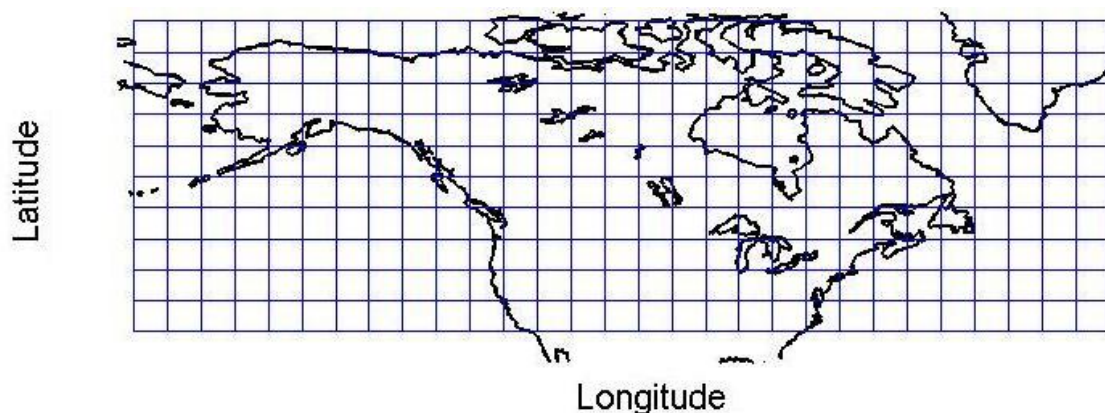


Figure 5.3 Grille de référence

5.3 Construction des séries de la grille de référence

Les résultats des différentes séries associées aux divers modèles ont ensuite été projetés sur la grille de référence. Cette projection s'est effectuée en distribuant les totaux de pluie (ou les écoulements) de chaque tuile de la grille originale du modèle considéré sur toutes les tuiles de la grille de référence auxquelles se superpose la tuile originale du modèle considéré, en proportion de la surface couverte par chacune (la

démarche est décrite de façon plus formelle au paragraphe suivant). Les analyses de tendances (section 5.4) et l'estimation des variations sur les horizons 2050 et 2100 (section 5.5) ont ensuite été réalisées pour chaque série de la tuile de référence.

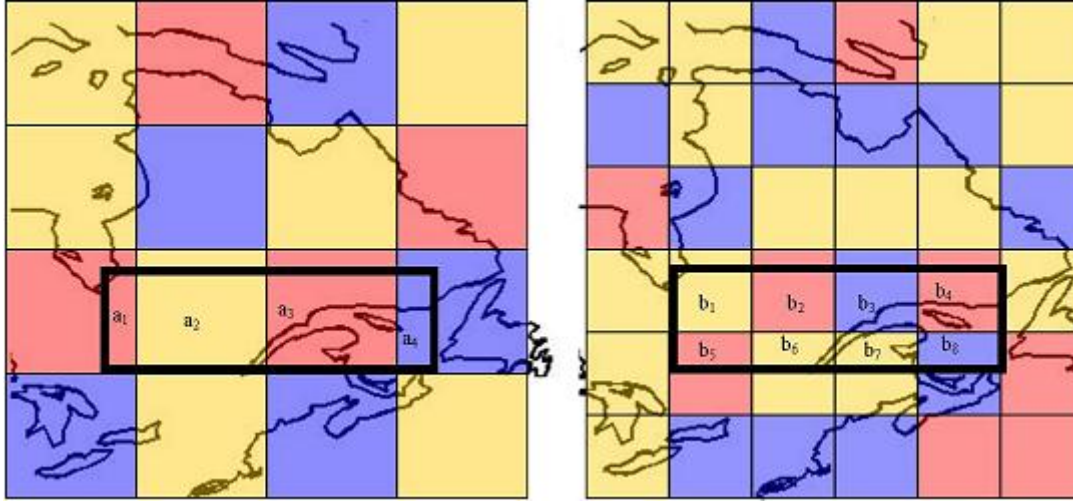


Figure 5.4 Exemple d'application de la méthode d'agrégation des séries. Les tuiles carrées de couleur représentent la grille des modèle A (à gauche) et B (à droite) alors que le rectangle en trait gras représente l'une des tuiles de la grille de référence

La figure 5.4 montre un exemple de projection des séries d'un modèle sur la grille de référence. Les valeurs $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ représentent les surfaces des quatre tuiles du modèle A couvrant la tuile de référence (les indices ont été supprimés pour simplifier la notation). Soit $\{x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)\}$ les valeurs de la variable x (précipitations ou écoulements) associées à chacune de ces tuiles au temps t . La valeur correspondante pour la tuile j de la grille de référence sera dès lors :

$$y_j^A = \frac{1}{A} [a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t) + a_3 x_3(t) + a_4 x_4(t)] \quad (5.1)$$

où A est la surface des tuiles de la grille du modèle considéré. Les contributions du modèle B sont estimées de la même façon, en considérant cette fois les surfaces b_1 à b_8 (voir figure 5.4)

5.4 Estimation des tendances

Une analyse de tendance de type Mann-Kendall a été réalisée pour chacune des séries des tuiles de référence (Yue *et al.*, 2002b, c). Plus spécifiquement, afin de tenir compte d'une possible autocorrélation dans les séries, la méthode proposée par Yue *et al.* (2002a) a été appliquée (voir aussi Groleau *et al.*, 2007). Les résultats de ces analyses de tendance ont été classés selon qu'une tendance statistiquement significative (à 95 %) ait été détectée ou non pour chacune des séries. Trois classes ont ainsi été définies : '+' si une tendance positive est détectée; '0' si aucune tendance significative n'est détectée; et '-' si une tendance négative est observée. L'on dispose, à la suite de cette analyse, d'un portrait complet des tendances projetées pour chacune des tuiles de la grille de référence et chacune des simulations issues des différents modèles.

5.5 Estimation des variations aux horizons 2050 et 2100

La modélisation des tendances a été réalisée en supposant que la moyenne de la variable pouvait être décrite par une équation du type 'loi de puissance' :

$$\langle x(t) \rangle = a + b (t - t_0)^c \quad (5.2)$$

où $\langle x(t) \rangle$ est la moyenne de la variable pour l'année t , t_0 est l'année qui marque le début des séries (1900 dans le cas présent) et enfin $\{a, b, c\}$ représentent les trois paramètres à caler. $c = 0$ correspond donc au cas stationnaire (aucune tendance significative) et $c = 1$ à une tendance linéaire. D'autre part, une valeur du paramètre b positive indique une tendance à la hausse alors qu'une valeur négative indique une tendance à la baisse. Le modèle non stationnaire décrit à l'équation 5.2 n'a été utilisé que dans le cas de séries où le test de tendance a révélé une tendance significative au niveau de confiance 95 %.

L'estimation des paramètres $\{a, b, c\}$ s'effectue à l'aide de la méthode des moindres carrés (pour une description de la méthode d'estimation utilisée, voir DuMouchel et O'Brien, 1989; Holland et Welsch, 1977; Huber, 1981; Street *et al.*, 1988). Un tel modèle (équation 5.2) et une telle méthode d'estimation impliquent que l'on suppose que les moyennes des séries analysées peuvent être décrites par l'équation 5.2 (d'autres

équations pourraient être utilisées pour décrire l'évolution temporelle de la moyenne mais cette équation demeure assez générale). La forme de la distribution des précipitations mensuelles (ou encore des écoulements mensuels) n'est pas considérée dans le cadre d'une telle approche. Diverses distributions pourraient être envisagées, par exemple la distribution Gamma, où un modèle non linéaire du type de celui présenté à l'équation 5.2 pourra être utilisé pour décrire le caractère non stationnaire de la série. Il convient de mentionner par ailleurs que la variance des séries est supposée stationnaire pour l'ensemble des séries étudiées (une discussion de ces aspects est présentée au chapitre 8). Cette approche permet de bien décrire les tendances observées pour les moyennes (voir un exemple à la figure 5.2).

L'équation 5.2 a par la suite été utilisée pour estimer les écarts relatifs entre moyennes en climats actuel et futur, Δ_j , qui sont obtenus en calculant la différence entre la moyenne estimée en 2100 et celle de 1900 (ces écarts sont estimés seulement si une tendance positive ou négative est détectée; autrement $\Delta_j = 0$) :

$$\Delta_j = \frac{[\langle x_j(t=2100) \rangle - \langle x_j(t=1900) \rangle]}{\langle x_j(t=1900) \rangle} \quad (5.3)$$

Cette façon de faire diffère sensiblement de l'approche généralement utilisée où la moyenne sur la période 1960-1990 est comparée à la moyenne pour la période future, généralement la période 2070-2100. Toutefois, cette façon d'estimer les écarts présents-futurs présente l'avantage de tenir compte de l'ensemble de la série dans l'estimation des moyennes.

5.6 Combinaison des résultats issus des différentes simulations

La combinaison des résultats associés à chacune de ces séries, issus de chaque simulation pour chaque tuile de la grille de référence, a ensuite été réalisée en accordant un poids égal à chacun des modèles. Considérant que l'on dispose de plusieurs membres pour certains modèles, les résultats de ces différents membres sont donc combinés dans un premier temps, chaque membre représentant une réalisation équiprobable du futur climatique pour un modèle donné.

Ainsi, l'analyse de ces résultats pour une tuile donnée de la grille de référence se fera simplement en estimant, dans le cas où plusieurs membres sont disponibles, le nombre de simulations présentant une tendance positive, négative ou aucune tendance. Désignons par $\{f_j^{A,+}, f_j^{A,-}, f_j^{A,0}\}$ les fractions des membres du modèle A pour lesquelles, respectivement, une tendance positive, négative ou aucune tendance n'est détectée sur la tuile j de la grille de référence et, de façon similaire, pour le modèle B, $\{f_j^{B,+}, f_j^{B,-}, f_j^{B,0}\}$ désigne les fractions des membres du modèle B montrant des tendances +, - et 0. La combinaison de ces deux modèles se fait simplement en considérant chacun de ces jeux de résultats comme équiprobable :

$$f_j^\alpha = \frac{(f_j^{A,\alpha} + f_j^{B,\alpha})}{2} \quad (5.4)$$

où f_j^α désigne la « probabilité » d'obtenir une tendance α , avec $\alpha = \{+, -, 0\}$, sur la tuile j de la grille de référence. Cet exemple simple s'extrapole aisément au cas où plus de deux modèles sont considérés.

De même, on définit par $\{\Delta_j^{A,+}, \Delta_j^{A,-}\}$ et $\{\Delta_j^{B,+}, \Delta_j^{B,-}\}$ les écarts observés pendant la période 1900-2100 (ou toute autre période) pour les précipitations mensuelles (ou les écoulements ou toute autre variable; voir la section 5.5 pour une description de la méthode d'estimation de ces variations) moyennés sur les membres qui présentent des tendances + ou - (dans le cas où aucune tendance n'est détectée, on a $\Delta_j^{A,0} = \Delta_j^{B,0} = 0$). L'écart moyen est alors calculé simplement en combinant ces divers résultats et l'on obtient, dans le cas où $f_j^{A,\alpha} \neq 0$ et $f_j^{B,\alpha} \neq 0$ avec $\alpha = \{+, -\}$:

$$\Delta_j^\alpha = \frac{(\Delta_j^{A,\alpha} + \Delta_j^{B,\alpha})}{2} \quad (5.5)$$

Par ailleurs, si, par exemple, $f_j^{A,+} = 0$, alors on aura :

$$\Delta_j^+ = \Delta_j^{B,+} \quad (5.6)$$

La moyenne s'effectue évidemment sur les modèles présentant une tendance donnée positive ou négative. L'annexe A présente une description formelle de cette approche.

6. Projections climatiques pour les précipitations mensuelles

L'évolution future des régimes d'écoulement en rivière ou en lacs et du régime hydrologique en général sera souvent largement déterminée par les projections climatiques en matière de précipitations (Cunderlink et Simonovic, 2005; Arnell, 1999; Pal *et al.*, 2004).

La méthode décrite au chapitre précédent a été appliquée en considérant les séries des précipitations mensuelles pour l'ensemble des simulations du tableau 4.1. Deux types de résultats seront présentés dans ce qui suit, à savoir les probabilités d'observer les tendances pour chacune des tuiles de la grille de référence (section 6.1) et, pour chaque classe de tendance, l'écart moyen estimé sur la période 1900-2100 (section 6.3). La section 6.2 compare les tendances obtenues en fonction des différents scénarios de GES et enfin une synthèse et une discussion de ces résultats pour la région du sud du Québec sont ensuite présentées à la section 6.4.

6.1 Tendances

Les statistiques sur les tendances résultant de l'analyse multimodèle pour les différents mois pour le scénario A2 sont présentées aux figures 6.1 à 6.4 (l'annexe B regroupe les cartes équivalentes pour les scénarios A1B et B1). Un certain nombre de constats se dessinent de l'examen de ces cartes :

- Les modèles indiquent un signal cohérent vers une tendance à la hausse des précipitations mensuelles pour la partie nord du territoire étudié (notamment le nord-ouest du Canada et l'Alaska et, dans une moindre mesure, le nord du Québec); cette tendance domine nettement pendant les mois d'hiver (novembre, décembre, janvier et février) alors qu'elle tend à s'atténuer lorsque l'on se dirige du nord vers le sud.
- Des tendances à la baisse significatives ne sont détectées que pour la partie sud-ouest du territoire considéré (nord-ouest des États-Unis et, dans une moindre mesure, le sud-ouest du Canada) et s'estompent lorsqu'on se dirige vers l'est; cette

tendance à la baisse domine légèrement les autres tendances possibles pendant les mois d'été (juin, juillet et août) pour l'extrême sud-ouest.

- Une augmentation des probabilités d'observer des tendances à la hausse est observée pour la zone située entre les latitudes 45° et 55° lorsque l'on se déplace de l'ouest vers l'est, atteignant leur maximum dans les régions du sud du Québec et du sud-est ontarien; ces tendances semblent plus fortes pour les mois de janvier, février, mars, avril, novembre et décembre, alors que pour les autres mois, les modèles privilégient un régime stationnaire de précipitations.

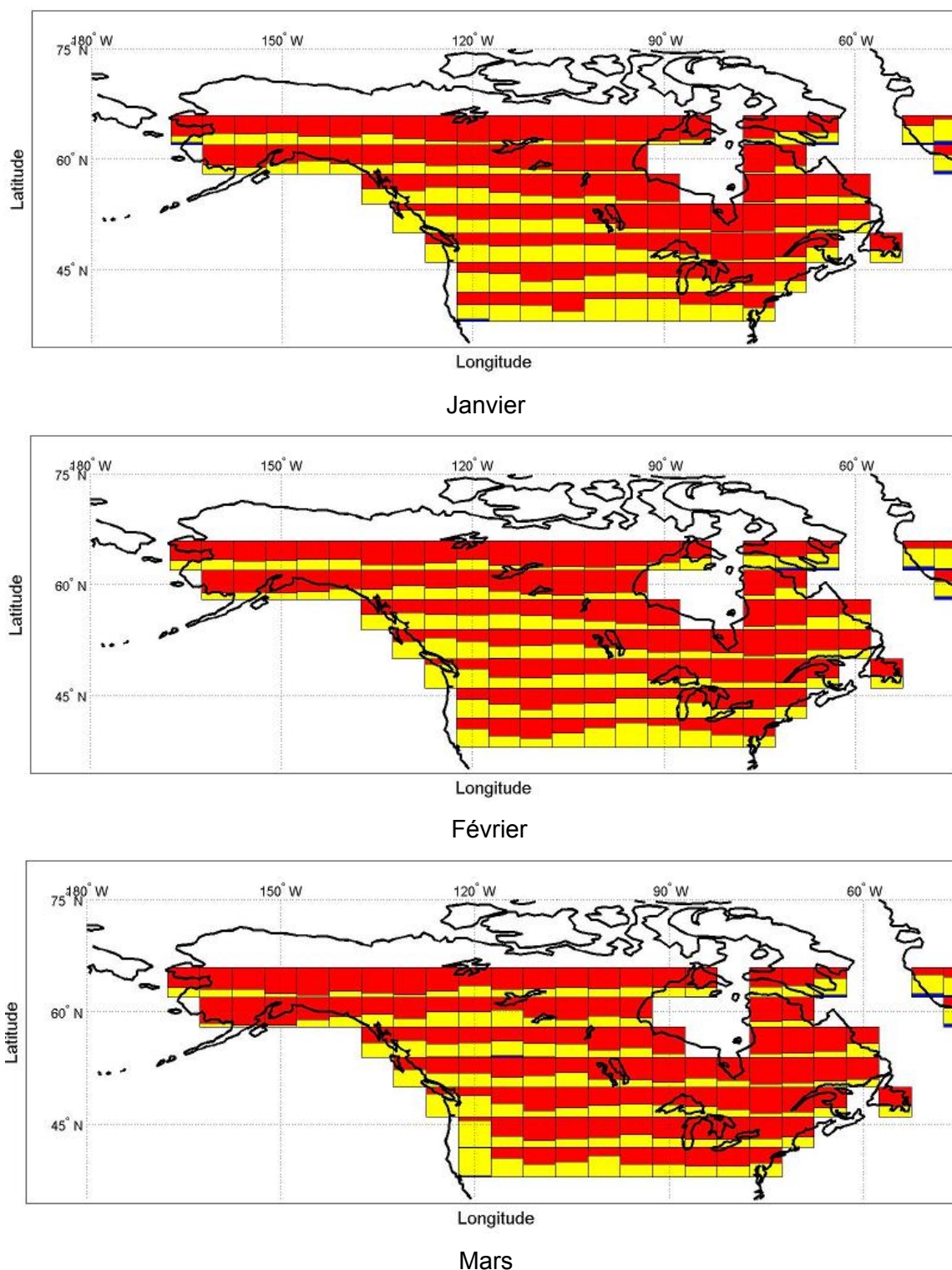


Figure 6.1 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

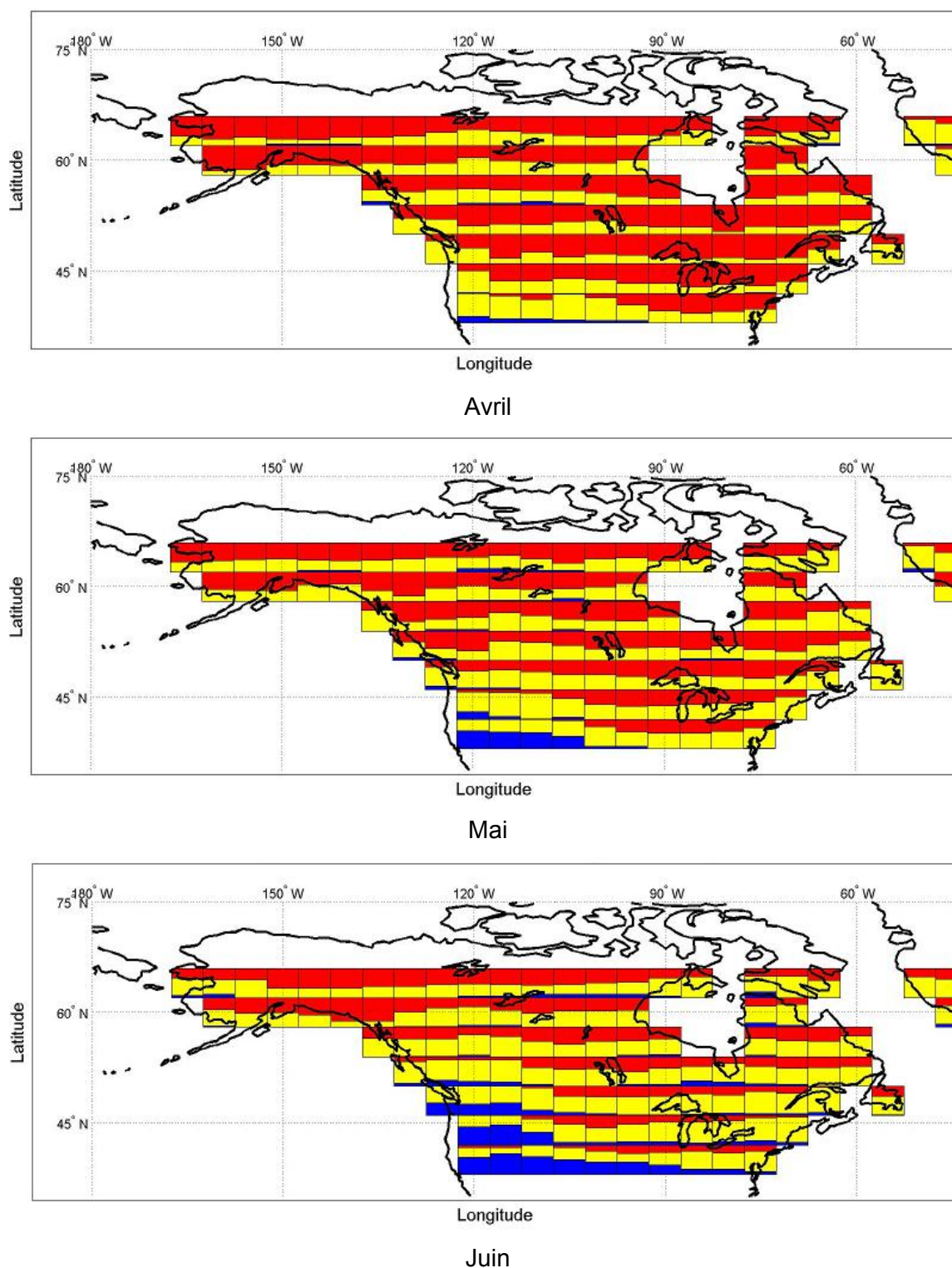


Figure 6.2 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

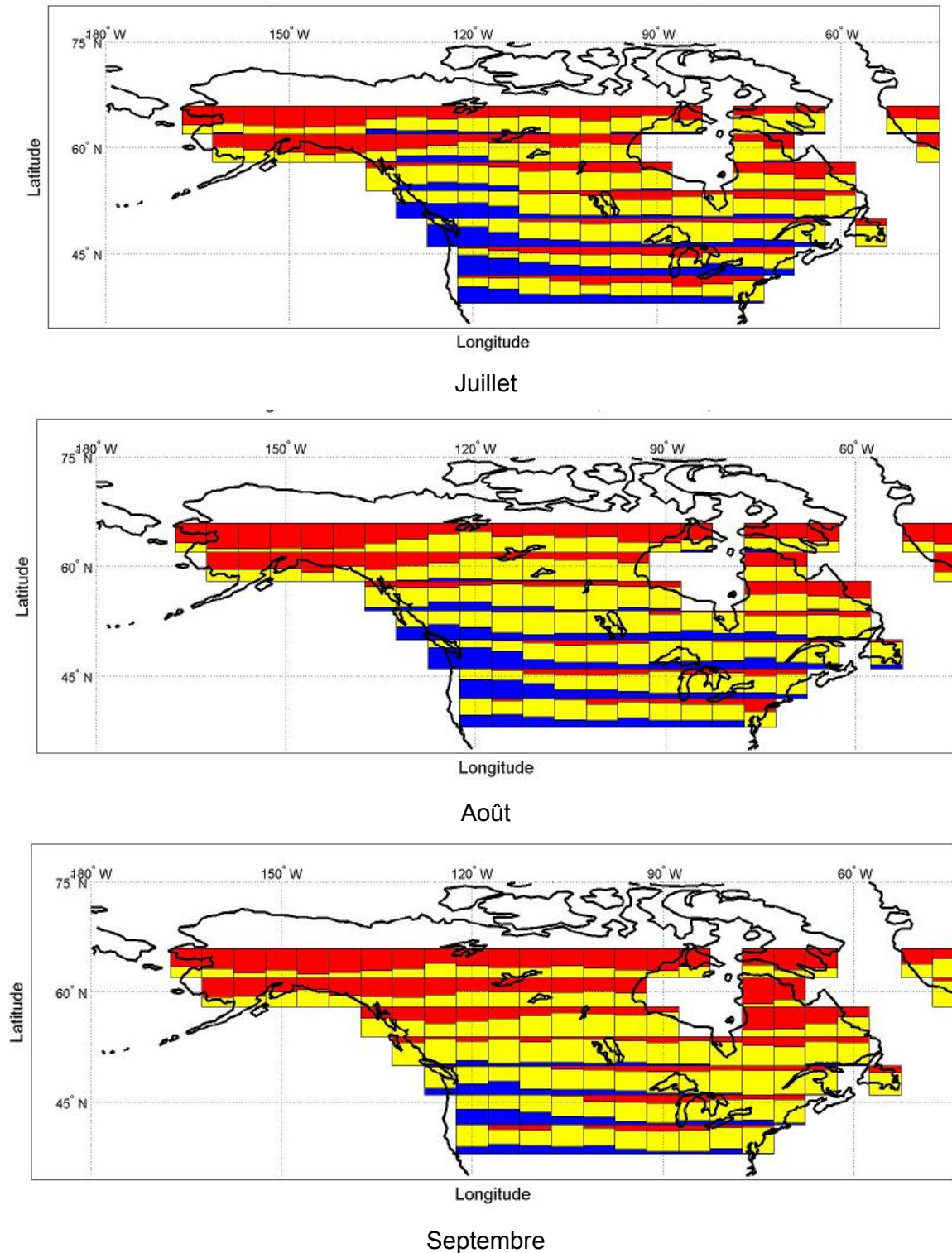


Figure 6.3 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

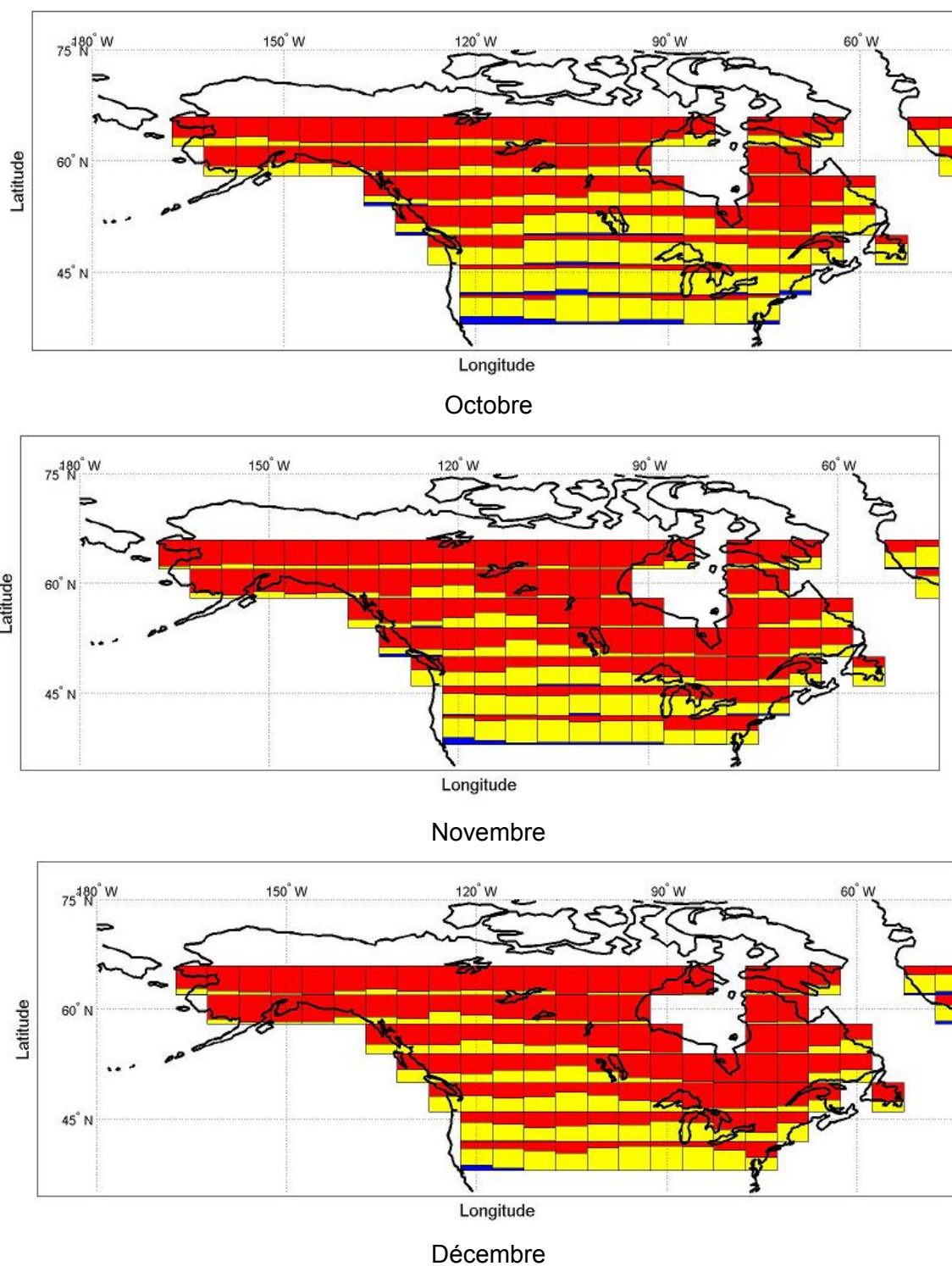


Figure 6.4 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

6.2 Tendances et scénarios de GES

Une comparaison des tendances détectées en fonction des différents scénarios de GES a été réalisée. Pour ce faire, les probabilités de ne pas détecter de tendance sur les tuiles de la grille de référence selon les différents scénarios de GES ont été considérées. Les deux rapports suivants ont été définis :

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{p_{B1}}{p_{A2}} \\ u_2 &= \frac{p_{A1B}}{p_{A2}} \end{aligned} \quad (6.1)$$

où p_x est la probabilité de ne pas observer de tendance à la tuile considérée pour le scénario de GES X ($X = \{A2, A1B, B1\}$). Six cas différents peuvent être définis selon les valeurs de (u_1, u_2) , représentées par les régions A à F du graphique de la figure 6.5 :

$$\begin{aligned} \text{Région A : } & u_1 > 1; u_2 > 1; u_1 > u_2 \Rightarrow p_{B1} > p_{A1B} > p_{A2} \\ \text{Région B : } & u_1 > 1; u_2 > 1; u_1 < u_2 \Rightarrow p_{A1B} > p_{B1} > p_{A2} \\ \text{Région C : } & u_1 > 1; u_2 < 1 \Rightarrow p_{B1} > p_{A2} > p_{A1B} \\ \text{Région D : } & u_1 < 1; u_2 > 1 \Rightarrow p_{A1B} > p_{A2} > p_{B1} \\ \text{Région E : } & u_1 < 1; u_2 < 1; u_1 < u_2 \Rightarrow p_{A2} > p_{A1B} > p_{B1} \\ \text{Région F : } & u_1 < 1; u_2 < 1; u_1 > u_2 \Rightarrow p_{A2} > p_{B1} > p_{A1B} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Dans l'hypothèse où le forçage climatique domine la variabilité climatique, il sera vraisemblable de penser que, de façon globale, les tendances seront de plus en plus marquées si l'on examine les scénarios d'émission de GES dans l'ordre où ces émissions croissent, c'est-à-dire suivant l'ordre $B1 \rightarrow A1B \rightarrow A2$. La probabilité de ne pas observer de tendance ira donc dans l'ordre inverse et l'on aura dans ce cas $p_{B1} > p_{A1B} > p_{A2}$, ce qui correspond à la région A du graphique de la figure 6.5.

Suivant cette hypothèse, un nombre majoritaire de tuile devrait donc se retrouver dans la région A. De même, si l'on examine les deux scénarios « extrêmes » (voir figure 4.2), c'est-à-dire le scénario A2, pour lequel le forçage GES est le plus élevé, et le scénario B1, pour lequel le forçage GES est le moins élevé, une signature claire associée à ce

forçage se traduirait par une prédominance de tuiles se trouvant dans la région où $p_{B1} > p_{A2}$, c'est-à-dire à droite de la droite $u_1 = 1$ (régions A, B ou C).

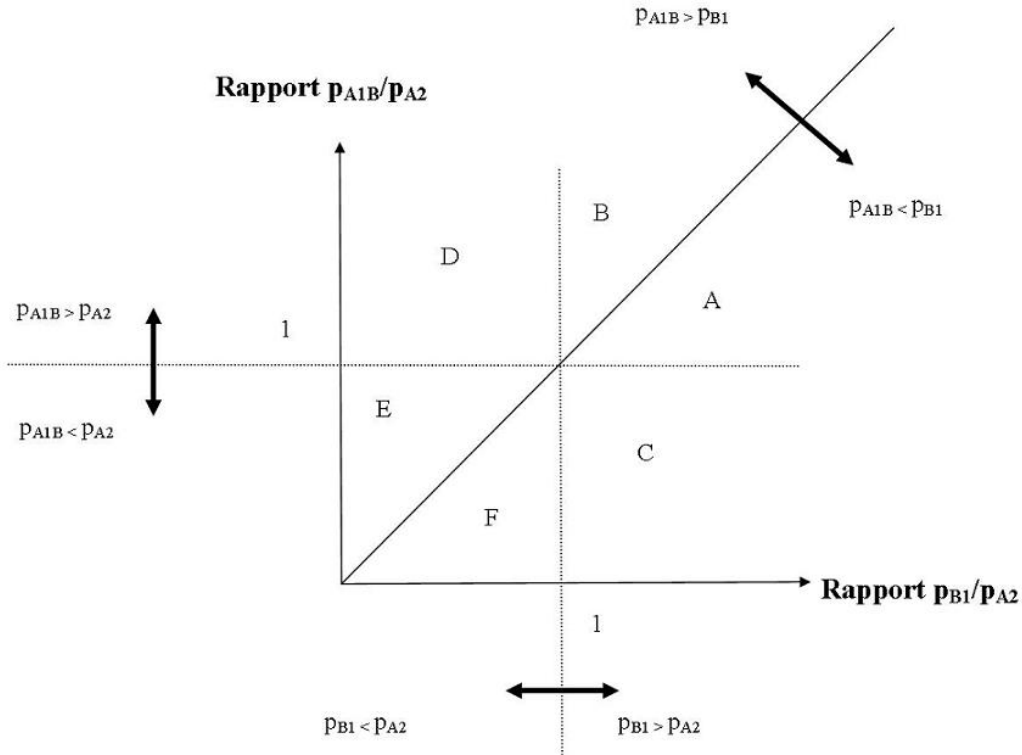


Figure 6.5 Différentes régions du graphique des ratios $u_1 = p_{B1}/p_{A2}$ et $u_2 = p_{A1B}/p_{A2}$

Les graphiques des figures 6.6 et 6.7 présentent les résultats correspondants pour les précipitations mensuelles. L'examen de ces graphiques montre une nette prépondérance de points localisés dans les régions A ou C ($p_{B1} > p_{A2}$ et $p_{B1} > p_{A1B}$). Ce résultat est très intéressant puisqu'il suggère qu'effectivement les tendances détectées sont attribuables au forçage anthropique et que, par ailleurs, les impacts de ce forçage sont plus marqués lorsque l'on compare les scénarios B1 et A2 et les scénarios B1 et A1B. La comparaison des scénarios A1B et A2 montre que le changement dans les tendances détectées entre ces deux scénarios est moins net (points mieux dispersés de part et d'autres de la droite $u_2 = 1$) suggérant du coup une certaine similitude dans les tendances détectées pour les précipitations mensuelles associées à ces deux scénarios à l'horizon 2100.

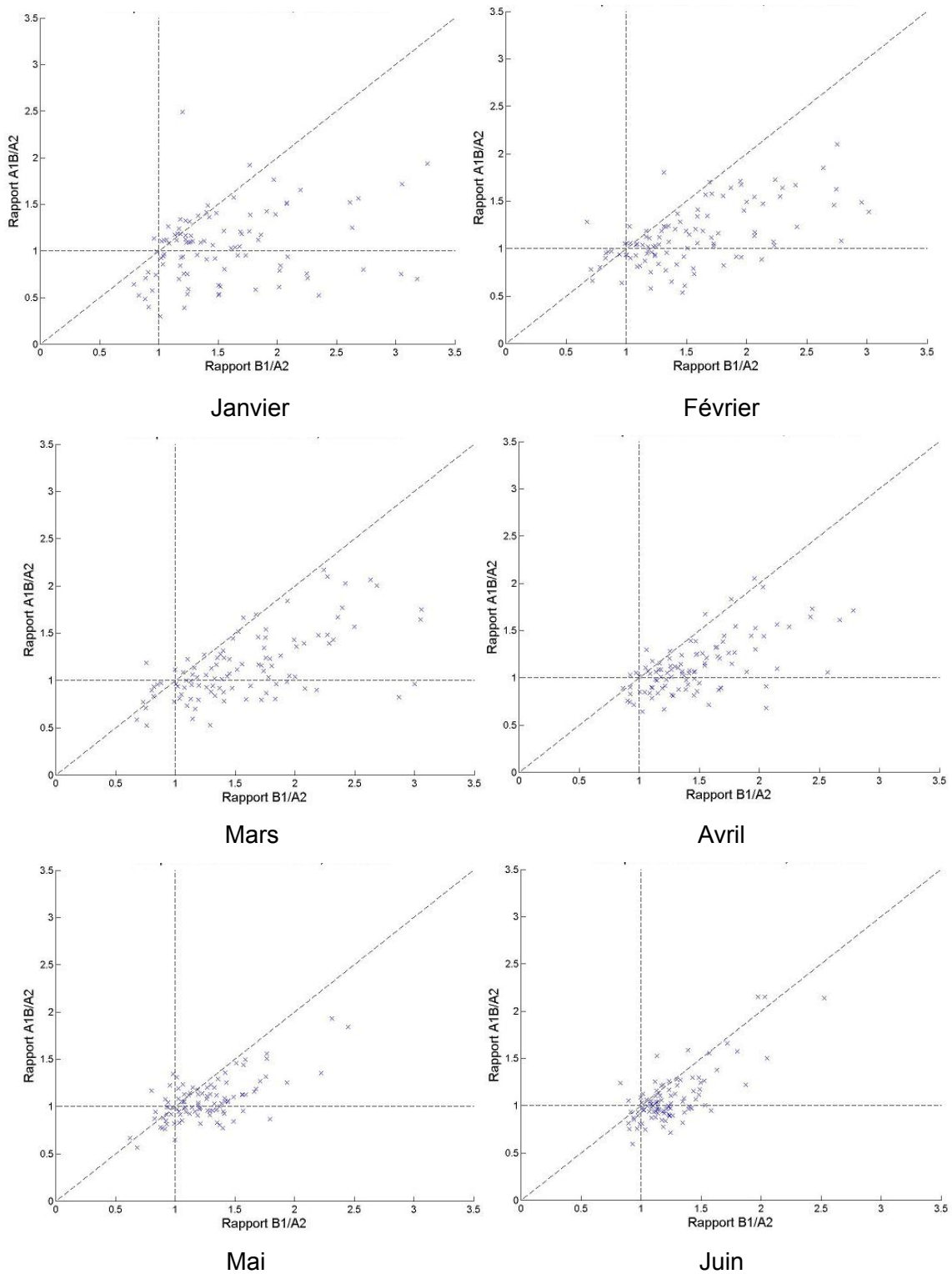


Figure 6.6 Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les précipitations mensuelles pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de janvier à juin

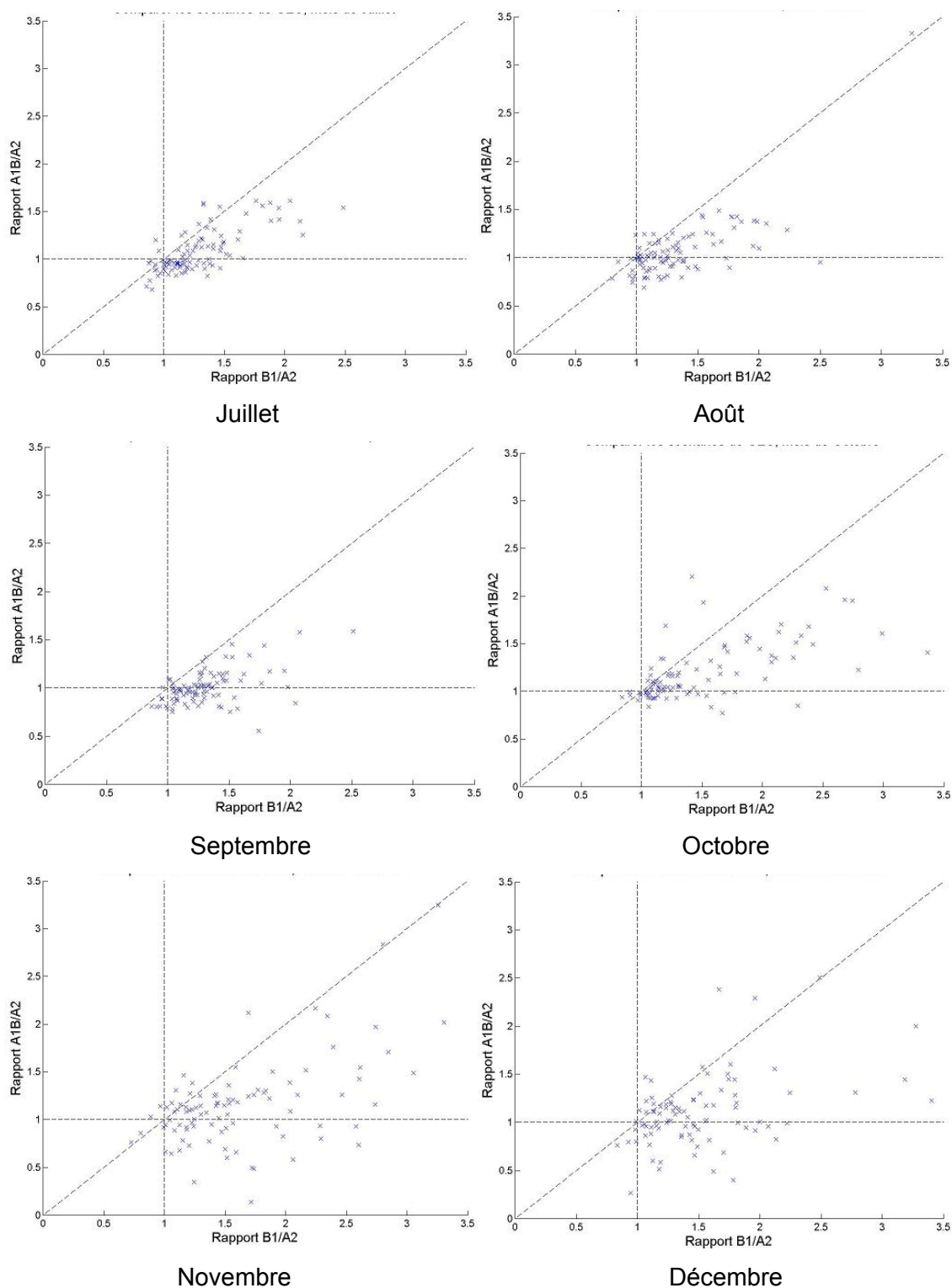


Figure 6.7 Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les précipitations mensuelles pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de juillet à décembre.

6.3 Variations sur la période 1900-2100

Les figures 6.8 à 6.11 présentent la moyenne multimodèle des variations relatives moyennes des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour le groupe de simulations appartenant à la classe de tendances qui domine en chaque tuile pour le scénario A2 (l'annexe C regroupe les cartes correspondantes pour les scénarios A1B et B1). Ces variations sont estimées en comparant les valeurs moyennes des précipitations mensuelles en 2100 par rapport aux valeurs correspondantes en 1900 et en effectuant la moyenne multimodèle de ces écarts, telle que décrite à la section 5.6 (la variation de la moyenne sur la période 1900-2100 est exprimée en pourcentage de la moyenne en 1900 pour chaque simulation). Seules les variations relatives moyennes associées à la tendance la plus probable de survenir en une tuile donnée sont considérées. Il faut se souvenir toutefois que, pour certaines tuiles, comme le montrent bien les figures 6.1 à 6.6, les probabilités d'obtenir une tendance positive (ou négative dans certains cas) ou de ne pas avoir de tendance sont parfois à peu de chose près égales.

L'examen de ces figures montre que :

- Les augmentations les plus importantes (de l'ordre de 10 à 20 %) surviennent pendant les mois d'hiver (décembre, janvier et février) et affectent principalement les régions les plus au nord, et notamment les régions au pourtour de la baie d'Hudson. La région sud-ouest du territoire considéré ne montre pas d'augmentation ou que de faibles hausses des précipitations durant ces mois.
- La quasi-totalité du territoire subirait de faibles augmentations (moins de 15 %) des précipitations moyennes mensuelles pendant les mois de février, mars et avril. Encore ici, la région nord du Québec serait plus affectée, notamment en février et en mars.
- Les augmentations projetées s'estompent graduellement lorsque l'on s'approche des mois d'été pour les parties centrales et à l'est. Par ailleurs, un profil de diminution des précipitations pour la partie sud-ouest du territoire se construit au fil des mois de printemps et d'été, culminant en juillet, mois où la diminution serait observable sur un plus grand territoire. Cette zone affectée par de possibles diminutions s'estompe

graduellement au cours des mois d'août et de septembre pour disparaître complètement en octobre.

- Les mois d'octobre, novembre et décembre se caractérisent par une augmentation du territoire sujet à des accroissements des précipitations depuis le nord vers le sud. Les variations relatives estimées augmentent elles aussi, étant plus marquées pour les parties nord.

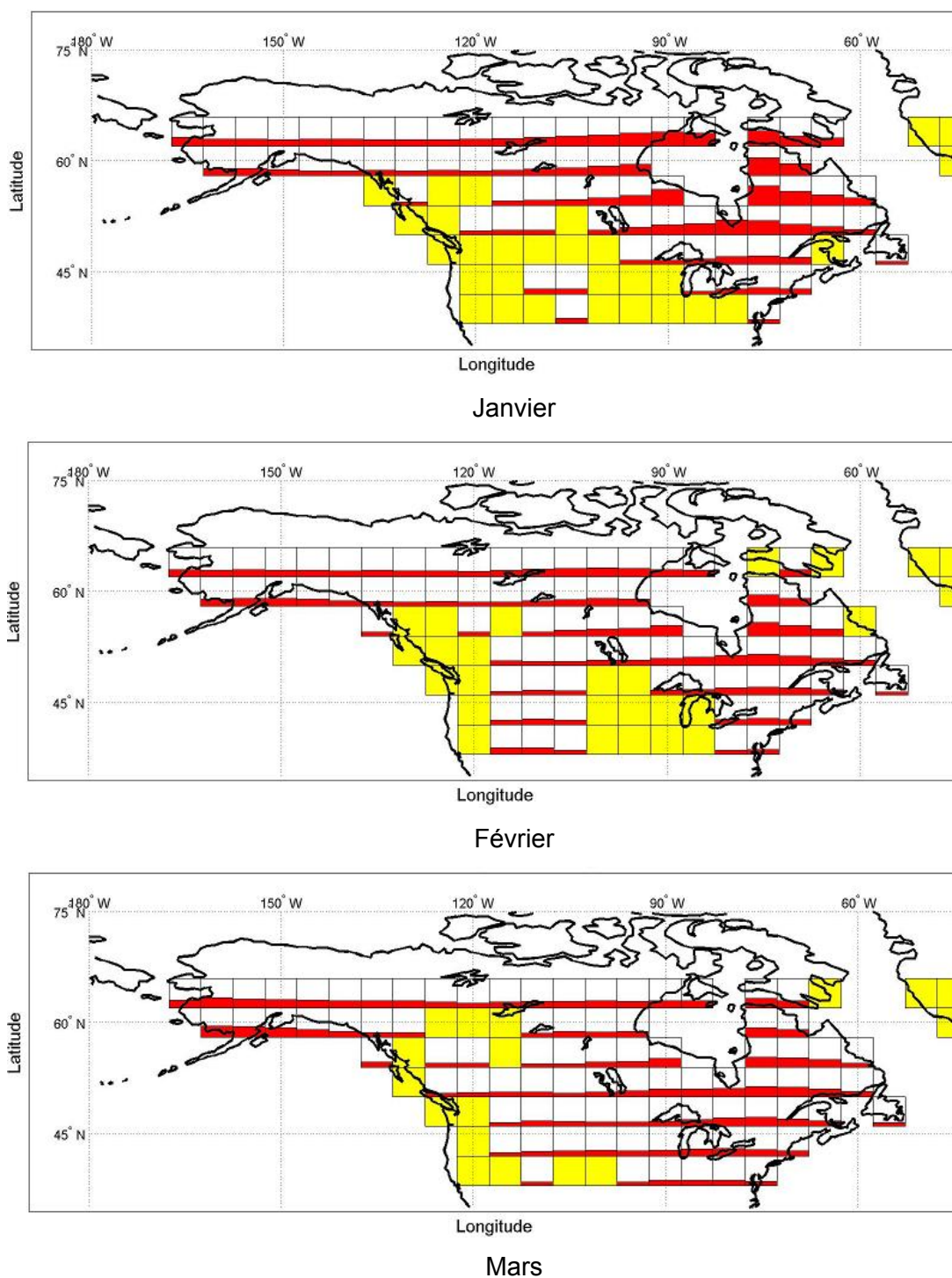


Figure 6.8 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (les tuiles sans tendance significative sont en jaune). La fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la moyenne multimodèle, une couverture totale de la tuile correspondant à une variation de 100 %

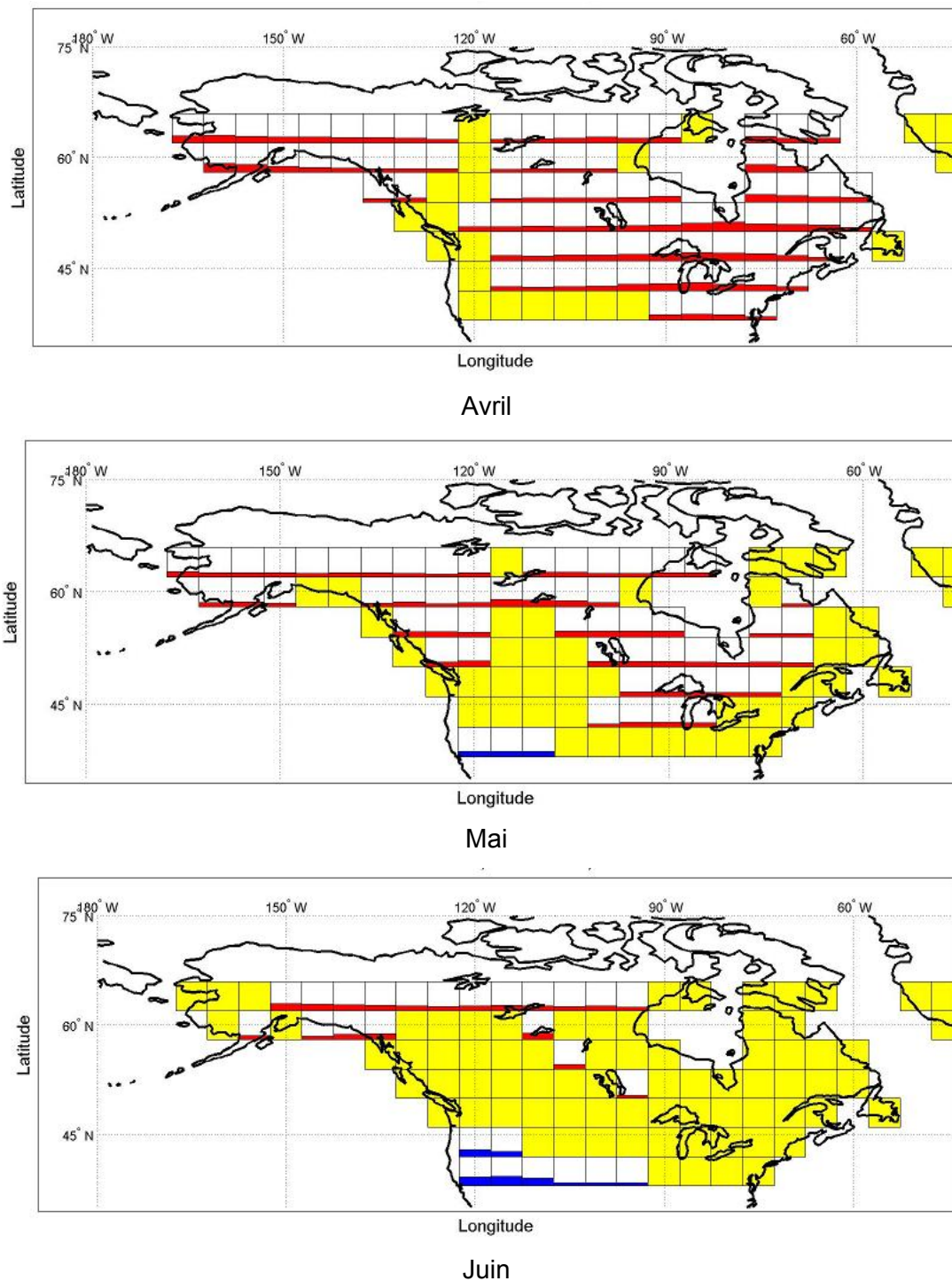
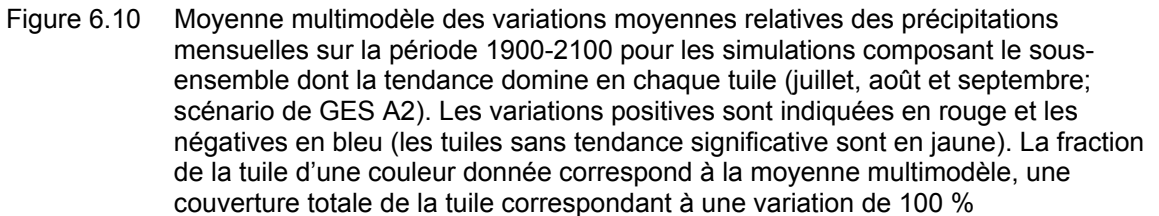


Figure 6.9 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (les tuiles sans tendance significative sont en jaune). La fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la moyenne multimodèle, une couverture totale de la tuile correspondant à une variation de 100 %



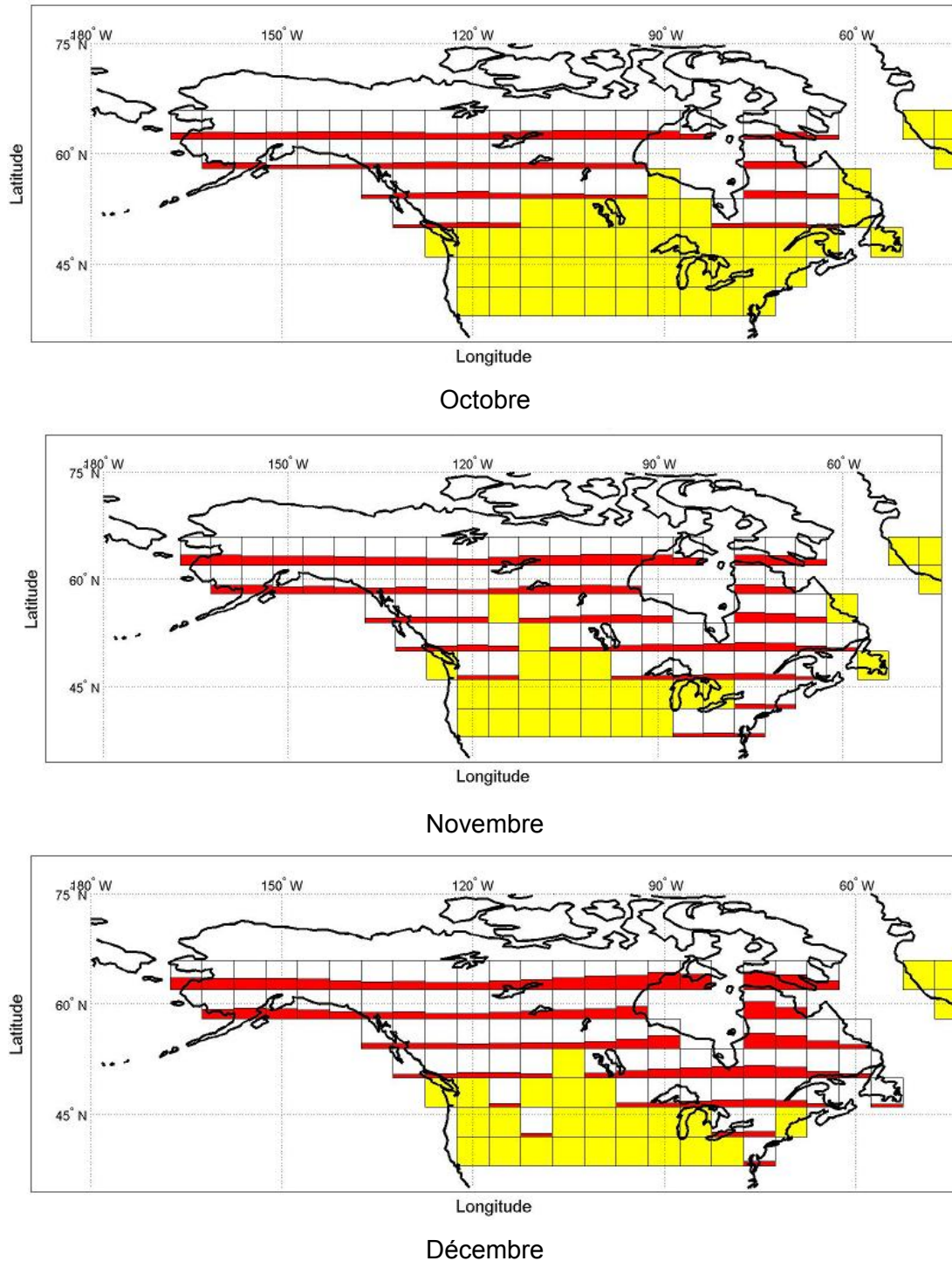


Figure 6.11 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (les tuiles sans tendance significative sont en jaune). La fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la moyenne multimodèle, une couverture totale de la tuile correspondant à une variation de 100 %

6.4 Analyse des précipitations pour les tuiles du sud du Québec

Un examen des tuiles couvrant la partie sud du Québec a été effectué (Figure 6.12). Les résultats pour ces tuiles, au nombre de quatre, sont d'abord analysés en fonction des variations à l'horizon 2100 (section 6.4.1) et ensuite à l'horizon 2050 (section 6.4.2).

6.4.1 Variations des précipitations à l'horizon 2100

La figure 6.13 présente la moyenne des probabilités d'obtenir une tendance positive, négative ou aucune tendance sur ces tuiles, pour chacun des trois scénarios de GES considérés. Ces trois graphiques suggèrent une nette dominance des probabilités de tendances à la hausse des précipitations mensuelles pour les mois de janvier, mars, avril et décembre, particulièrement pour les scénarios A1B et A2. Par ailleurs, la probabilité de ne pas observer de tendance domine pour les autres mois, sauf février et novembre, pour lesquels la probabilité ne pas observer de tendance significative domine pour le scénario B1, alors que la probabilité de tendance à la hausse domine pour les deux autres scénarios. Il est intéressant de noter que des probabilités non nulles de tendance à la baisse apparaissent pour les mois de juin à octobre mais que celles-ci sont nettement inférieures aux probabilités de ne pas observer de tendance et qu'elles sont plus marquées pour le scénario A2.

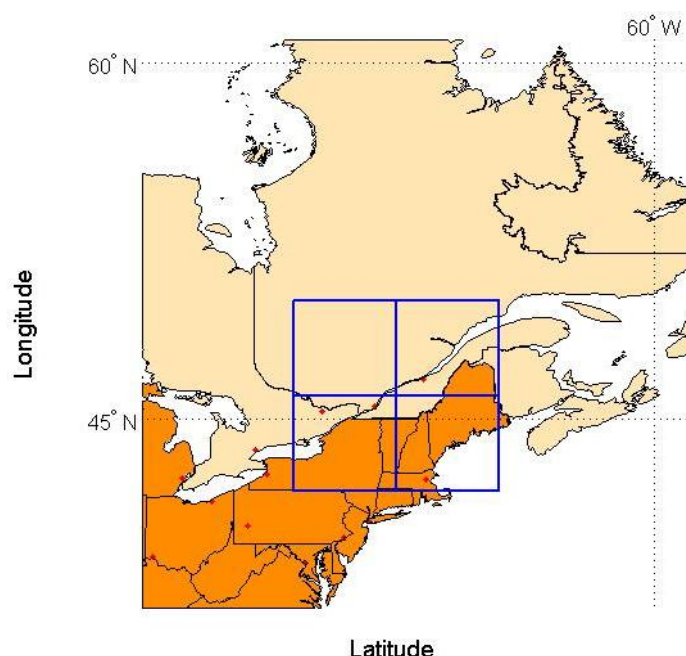
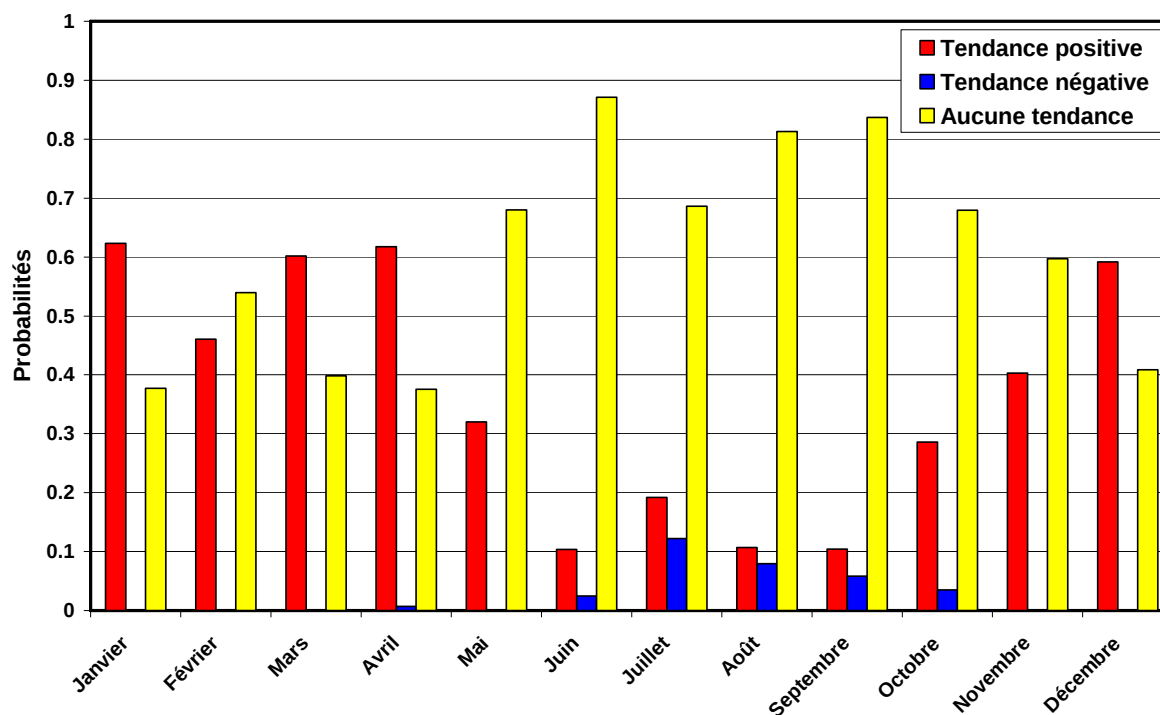
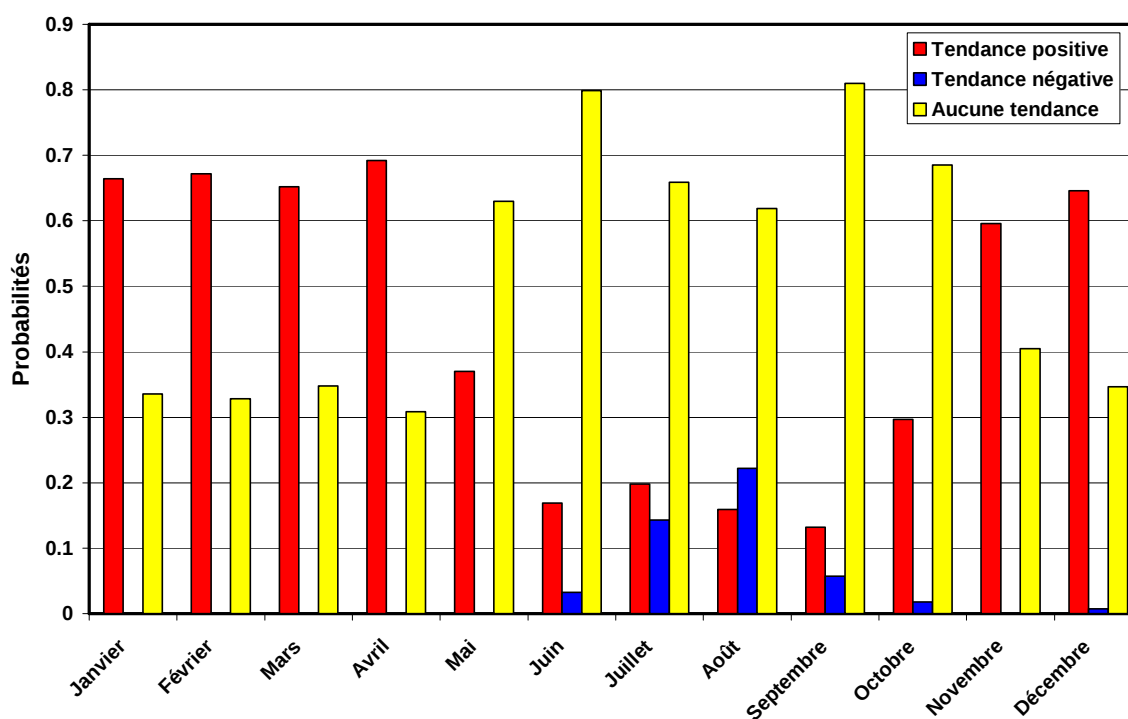


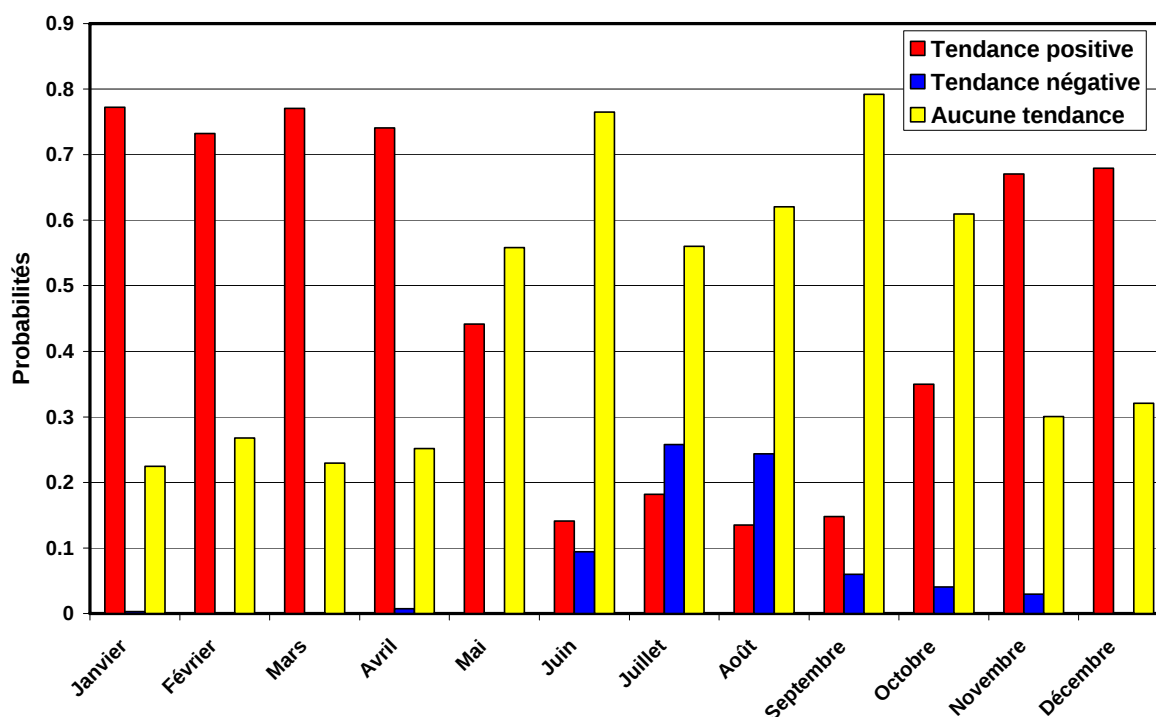
Figure 6.12 Tuiles considérées pour l'analyse sur le sud-Québec



(a)



(b)



(c)

Figure 6.13 Probabilités de tendances positives, négatives ou d'absence de tendance significatives pour les précipitations sur les tuiles du sud du Québec pour les scénarios (a) B1; (b) A1B; (c) A2

Une comparaison des probabilités de ne pas détecter de tendance pour chaque mois selon les trois scénarios de GES montre clairement une gradation de ces probabilités selon la séquence $p_{B1} > p_{A1B} > p_{A2}$ (sauf pour le mois d'octobre où p_{B1} est légèrement inférieure à p_{A1B} ; voir Figure 6.14). Ce résultat, très intéressant, suggère, comme les analyses antérieures le montraient pour l'ensemble du territoire sous étude, des tendances de plus en plus marquées à l'horizon 2100 lorsque le forçage anthropique augmente. Par ailleurs, tous les scénarios de GES montrent un profil annuel similaire avec une augmentation des probabilités d'absence de tendance autour des mois de mai à octobre. Enfin, les différences de probabilités les plus marquées entre les scénarios A2 (pessimiste) et B1 (optimiste) surviennent pendant les mois pour lesquels les probabilités de ne pas observer de tendance sont les plus faibles (mois de janvier, février, mars et avril) suggérant du coup une plus grande sensibilité de ces mois au forçage anthropique.

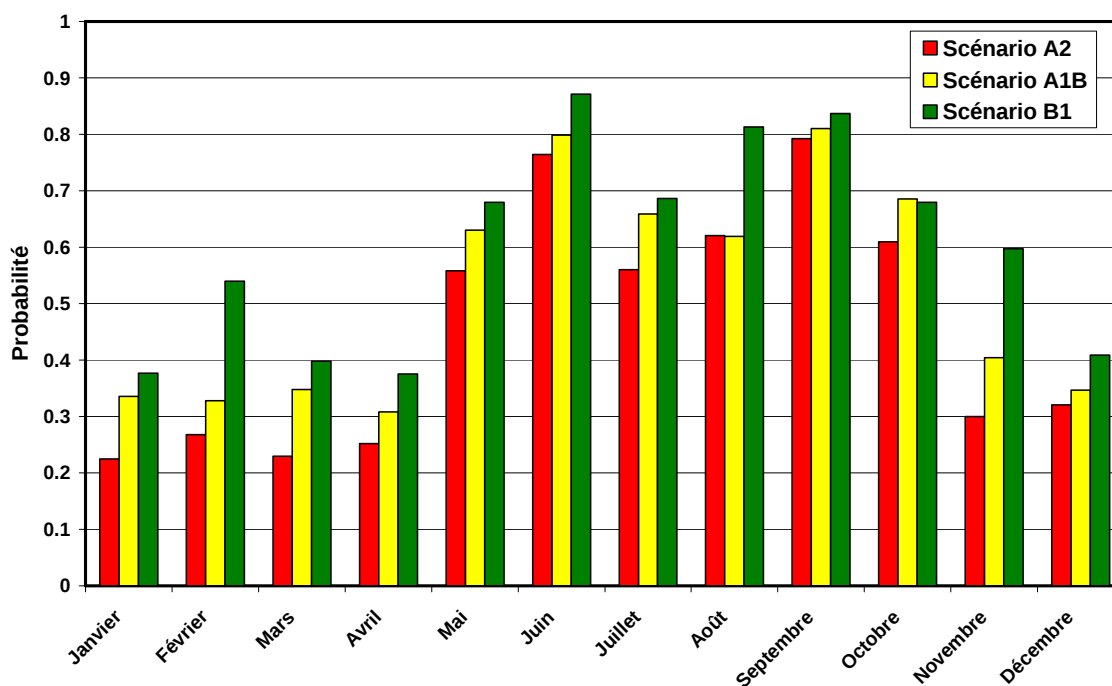


Figure 6.14 Probabilités moyennes pour les tuiles du sud du Québec de ne pas détecter de tendances sur la période 1900-2100 pour les trois scénarios de GES considérés

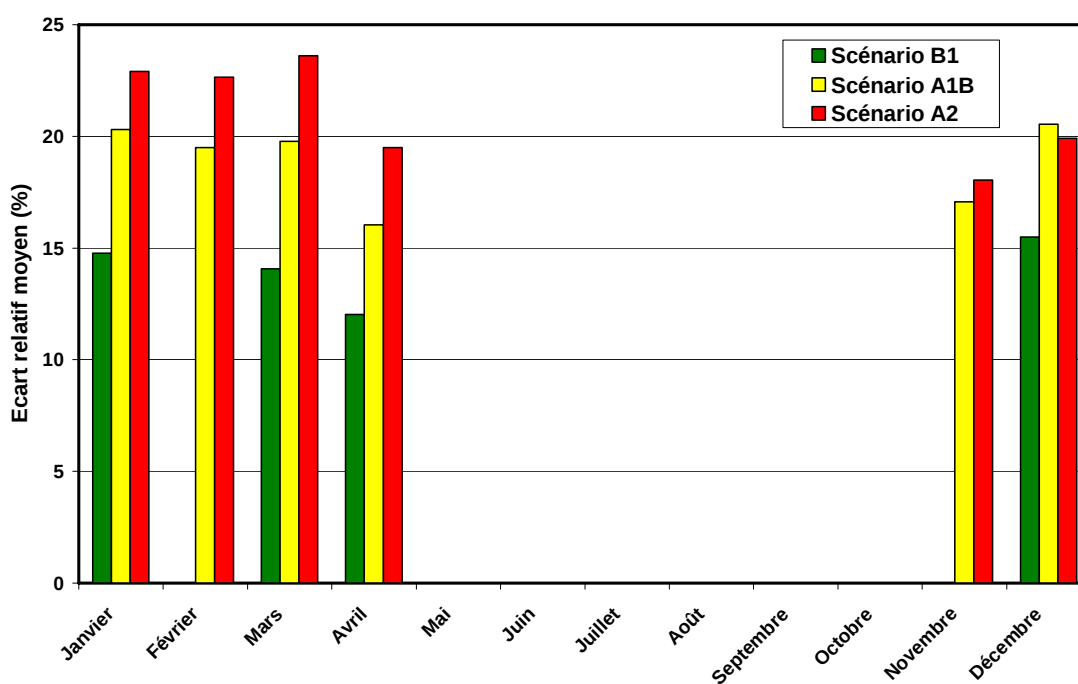


Figure 6.15 Variations moyennes sur la période 1900-2100 conditionnellement à l'occurrence des tendances les plus probables sur les tuiles sud-Québec pour les trois scénarios de GES considérés

La variation moyenne pour le sud du Québec des précipitations mensuelles durant la période 1900-2100 a également été évaluée en considérant la tendance la plus probable pour chaque mois (Figure 6.15). D'abord, il faut noter que les trois scénarios de GES suggèrent une absence de tendances significatives pour les mois de mai à octobre, d'où des écarts nuls pour ces mois (signal climatique stationnaire). Le scénario B1 ajoute à ces mois les mois de novembre et février. Les variations pour les mois où la tendance à la hausse domine varient entre 12 et 16 % pour le scénario B1, 16 et 21 % pour le scénario A1B et enfin 18 et 24 % pour le scénario A2.

Il est très important de bien comprendre la nature du résultat précédent. L'affirmation selon laquelle, par exemple, une hausse de 24 % des précipitations mensuelles en mars est appréhendée selon le scénario A2 signifie que, conditionnellement à l'apparition d'une tendance à la hausse des précipitations, l'écart moyen sur la période 1900-2100 serait de 24 % (probabilité conditionnelle). Ceci n'exclut pas la possibilité de ne pas observer de tendance significative en mars puisqu'il subsiste une probabilité de 23 % qu'il en soit ainsi (voir Figure 6.13c). Les différences entre les probabilités de détecter les différentes tendances s'amenuisent dans les « mois de transition » (mai et octobre), qui se situent entre les périodes nettement marquées par des probabilités beaucoup plus élevées de tendances à la hausse et les périodes où l'absence de tendance domine. De même, l'absence de tendance rapportée à la figure 6.15 pour le mois de février, selon le scénario B1, doit être relativisée, sachant qu'il subsiste pour ce mois une probabilité de 46 % qu'une tendance positive se dégage.

En résumé, le scénario climatique le plus probable pour la région du sud du Québec au cours de la période 1900-2100, selon les résultats des analyses de la présente étude, favorise une tendance à la hausse des précipitations pour les mois de janvier à avril et les mois de novembre et décembre, alors qu'aucune tendance significative n'apparaît pour les autres mois de l'année. Les variations moyennes appréhendées durant la période 1900-2100 s'amenuisent selon que l'on considère successivement les scénarios A2, A1B et B1.

6.4.2 Variations des précipitations à l'horizon 2050

Les variations à l'horizon 2050 ont été estimées en utilisant les résultats de tendances obtenus pour la période 1900-2100. C'est dire que les variations ont été moyennées sur les tuiles où la probabilité d'une tendance significative positive était plus élevée qu'une absence de tendance à l'horizon 2100. Les tendances n'ont donc pas été réévaluées en supposant des séries tronquées à l'année 2050. La figure 6.16 présente les résultats ainsi obtenus. Les variations pour les mois où la tendance à la hausse domine varient entre 9 et 12 % pour le scénario B1 (comparativement à 12 et 16 % à l'horizon 2100), 12 et 15 % pour le scénario A1B (comparativement à 16 et 21 % à l'horizon 2100) et enfin 13 à 17 % pour le scénario A2 (comparativement à 18 et 24 % à l'horizon 2100).

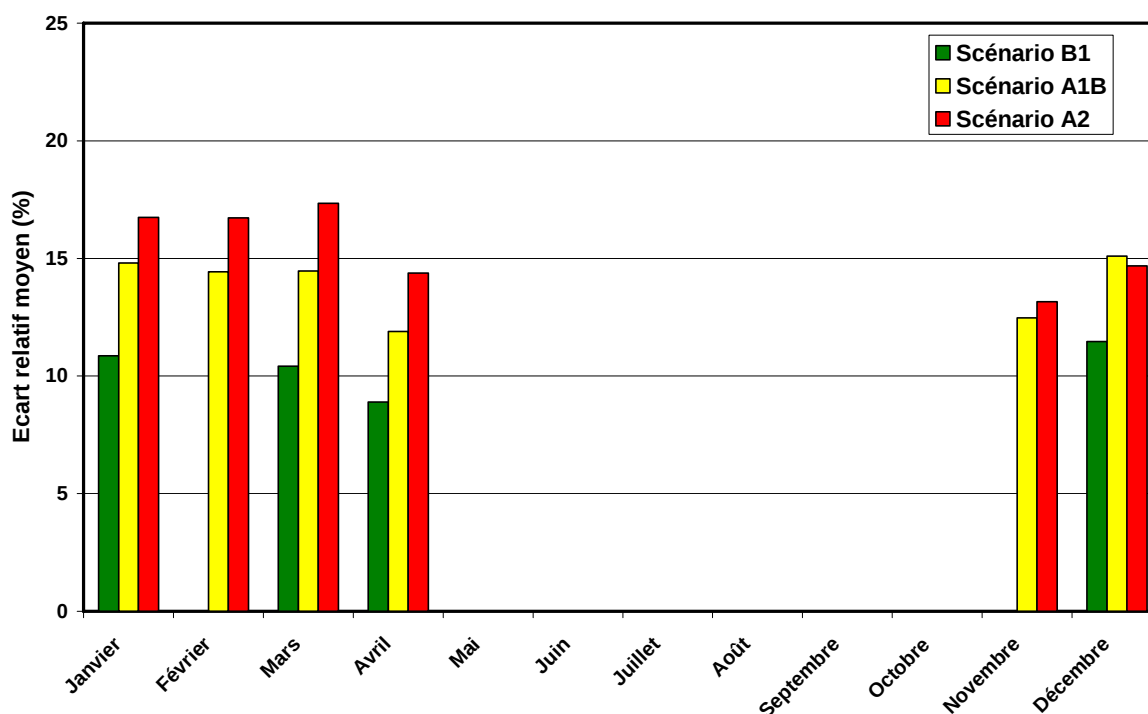


Figure 6.16 Variations moyennes sur la période 1900-2050 conditionnellement à l'occurrence des tendances les plus probables à l'horizon 2100 sur les tuiles sud-Québec pour les trois scénarios de GES considérés.

7. Projections climatiques pour les écoulements

L'analyse à partir des seules données de précipitations mensuelles, même si elle livre certaines informations très pertinentes, ne permet pas d'évaluer les effets combinés que des hausses de température et des changements au régime de précipitations pourront avoir sur le régime hydrologique terrestre. Lors de la mise en place d'un modèle hydrologique dépassant largement le contexte de la présente étude, il a été décidé d'examiner une autre variable simulée par les modèles globaux, à savoir l'écoulement. Les analyses des écoulements mensuels visent essentiellement à vérifier si la réponse des différents modèles présente une certaine cohérence et si cette réponse est elle-même cohérente avec les résultats précédemment obtenus pour les précipitations mensuelles. En effet, considérant que, globalement, les précipitations mensuelles sur l'ensemble du territoire augmenteront ou resteront stationnaires, il est logique de penser que, pour les régions où les précipitations resteront stationnaires, les volumes d'eau disponibles pour l'écoulement diminueront suite à une hausse des températures globales (augmentation de l'évaporation/évapotranspiration; voir Huntingdon, 2003). À l'opposé, si les précipitations augmentent, l'effet combiné des hausses de température et des précipitations risque de s'annuler en partie. Évidemment, plusieurs considérations locales peuvent aussi jouer.

La méthode d'analyse utilisée pour les écoulements est identique à celle décrite au chapitre 5, qui a déjà été utilisée pour l'analyse des précipitations mensuelles. Les sections suivantes dressent d'abord un portrait des résultats obtenus pour l'analyse multimodèle des tendances (section 7.1). Une analyse comparative des tendances selon les différents scénarios de GES est aussi menée (section 7.2). L'estimation des moyennes multimodèles des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 est présentée à la section 7.3, suivie par une discussion plus spécifique des résultats pour les tuiles couvrant la partie sud du Québec pour les horizons 2100 et 2050 (section 7.4).

7.1 Tendances

Les statistiques sur les tendances résultant de l'analyse multimodèle pour les différents mois et selon les différents scénarios de GES sont présentées aux figures 7.1 à 7.4 (seules les tendances pour le scénario A2 sont présentées; l'annexe D regroupe les

résultats pour les scénarios A1B et B1). Un certain nombre de constats se dessinent de l'examen de ces cartes :

- D'abord, il appert que les tendances simulées semblent étonnamment cohérentes d'un modèle à l'autre pour les mois d'octobre, novembre, décembre, janvier, février et mars. Cette tendance à la hausse s'étend à l'automne pour atteindre son extension maximale en décembre et janvier et ensuite se résorber au printemps.
- *A contrario* de cette évolution des tuiles à tendance positive, se développe au sud une zone de tendance négative. Cette zone s'étend d'est en ouest et atteint son apogée en matière d'extension et d'amplitude au mois de juin, notamment au Québec et sur la côte ouest.
- Aucune tendance ne domine pour le centre du Canada et des États-Unis pour les mois de mai à septembre.

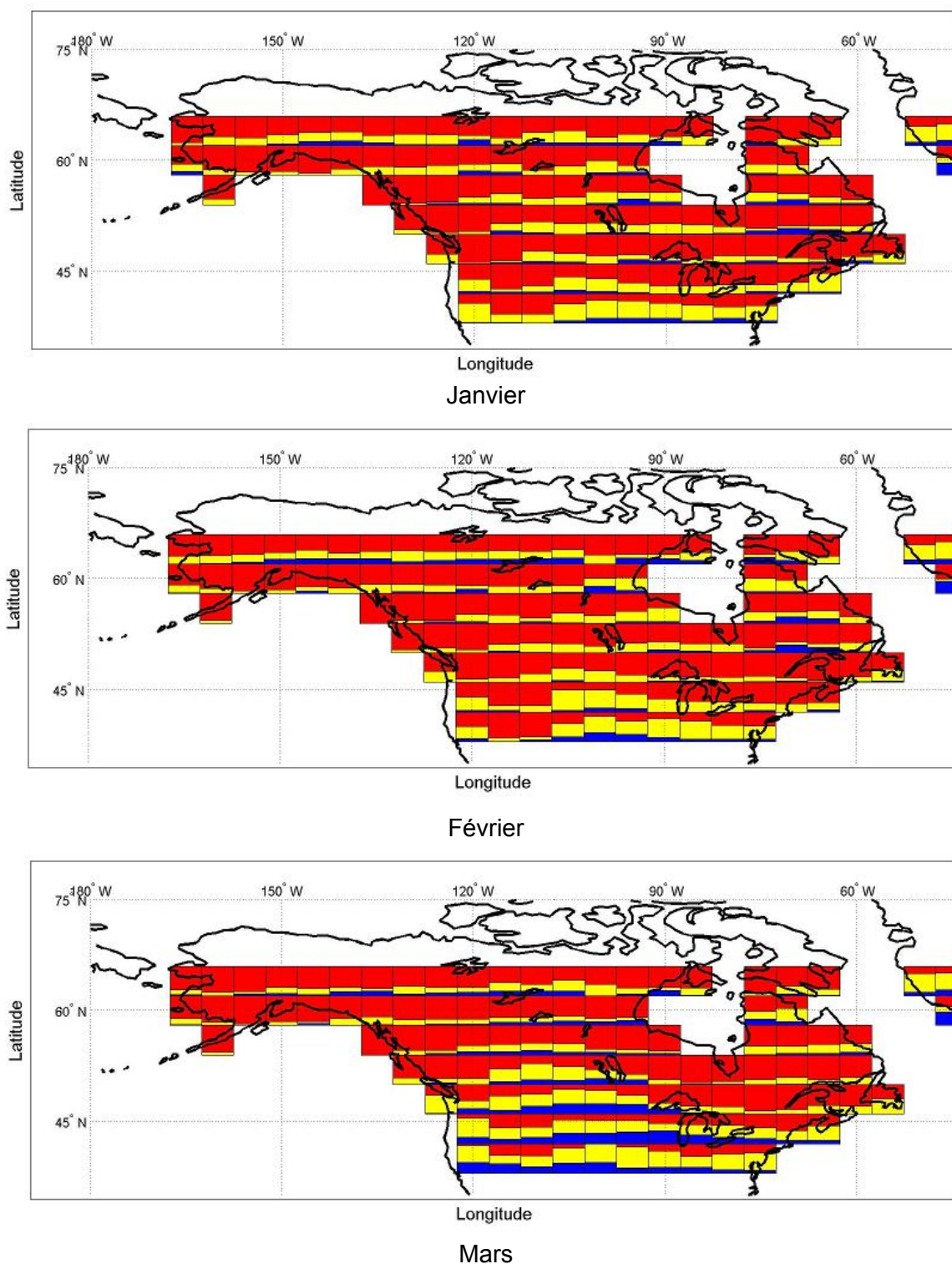


Figure 7.1 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

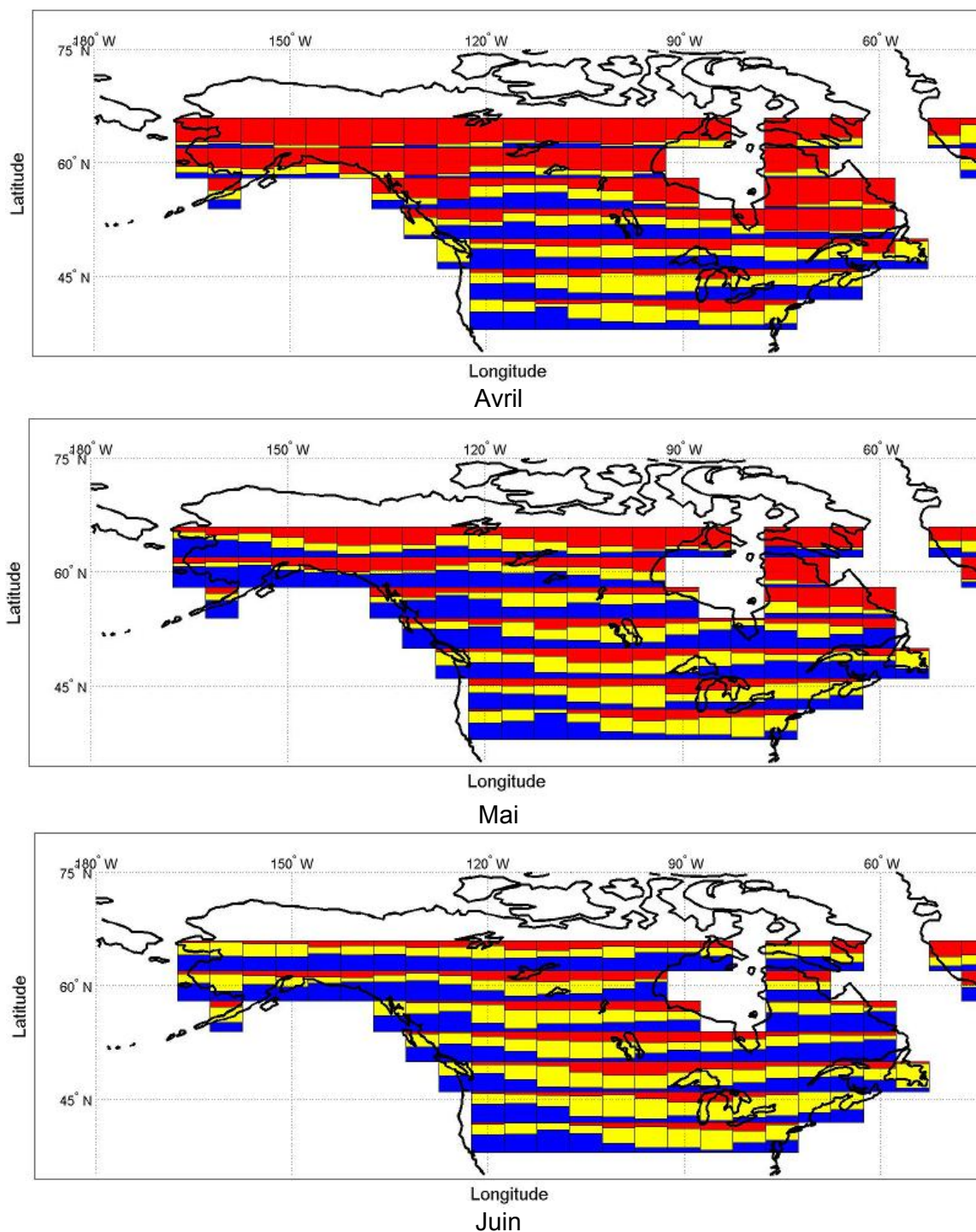


Figure 7.2 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

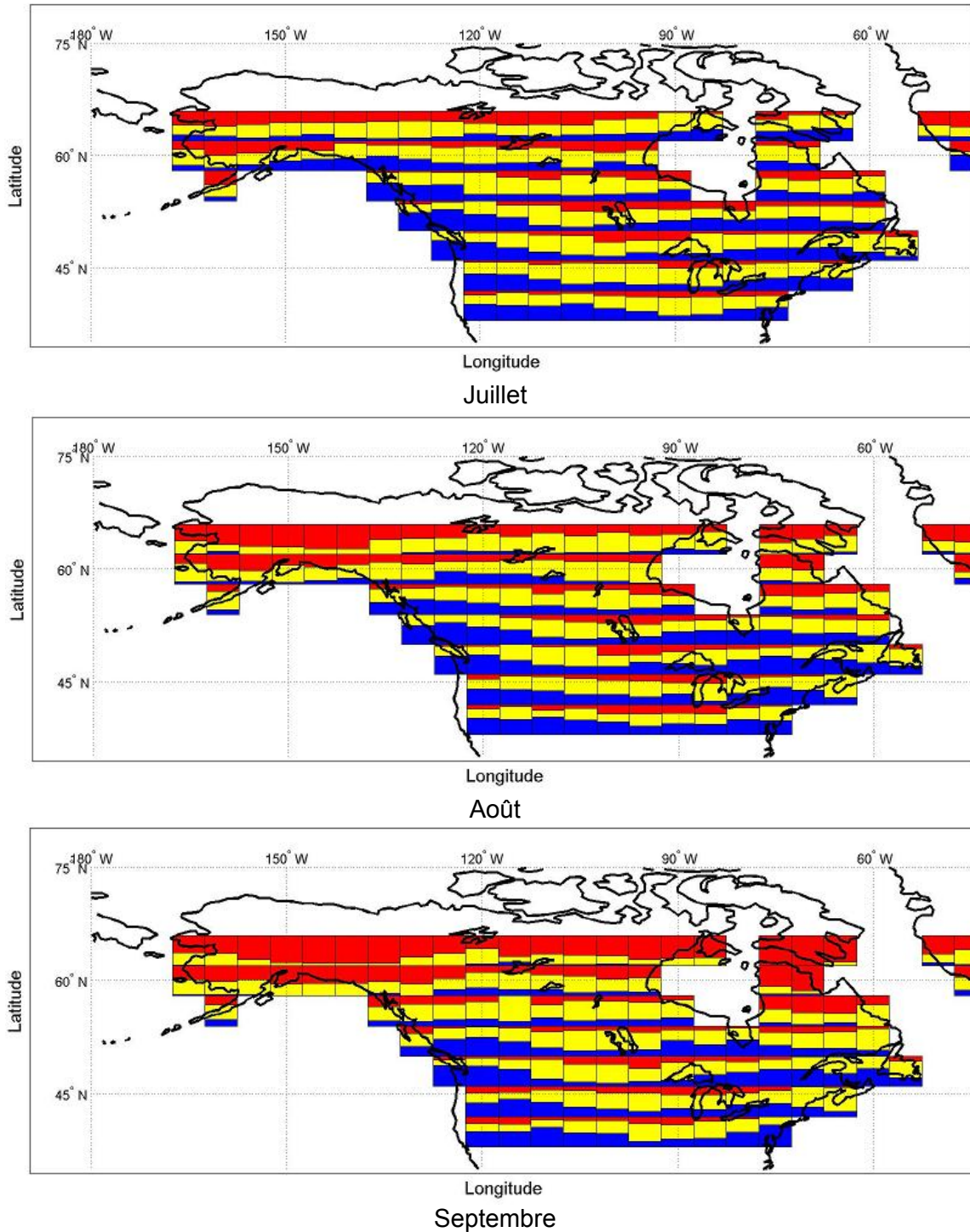


Figure 7.3 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

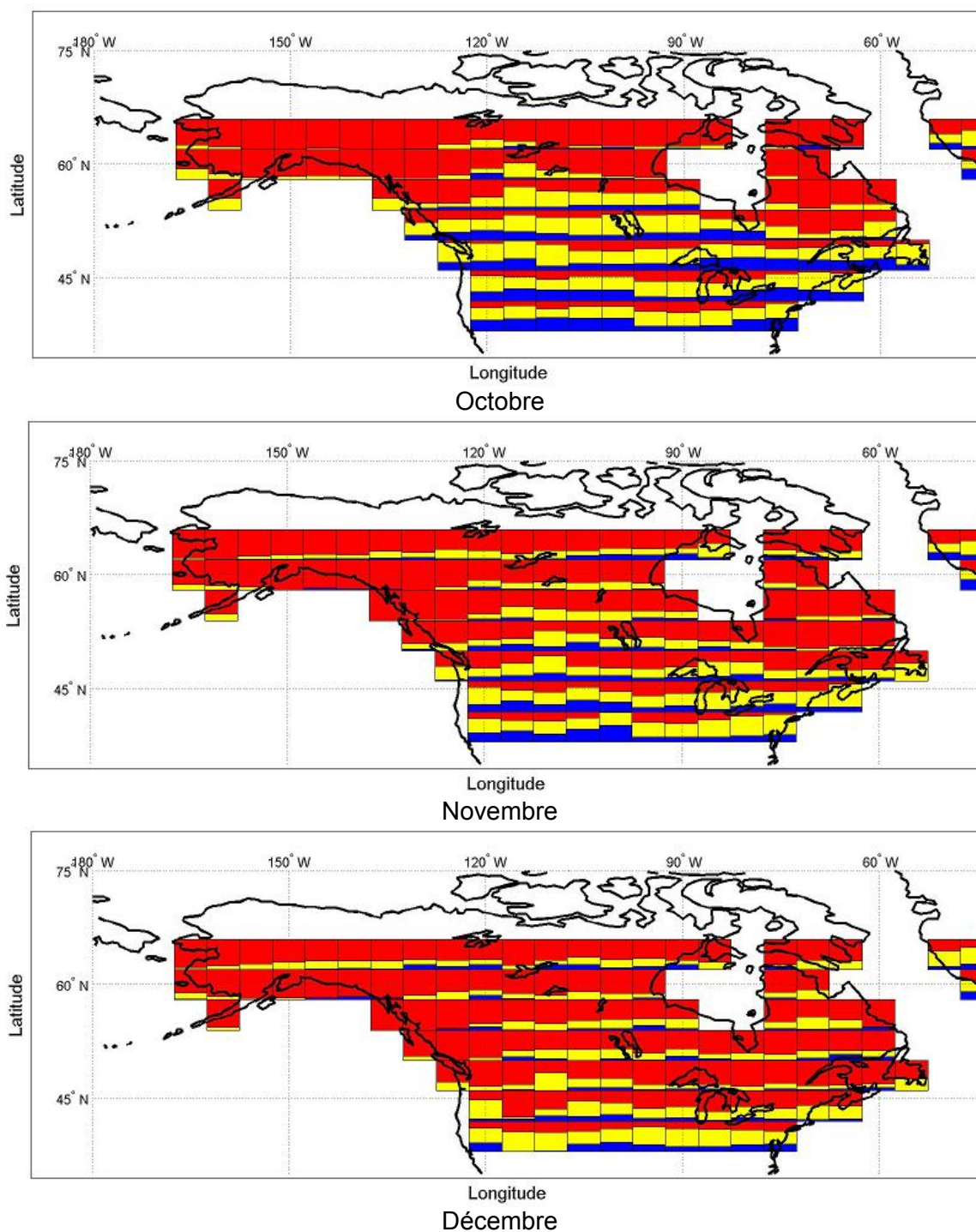


Figure 7.4 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

7.2 Tendances et scénarios de GES

Une comparaison des tendances détectées en fonction des différents scénarios de GES considérés a été réalisée selon la méthode présentée à la section 6.2 du chapitre précédent. Les figures 7.5 et 7.6 présentent les graphiques des ratios (u_1, u_2) (voir section 6.2). L'examen de ces graphiques ne montre pas une nette prépondérance de points localisés dans les régions A ou C ($p_{B1} > p_{A2}$ et $p_{B1} > p_{A1B}$) comme observée dans le cas des précipitations mensuelles (voir figures 6.6 et 6.7 de la section 6.2). Les fractions des tuiles pour lesquelles $p_{B1} > p_{A2}$, $p_{B1} > p_{A1B}$ ou $p_{A1B} > p_{A2}$ sont indiquées au tableau 7.1. Les différences entre les résultats issus des simulations associées aux différents scénarios de GES sont de fait beaucoup moins marquées que dans le cas des précipitations mensuelles. Si une distinction en matière de tendance émerge globalement lorsque l'on compare le scénario B1 avec les scénarios A1B ou A2, aucune différence significative n'apparaît lorsque l'on compare les scénarios A2 et A1B.

7.3 Variations sur la période 1900-2100

Les figures 7.7 à 7.11 présentent la moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour le groupe de simulations appartenant à la classe de tendances qui domine en chaque tuile (seuls les résultats du scénario A2 sont présentés; l'annexe E regroupe les figures correspondantes pour les scénarios A1B et B1).

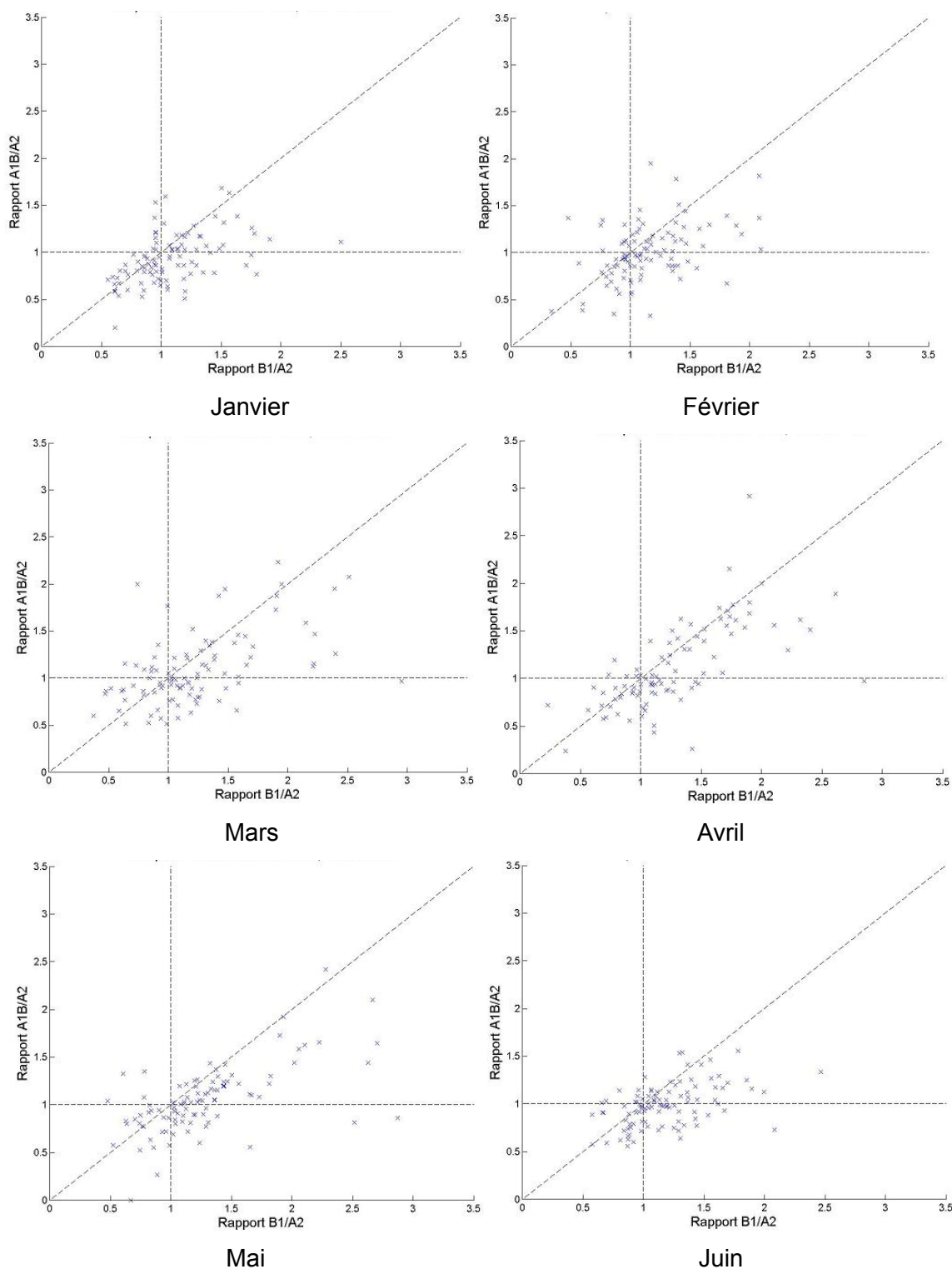


Figure 7.5 Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les écoulements mensuels pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de janvier à juin

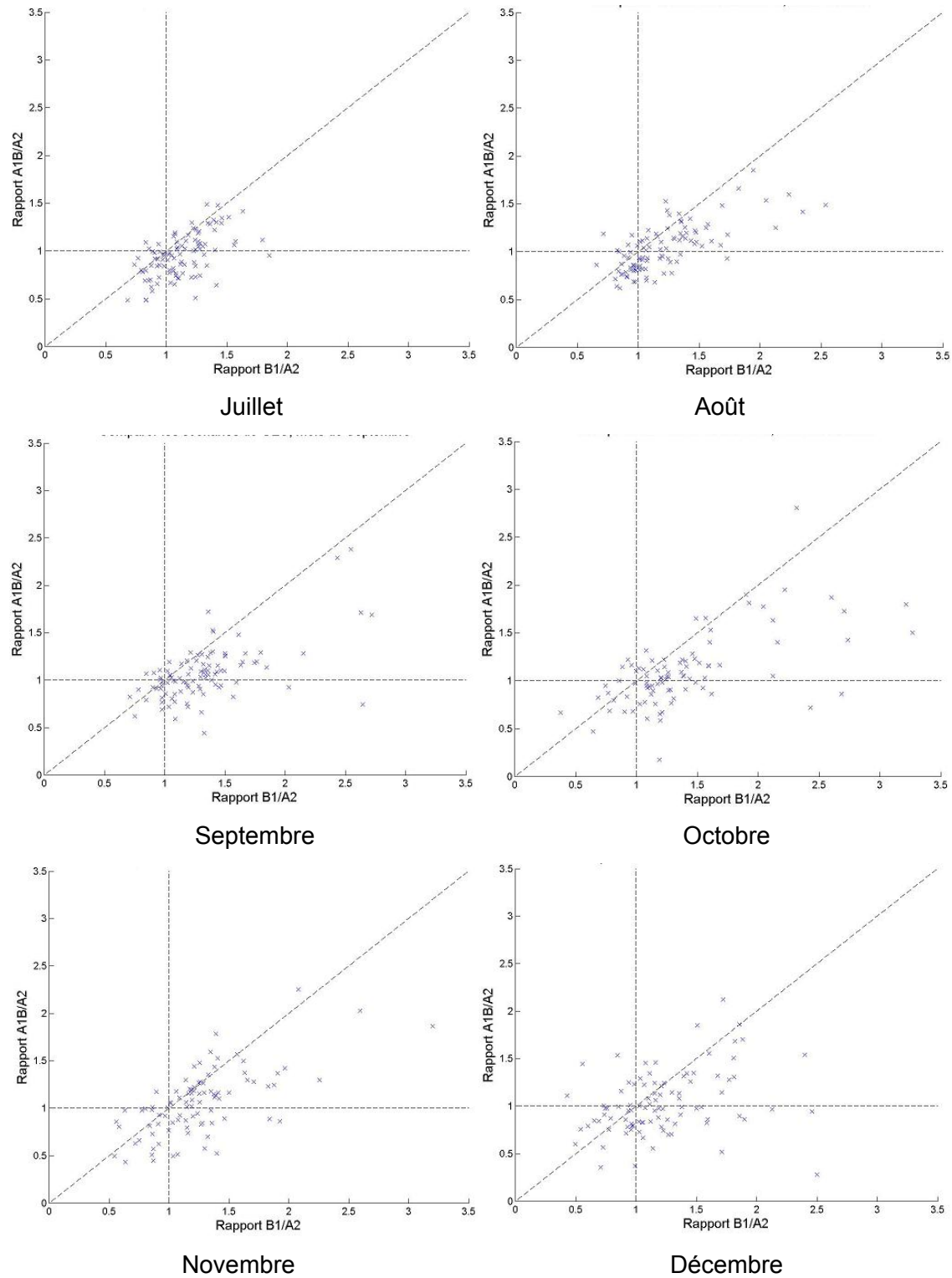


Figure 7.6 Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les écoulements mensuels pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de juillet à décembre

Tableau 7.1 Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A2}$, $p_{B1} > p_{A1B}$ ou $p_{A1B} > p_{A2}$ pour les séries des écoulements

Mois	Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A2}$	Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A1B}$	Fraction de tuiles avec $p_{A1B} > p_{A2}$
Janvier	0,52	0,67	0,38
Février	0,64	0,75	0,47
Mars	0,67	0,63	0,49
Avril	0,71	0,71	0,51
Mai	0,74	0,79	0,54
Juin	0,66	0,77	0,47
Juillet	0,69	0,81	0,43
Août	0,70	0,79	0,51
Septembre	0,83	0,82	0,58
Octobre	0,83	0,83	0,57
Novembre	0,74	0,67	0,58
Décembre	0,67	0,68	0,44

Il est important de noter, dans un premier temps, que les variations relatives estimées dépassent dans plusieurs cas les 100 % (ces tuiles sont indiquées en marron sur les cartes des figures 7.7 à 7.11). Ce résultat tient au fait que les écoulements pour certaines régions en certains mois sont très faibles (notamment pour les régions nord en hiver) et que, conséquemment, une augmentation même modeste en valeur absolue se traduira par une augmentation relative très importante.

Les constats suivants se dégagent de l'examen de ces cartes :

- Les augmentations relatives des écoulements les plus importants surviennent dans la partie nord du territoire considéré; l'étendue maximale de cette région (en marron sur les cartes) de forte croissance relative survient pendant les mois de décembre et janvier; l'étendue de cette région diminue au fil des mois.
- Des tendances à la baisse sont observées pour certaines régions (côte ouest, région autour des Grands-Lacs et de la baie d'Hudson); le nombre de tuiles affectées par ces baisses varie au cours des mois d'avril à septembre et n'affecte plus que quelques tuiles en octobre et novembre. Ces écarts relatifs à la baisse demeurent somme toute modestes dans la grande majorité des cas.

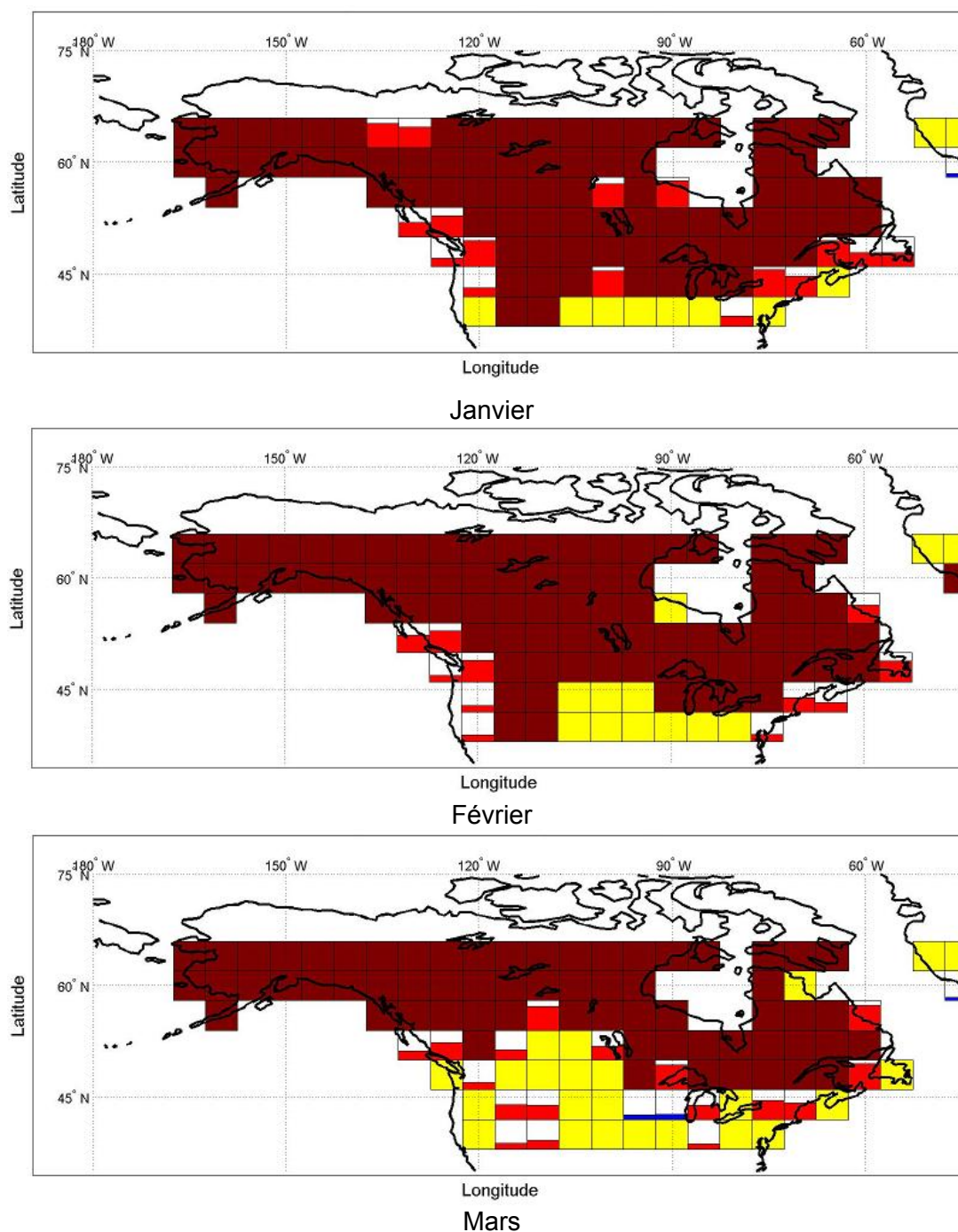


Figure 7.7 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (les tuiles sans tendance significative sont en jaune). La fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la moyenne multimodèle, une couverture totale de la tuile correspondant à une variation de 100 %. Les tuiles marron présentent des accroissements de plus de 100 %

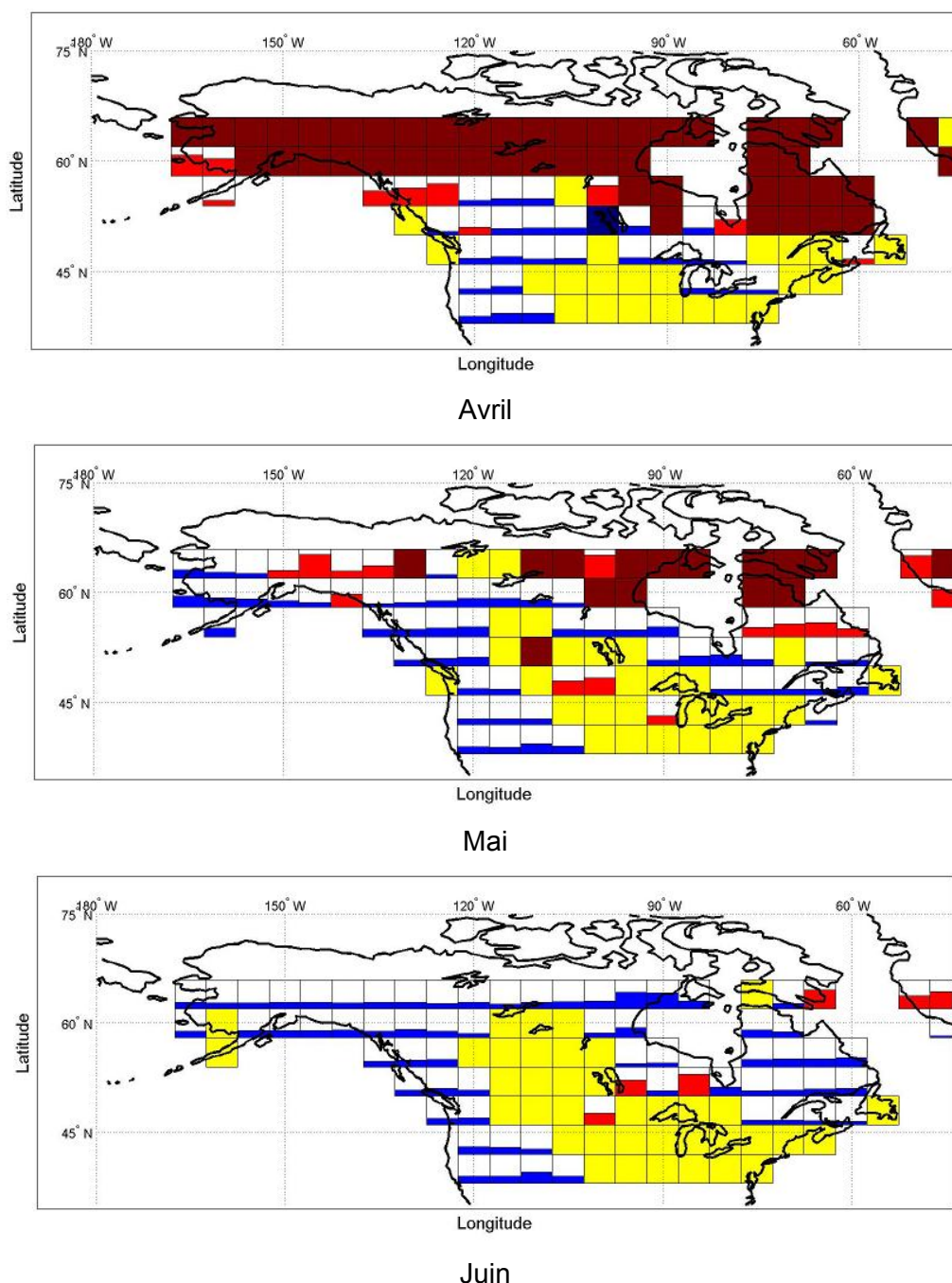


Figure 7.8 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (les tuiles sans tendance significative sont en jaune). La fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la moyenne multimodèle, une couverture totale de la tuile correspondant à une variation de 100 %. Les tuiles marron et bleu marin présentent respectivement des accroissements de plus de 100 % et des réductions de plus de 100 %

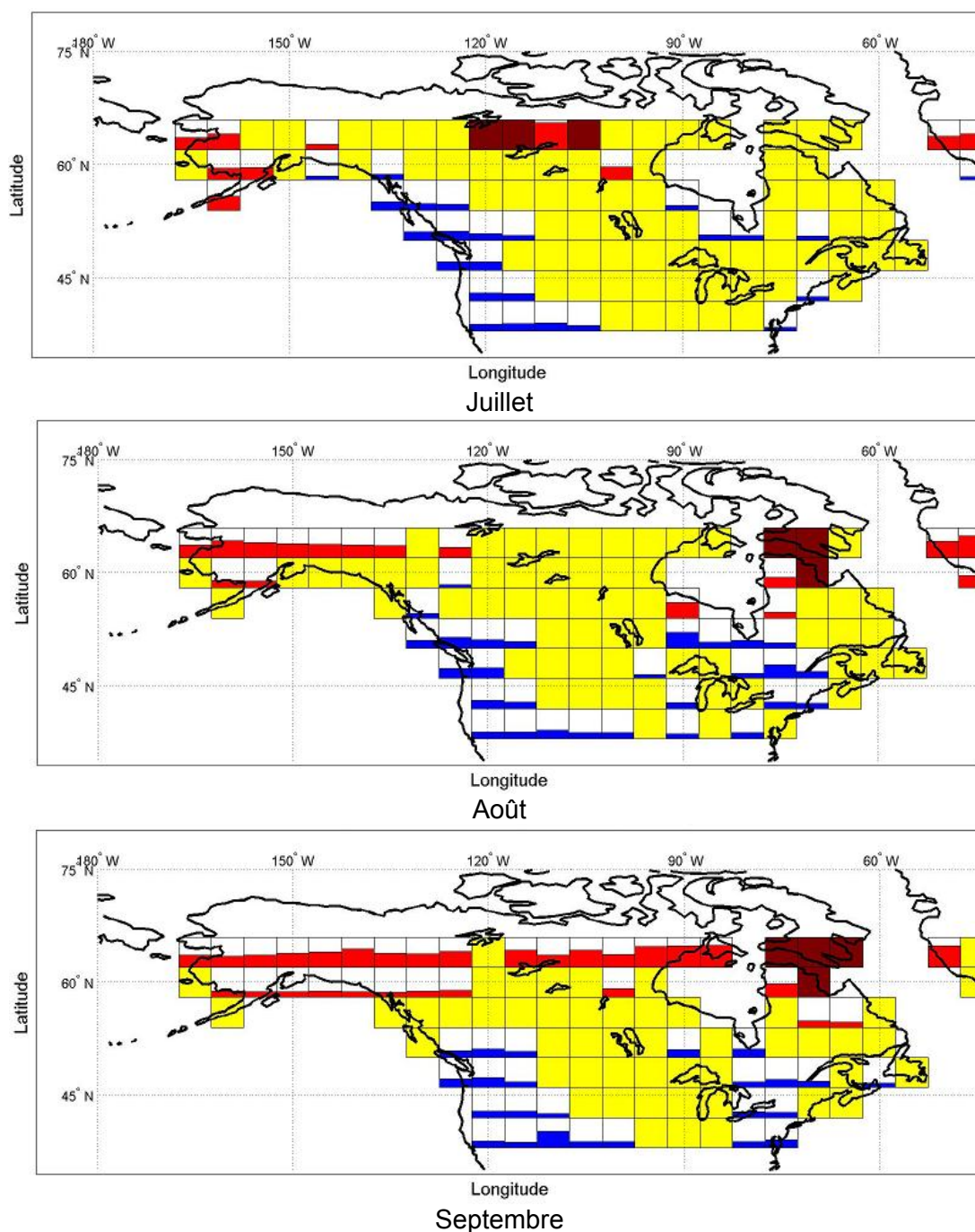


Figure 7.9 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (les tuiles sans tendance significative sont en jaune). La fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la moyenne multimodèle, une couverture totale de la tuile correspondant à une variation de 100 %. Les tuiles marron présentent des accroissements de plus de 100 %

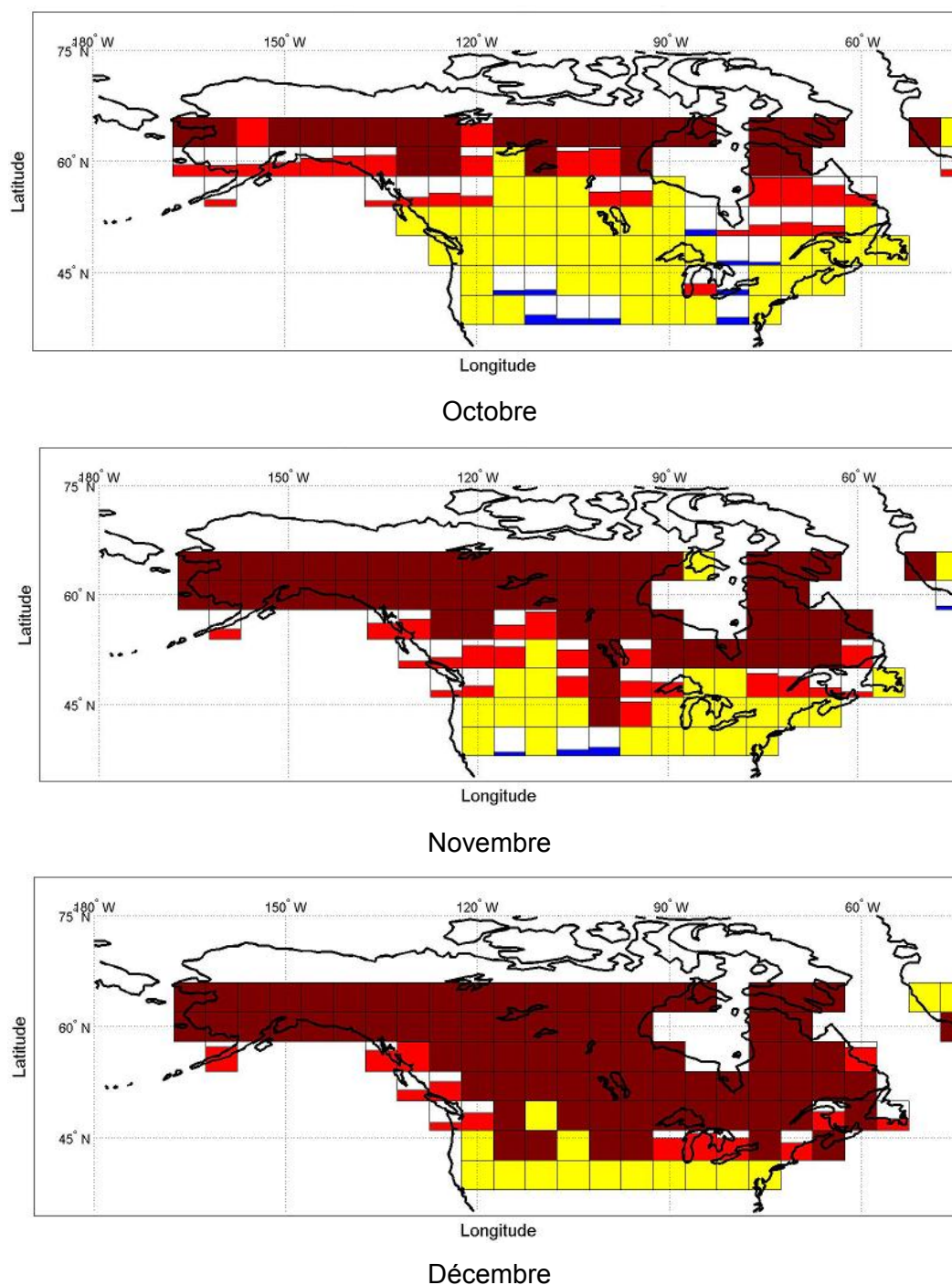


Figure 7.10 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (les tuiles sans tendance significative sont en jaune). La fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la moyenne multimodèle, une couverture totale de la tuile correspondant à une variation de 100 %. Les tuiles marron présentent des accroissements de plus de 100 %.

7.4 Analyse des écoulements pour les tuiles du sud du Québec

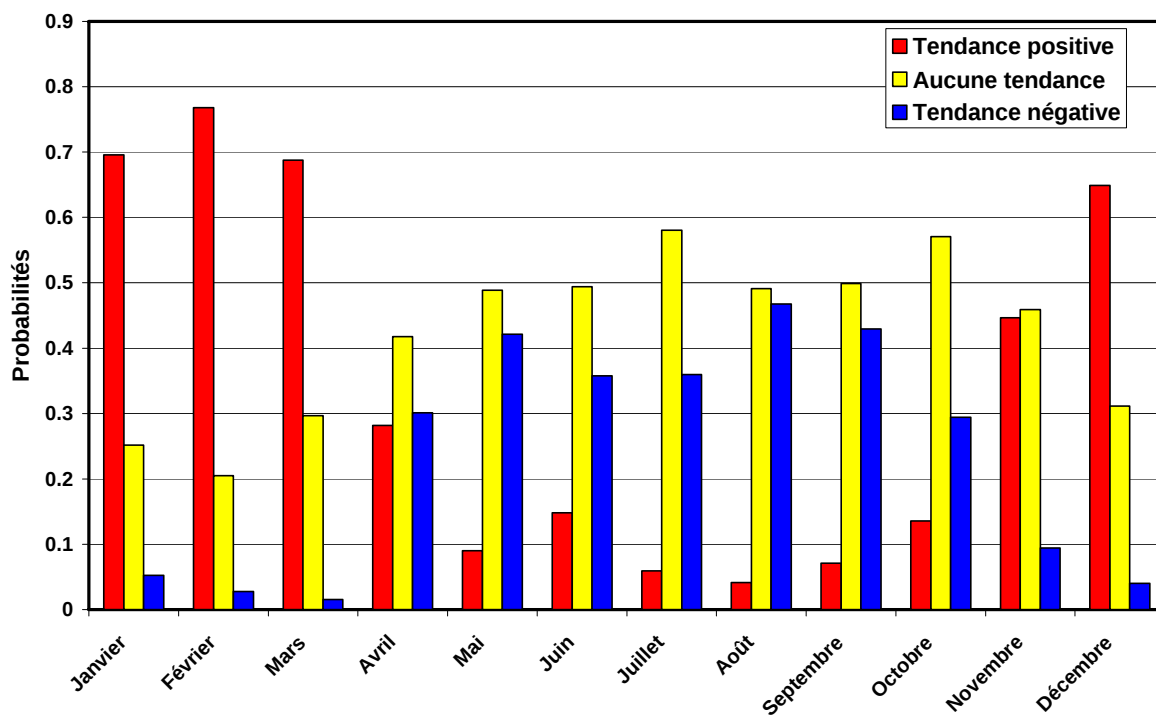
Un examen plus spécifique des écoulements sur les tuiles couvrant la partie sud du Québec a été effectué (voir la Figure 6.12 pour une localisation de ces tuiles). Les résultats pour ces tuiles sont analysés en deux temps, d'abord dans une perspective de variations à l'horizon 2100 (section 7.4.1) et, dans un second temps, en estimant les écarts à l'horizon 2050 (section 7.4.2).

7.4.1 Variations des écoulements à l'horizon 2100

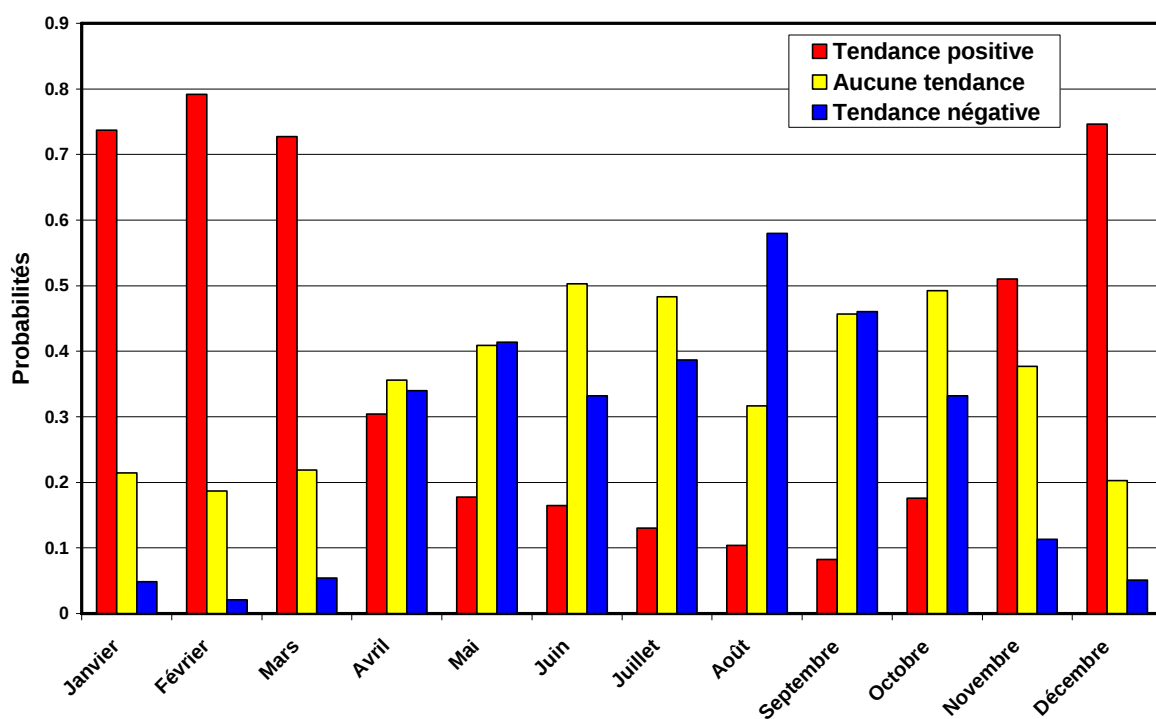
La figure 7.11 présente la moyenne des probabilités d'obtenir une tendance positive, négative ou aucune tendance sur ces tuiles, pour chacun des trois scénarios de GES considérés. Deux constats se dégagent de l'examen de ces graphiques. Le premier est que la projection de tendance à la hausse domine largement pour les mois de décembre, janvier, février et mars, et ce, pour tous les scénarios de GES, alors que pour ces mêmes mois, la projection à la baisse serait très peu probable. Le second constat est que la tendance dominante pour les mois de mars à novembre est beaucoup moins marquée et que les probabilités de tendances à la baisse ou d'absence de tendance sont souvent comparables. Quant à la projection à la hausse pour ces mêmes mois, elle apparaît comme très peu probable.

Tableau 7.2 Variations moyennes relatives en pourcentage des écoulements mensuels pour les tuiles du sud-Québec à l'horizon 2050 et 2100 pour la tendance mensuelle la plus probable (une valeur nulle correspond au cas où le scénario le plus probable n'indique aucune tendance significative)

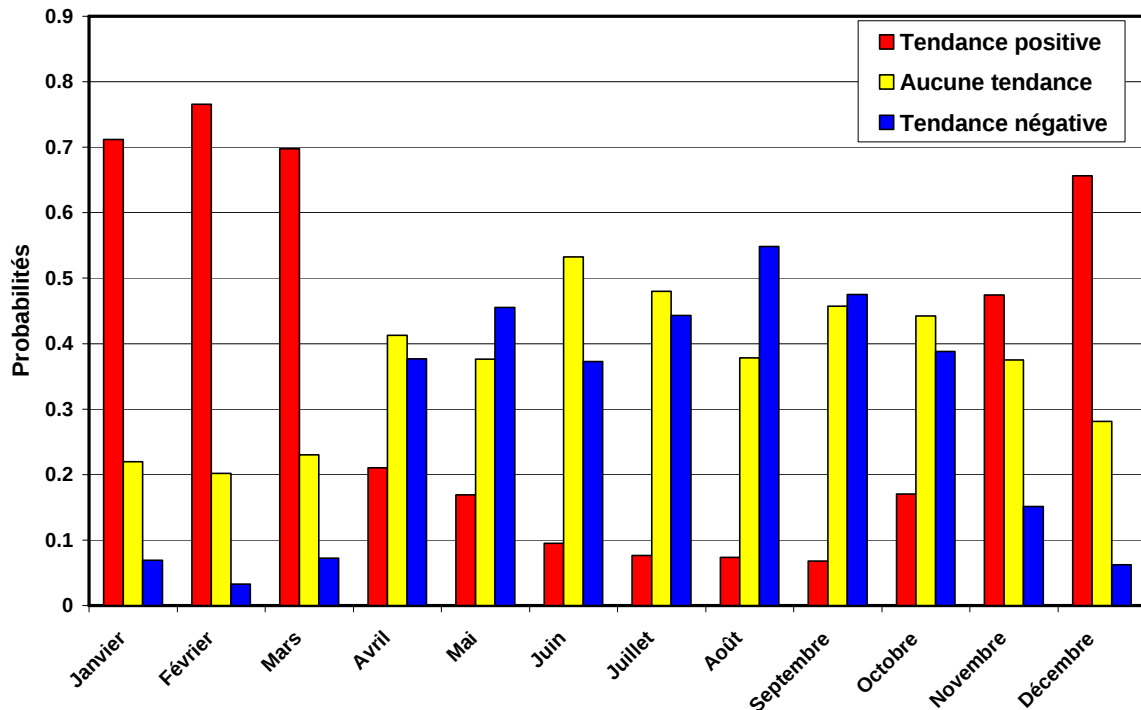
Mois	B1		A1B		A2	
	Horizon 2050	Horizon 2100	Horizon 2050	Horizon 2100	Horizon 2050	Horizon 2100
Janvier	65	91	71	106	745	4195
Février	65	93	145	360	1103	7050
Mars	93	225	158	474	978	6515
Avril	0	0	0	0	0	0
Mai	0	0	-10	-13	-12	-16
Juin	0	0	0	0	0	0
Juillet	0	0	0	0	0	0
Août	0	0	-17	-23	-20	-27
Septembre	0	0	-12	-16	-15	-20
Octobre	0	0	0	0	0	0
Novembre	0	0	25	36	34	48
Décembre	943	7448	61	87	85	126



(a)



(b)



(c)

Figure 7.11 Probabilités de tendances positives, négatives ou d'absence de tendances significatives pour les écoulements sur les tuiles du sud du Québec pour les scénarios (a) B1; (b) A1B; (c) A2

Une comparaison des résultats obtenus pour les différents scénarios de GES montre par ailleurs que la projection d'écoulements stationnaires pendant les mois d'avril à novembre semble plus probable pour le scénario B1 que pour les deux autres scénarios de GES. La figure 7.12 corrobore cette observation. Cette figure montre en effet que les probabilités associées au scénario d'écoulements stationnaires sont plus élevées pour tous les mois (sauf juin) pour le scénario B1 même si, parfois, les différences avec les autres scénarios sont minimales (la figure correspondante dans le cas des précipitations, la figure 6.14, révélait des écarts beaucoup plus importants entre les différents scénarios de GES). Ces résultats suggèrent que les tendances résultant du forçage climatique, même si ces tendances semblent parfois nettes (par exemple pour les mois de décembre, janvier et février), sont moins sensibles au scénario de GES considéré.

Le tableau 7.2 regroupe les valeurs des variations moyennes (%) pour les tuiles du sud du Québec à l'horizon 2050 et 2100 pour les tendances les plus probables. Ce tableau appelle un premier commentaire. Certaines des valeurs qui y sont présentées sont très

élevées. Il faut y voir un artefact attribuable au fait que certaines valeurs d'écoulement en certains mois (particulièrement l'hiver) sont très petites et que, conséquemment, une augmentation même modeste en valeur absolue se traduira par une augmentation relative très importante. Il suffit donc d'une série avec de très faibles valeurs d'écoulement pour que la moyenne calculée soit très élevée. Cette observation doit donc nous inciter à une certaine prudence lors de l'analyse et de l'interprétation de ces chiffres, notamment pour les mois de décembre, janvier, février et mars.

Pour les mois d'avril, juin, juillet et octobre, la projection la plus probable est celle sans tendance; les variations rapportées sont donc nulles, et ce, pour les trois scénarios de GES. Il convient de noter toutefois que la projection avec tendance à la baisse est aussi très probable pour ces mois et est devancée de peu dans plusieurs cas par la projection stationnaire. Pour les mois de mai, août et septembre, des écarts à la baisse de l'ordre de 13 à 27 % sont estimés. Ces écarts augmentent selon que l'on considère les scénarios de GES dans l'ordre B1 → A1B → A2.

7.4.2 Variations des écoulements à l'horizon 2050

Les variations à l'horizon 2050 ont été estimées en utilisant les résultats de tendances obtenues pour la période 1900-2100. Le tableau 7.2 donne un aperçu des estimations obtenues. La mise en garde formulée à la section précédente s'applique aux mois avec tendances à la hausse. Pour les autres mois, les écarts observés sont tous inférieurs aux valeurs à l'horizon 2100 et encore ici, les écarts augmentent selon que l'on examine les résultats selon la séquence B1 → A1B → A2. Les variations à la baisse pour ces mois sont comprises entre 10 et 20 %.

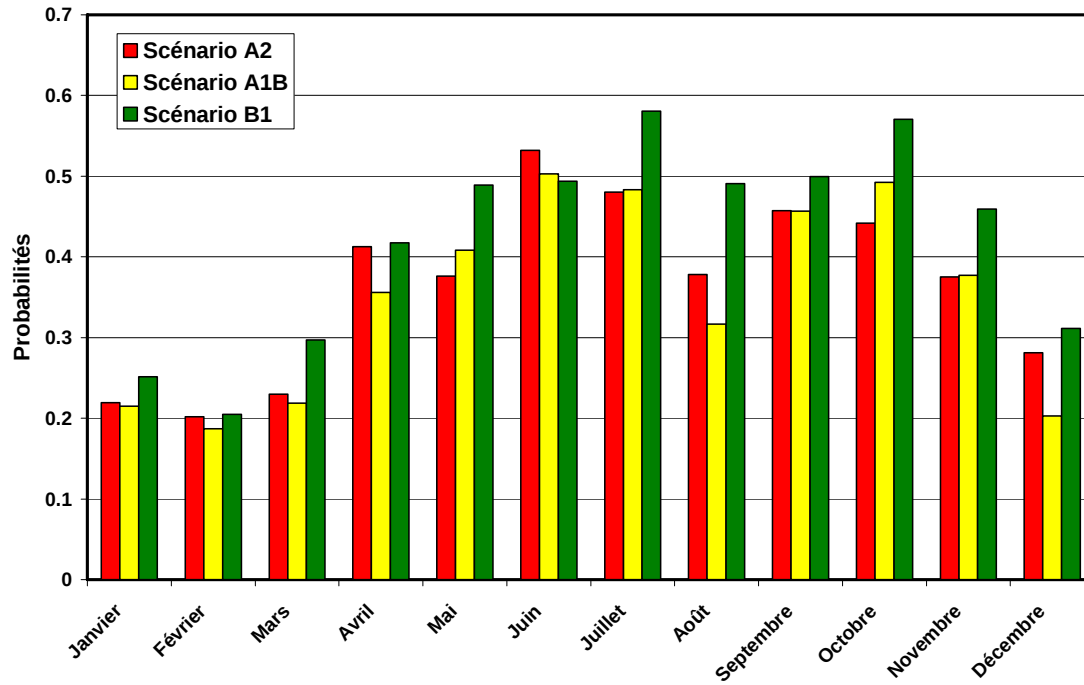


Figure 7.12 Probabilités moyennes pour les tuiles du sud du Québec de ne pas détecter de tendances pour les écoulements sur la période 1900-2100 pour les trois scénarios de GES considérés

8. Discussion et conclusion

La présente étude n'avait évidemment pas comme objectif premier d'estimer l'impact des CC sur la qualité des eaux de ruissellement ou la qualité des eaux de surface. L'objectif de l'étude était davantage orienté en fonction d'une analyse des projections climatiques de certaines variables susceptibles de modifier les volumes et la qualité des eaux de surface disponibles. Deux variables ont ainsi été analysées, à savoir les précipitations et les écoulements mensuels. Ces variables sont deux composantes clés qui détermineront l'évolution future des conditions hydrologiques des eaux de surface. Les résultats issus de simulations de 23 modèles climatiques (modèles de circulation générale) ont été utilisés. Trois scénarios de GES ont été considérés, à savoir les scénarios A2, A1B et B1. L'analyse a porté sur la période 1900-2100.

L'approche privilégiée dans le présent travail a consisté à utiliser le plus grand ensemble de données et d'informations disponibles provenant des modèles de simulations du climat afin de bien baliser les incertitudes affectant les projections climatiques qui en sont tirées. Une telle approche est nécessaire considérant les résultats parfois très différents issus des différents modèles. Ces écarts intermodèles résultent des différences structurales entre ces modèles (représentations différentes des processus, variations dans les schémas de discrétisation spatiale et temporelle, etc.). Considérant qu'il n'est actuellement pas possible de statuer sur la plus grande vraisemblance d'un modèle par rapport à un autre (voir la discussion à ce sujet à la section 4.4), il est donc important de considérer le plus grand ensemble de modèles possibles (et le plus grand ensemble de simulations possibles) afin d'identifier les régions pour lesquelles le signal climatique associé à une variable donnée est cohérent entre ces modèles et d'ainsi mieux estimer les incertitudes sur les projections climatiques. Pour ce faire, une grille de référence a été définie et les grilles des différents modèles ont été projetées sur cette grille. Cette projection a permis la construction des séries aux différentes tuiles associées à chaque simulation disponible.

Une analyse de tendance (Mann-Kendall) a d'abord été réalisée pour chacune des séries disponibles. Chaque série a été classée selon qu'elle présente une tendance significative (positive ou négative) ou aucune tendance significative. Les simulations utilisant des scénarios de GES différents ont été traitées de façon distincte. Il a ainsi été

possible, dans un premier temps, d'établir pour chaque tuile du territoire considéré la probabilité d'observer à l'horizon 2100 une tendance à la hausse, à la baisse ou encore de ne pas observer de tendance pour les précipitations et les écoulements mensuels. Cette façon de faire s'appuie sur l'hypothèse que le résultat le plus important des modèles climatiques est la tendance à laquelle donne lieu le forçage climatique pour les différentes variables considérées.

Sommaire des principaux résultats

L'analyse de tendances pour les précipitations mensuelles révèle que : 1) une vaste majorité du nord du territoire subira très vraisemblablement une augmentation des précipitations mensuelles pendant les mois de janvier à avril et septembre à décembre (cette tendance à la hausse affectera l'ensemble du territoire du Québec); 2) une zone sur la côte ouest du Canada pourrait subir des diminutions des précipitations pour les mois de mai à août; 3) une comparaison des résultats associés aux différents scénarios de GES montre que ces tendances seront plus marquées pour les scénario A2 et A1B que pour le scénario B1. Plus spécifiquement, pour les tuiles du sud du Québec, la tendance la plus probable pour les mois de janvier, février, mars, avril, novembre et décembre est une tendance à la hausse (sauf pour le scénario B1 pour les mois de février et novembre qui ne subiraient, suivant ce scénario, aucune tendance significative). Les autres mois ne verraient, toujours selon la projection la plus probable, aucune modification de leurs précipitations.

Pour les écoulements mensuels, le même type d'analyse montre que : 1) tout comme pour les précipitations, la probabilité dominante est pour une augmentation des écoulements sur une grande partie du territoire, et plus spécifiquement la partie nord, pendant les mois de janvier à mars (et dans une moindre mesure avril) et octobre à décembre; 2) les probabilités de détecter des tendances à la baisse croissent sur la côte ouest et la partie sud du Québec au cours des mois d'avril à juillet et décroissent par la suite au cours des mois d'août à octobre sans toutefois que cette tendance domine de façon marquée la possibilité de ne pas observer de tendance. Pour les tuiles du sud du Québec, la projection la plus probable supporte un scénario d'augmentation des écoulements pendant les mois de janvier, février, mars et décembre pour tous les scénarios de GES, alors que le mois de novembre ne subirait pas de hausse selon le scénario B1 et subirait une tendance à la hausse selon les deux autres scénarios. Pour

les autres mois, les probabilités d'un régime stationnaire et d'une baisse des écoulements sont souvent très rapprochées. Dans l'optique où la projection la plus probable est retenue, les mois d'avril, juin, juillet et octobre ne connaîtraient aucune tendance significative alors que les écoulements mensuels pour les mois de mai, août et septembre diminueraient. Il est très important de mentionner cependant que pour les mois d'avril à octobre, les probabilités de tendance à la baisse et de régime stationnaire sont souvent très semblables (par exemple, pour le mois de mai, dans le cas du scénario A1B, la probabilité de baisse est de 41,5 % alors que la probabilité d'un régime stationnaire est de 41 %!). On peut donc affirmer qu'aucune tendance nette ne domine pendant ces mois et que, considérant les incertitudes sur ces projections, il demeure possible que l'une ou l'autre de ces projections se réalise effectivement. L'amélioration de la qualité des modèles climatiques et de la représentation hydrologique des processus est ici cruciale pour raffiner ces estimations.

Les variations de précipitations et des écoulements mensuels ont ensuite été estimées en combinant les résultats des séries en chaque tuile selon le type de tendance détectée. Cette façon de présenter les résultats s'apparente à une probabilité conditionnelle. Seuls les résultats pour la tendance la plus probable ont toutefois été présentés. Il convient de noter cependant que, pour nombre de tuiles, les probabilités associées aux trois types de tendances possibles étaient similaires et, de ce fait, la possibilité d'une tendance autre que celle retenue est, dans certains cas, à ne pas négliger.

Pour les précipitations, les résultats suggèrent que : 1) une hausse des précipitations pour les parties nord du Canada de l'ordre de 10 à 20 % pourrait survenir pendant les mois de décembre, janvier et février, ces hausses diminuant au fil des mois pour disparaître à toute fin utile au profit d'un profil stationnaire en juillet et août (sauf pour la région nord du Québec et l'Alaska où subsiste la possibilité de légères hausses); 2) une zone de baisse des précipitations de l'ordre de 10 à 20 % serait localisée sur la côte ouest et se développerait au cours des mois de mai à septembre; 3) une grande partie de la partie sud du territoire (excluant la côte ouest) ne verrait pas de tendance significative émerger pendant les mois de mai à septembre.

Pour les tuiles du sud du Québec, les variations moyennes seraient de l'ordre de 10 à 20 % pour les mois de janvier à avril (variables selon les scénarios de GES) et de 10 à 15 % pour les mois de novembre et décembre. Les résultats du scénario B1 suggèrent toutefois que les précipitations des mois de février et novembre seraient stationnaires quoique les probabilités d'un régime stationnaire et d'une tendance à la hausse soient très similaires, notamment pour le mois de février (47 % pour la tendance à la hausse et 53 % pour une absence de tendance).

Pour les écoulements, bien que les variations estimées aient été présentées à la section 7.4, il est clair que ces chiffres doivent être traités avec grande circonspection. Les baisses anticipées pour la variable écoulement pour les mois de mai, août et septembre varient de 13 % à 27 % à l'horizon 2100 (10 % à 20 % à l'horizon 2050) pour les scénarios A1B et A2, le mois appelé à subir les plus fortes baisses étant le mois d'août avec des écarts de 23 % (scénario A1B) à 27 % (scénario A2) à l'horizon 2100 (respectivement 17 % à 20 % à l'horizon 2050). À noter que, encore ici, les probabilités de tendance à la baisse et de régime stationnaire sont très similaires pour le mois d'août sous le scénario B1 (47 % versus 49,5 %) et, de ce fait, la possibilité d'une baisse des écoulements pour ce mois demeure fort vraisemblable. La variation, si la tendance à la baisse devait prévaloir pour ce mois, est estimée à 14 % à l'horizon 2050. Le mois de novembre présente une situation similaire, avec une probabilité de hausse selon le scénario B1 de 44,5 % et une probabilité d'un régime stationnaire de 46 %; la variation estimée dans le cas où une hausse surviendrait est estimée à 18 % à l'horizon 2050.

L'un des résultats intéressants obtenus des analyses réalisées dans le cadre de cette étude concerne l'impact des scénarios de GES sur les probabilités de générer des tendances significatives. Il appert que, pour les précipitations mensuelles, le rôle du forçage climatique est net et, conséquemment, que les tendances sont plus marquées lorsque l'on considère des scénarios d'émission favorisant des concentrations de GES plus élevées. Ce résultat est beaucoup moins probant pour les écoulements qui semblent, à la lumière des modèles examinés, globalement moins sensibles au scénario de GES considéré.

Précipitations et écoulements mensuels : cohérence des conclusions

Une comparaison des résultats obtenus pour les précipitations et les écoulements mensuels montre, globalement, que ces deux ensembles de résultats sont cohérents. Aux mois d'hiver, où les tendances à la hausse des précipitations sont très nettes et importantes, correspond généralement une situation, elle aussi cohérente entre les modèles, d'augmentation des écoulements. Les effets combinés des précipitations et de l'évaporation dans ce cas sont nettement en faveur d'un bilan net positif favorisant des écoulements plus importants. En revanche, en saison estivale, les modèles tendent à suggérer un régime stationnaire de précipitations (voir figure 6.13). Considérant les augmentations de températures appréhendées et leur effet à la hausse sur les taux d'évaporation, ce régime stationnaire pourra se traduire par un bilan hydrique négatif pour ces mois, d'où une propension à la baisse des écoulements (voir Huntingdon, 2004; Arnell, 2003b et Gagnon et Gough, 2005). Toutefois, comme nous l'avons souligné précédemment, l'effet net est ici moins marqué puisque la probabilité de maintien d'un régime stationnaire des écoulements demeure probable (voir figure 7.11). Cet « équilibre des forces » confirme l'importance d'utiliser des modèles régionaux du climat couplés à des modèles hydrologiques afin d'obtenir une représentation plus fine et plus complète des processus en jeu. Il importe, toutefois, au regard des diminutions possibles advenant que la projection à la baisse se confirme (pouvant aller jusqu'à 27 % selon les estimations de la présente étude), d'examiner plus attentivement ce scénario et d'estimer les impacts que ces diminutions pourraient avoir sur les systèmes d'approvisionnement en eau.

Cette cohérence des résultats entre précipitations et écoulements est importante, compte tenu du caractère rudimentaire de la représentation du cycle hydrologique au sein des modèles globaux du climat. À ce propos, Graham *et al.* (2007b) indiquent que : « Although climate models include full representation of the hydrological cycle and usually resolve the overall water balance, they typically do not provide sufficient detail to satisfactorily address impacts on hydrology and water resources ». De fait, les résultats obtenus pour les écoulements doivent être interprétés à la lumière de cette mise en garde.

Comparaison avec les études antérieures

Bourque et Simonet (2008), dans un rapport récemment publié par le Gouvernement canadien, rapportaient des variations appréhendées des précipitations à l'horizon 2080 de l'ordre de 1 à 43 % pour l'hiver, de 4 à 39 % pour le printemps, de -11 à 15 % pour l'été et enfin de -7 à 18 % l'automne pour la sous-région sud du Québec (correspondant *grosso modo* à la région identifiée comme la région sud du Québec dans le présent rapport; voir figure 7 et tableaux 1 à 4 de Bourque et Simonet, 2008). Ces résultats ont été obtenus en combinant les simulations de plusieurs modèles globaux et les fourchettes proposées englobent l'ensemble des résultats obtenus des différents modèles (sans égard aux scénarios de GES considérés ni à la tendance). Les profils hivernal et printanier des tendances sont similaires à ceux décrits dans le présent rapport, à savoir une tendance à la hausse dans les deux cas, alors que l'automne représente en quelque sorte une saison de transition avec une probabilité croissante de tendance à la hausse depuis septembre jusqu'à décembre. Pour la saison estivale, la fourchette proposée par Bourque et Simonet (2008) ne laisse pas entrevoir de tendance nette. Cependant, exprimée en matière de probabilités de tendances, il semble que la projection stationnaire l'emporte pour les précipitations estivales.

Scénarios d'évolution des distributions des précipitations et des écoulements dans un contexte non stationnaire

Les évaluations proposées dans le présent rapport concernent plus spécifiquement l'évolution de la moyenne de la distribution des pluies et des écoulements mensuels. Si le scénario le plus simple que l'on puisse imaginer demeure la simple translation des distributions, d'autres scénarios sont aussi possibles pour lesquels la variabilité du signal change aussi (voir figure 8.1). Toutefois, il faut bien voir que lorsque la distribution se décale au fil du temps, les probabilités d'occurrence des extrêmes sont elles aussi affectées. La figure 5.2 montre un exemple où une tendance à la baisse de la moyenne se traduit par une plus grande probabilité de mois plus secs. Ainsi, dans le cas d'une baisse des précipitations moyennes, la probabilité d'occurrence de mois de faible pluviométrie augmente et, conséquemment, la possibilité de faire face à des situations critiques en matière d'approvisionnement en eau potable augmente aussi. Une analyse plus élaborée serait toutefois nécessaire afin de voir, par exemple, si la variance des distributions est non stationnaire et donc pour vérifier lequel des scénarios présentés à

la figure 8.1 représente le mieux la situation en matière de précipitations et d'écoulement mensuels.

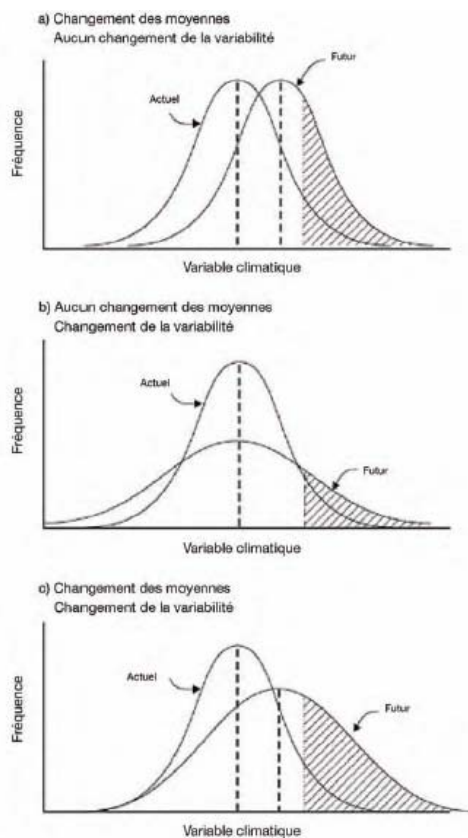


Figure 8.1 Évolution possible des distributions dans un contexte non stationnaire : a) translation de la distribution (tous les moments de la distribution restent inchangés); b) moyenne inchangée mais augmentation de la variabilité; c) changement de la moyenne et de la variabilité (tiré de Lemmen *et al.*, 2008)

Précipitations mensuelles et périodes sèches

Les précipitations mensuelles, quoiqu'elles conditionnent fortement les régimes d'écoulement, ne sont toutefois pas un indicateur parfait pour décrire la sévérité des étiages et des périodes de sécheresse à venir. En effet, si le total mensuel de pluie reste relativement similaire, il n'est pas dit que la distribution intra-mensuelle des événements de pluie ne subira pas, pour sa part, de modifications importantes. Ainsi, il est possible que les intensités de chaque événement pluvieux augmentent mais que, parallèlement, les durées des périodes sans pluie augmentent aussi (distribution intra-mensuelle des précipitations modifiée) pour un total mensuel presque inchangé. Une succession de

pluies plus courtes et plus intenses serait ainsi entrecoupée de périodes plus sèches de plus longue durée. Cette possible redistribution intra-mensuelle des précipitations demeure cependant de « court terme » limité à l'occurrence de périodes plus sèches à l'intérieur d'un même mois et ne devrait pas poser un stress hydrique énorme en matière de volume disponible, considérant les réserves généralement disponibles. Une telle situation pourra toutefois entraîner une détérioration de la qualité des milieux récepteurs.

Un autre cas possible, où une modification des profils de précipitations aura une incidence sur l'occurrence de périodes plus sèches, est celui d'une plus grande probabilité d'occurrence de mois de faible pluviométrie. La présente étude ne supporte par pareille conclusion pour la région du sud du Québec puisque les profils de précipitations augmenteront ou resteront stationnaires. Toutefois, il n'est pas exclu que la variabilité du signal climatique change (cas b de la figure 8.1), auquel cas la probabilité d'occurrence de mois plus secs, voire très secs, en été particulièrement, demeure possible. Enfin, une modification de la probabilité d'occurrence de mois successifs de faible pluviométrie pourra aussi engendrer une situation de déficit hydrique, ce qui n'a pas été considéré dans la présente analyse. L'utilisation d'indicateurs similaires à ceux de Blenkisop et Fowler (2007), comme le cumul des anomalies de précipitations sur trois mois consécutifs, permettrait de déceler d'éventuelles tendances significatives en ce sens.

Approvisionnement en eau de surface et CC : perspectives

Les résultats de la présente étude suggèrent deux choses au regard de la disponibilité et de la qualité des eaux de surface en ce qui a trait aux CC. Premièrement, il est très probable que la disponibilité de la ressource en eau de surface soit affectée pendant les mois d'hiver, de printemps et d'automne considérant les hausses de précipitations appréhendées. Dans ce cas, même si l'on n'a pas à craindre pour les volumes disponibles, il est possible que la qualité des eaux soit modifiée. Il est toutefois difficile de préciser l'ampleur de ces modifications au-delà des constats généraux généralement mentionnés dans la littérature (hausse des températures des eaux, augmentation possible de la fréquence de débordements des réseaux unitaires, apports plus importants en matière de volume de ruissellement et de charges polluantes, augmentation possible des impacts négatifs sur les milieux récepteurs des eaux pluviales; voir chapitre 2). L'impact pourrait être important dans les cours d'eau urbains

où se déversent les eaux des réseaux unitaires et les eaux pluviales, exacerbant le phénomène de « syndrome du cours d'eau urbain » (Walsh *et al.*, 2005). Les cours d'eau en milieu rural ne seront pas en reste puisqu'une augmentation des précipitations modifiera très certainement la géomorphologie de ces cours d'eau et accroîtra les apports diffus dans les secteurs agricoles. Par ailleurs, en saison estivale, une diminution des écoulements est probable avec pour conséquence une exposition des systèmes d'approvisionnement à des conditions d'étiages inégalées et à une détérioration vraisemblable de la qualité des eaux brutes.

Eau, santé publique et CC

L'examen des enjeux en matière de santé publique au regard des changements climatiques appréhendés fait l'objet d'une littérature sans cesse croissante (Ebi *et al.*, 2004). Les principaux impacts généralement mentionnés dans la littérature en relation avec l'eau et la santé publique concernent plus spécifiquement une possible croissance des risques de maladies hydriques dans un contexte futur où les précipitations seront plus abondantes, les inondations plus fréquentes, les sécheresses plus sévères et les températures plus élevées (Charron *et al.*, 2004; Watson *et al.*, 2005). Patz *et al.* (2000), dans un article rendant compte des travaux d'un comité américain dont l'objectif était d'analyser les possibles impacts des CC en matière de santé publique, identifient cinq secteurs susceptibles d'être affectés, dont l'un concerne spécifiquement les maladies hydriques. Ces auteurs précisent qu'une détérioration de la qualité des eaux est susceptible de survenir suite à une modification, notamment des régimes pluviométriques et des températures, favorisant, du coup, une recrudescence des maladies d'origine hydrique.

Plusieurs études suggèrent une relation entre l'émergence d'épisodes de maladies hydriques et des événements météorologiques extrêmes (voir par exemple MacKenzie *et al.*, 1994; Rose *et al.*, 2000; Curriero *et al.*, 2001). Curreiro *et al.* (2001) ont ainsi montré, à partir de données observées aux États-Unis pendant la période 1984-1994, que l'éclosion d'épisodes d'infection hydrique était précédée, dans 68 % des cas, d'événements de pluies intenses (percentile 80 % et plus). Ce travail, ainsi que d'autres, suggère que les événements pluvieux, sans être l'unique facteur en cause, jouent tout de même un rôle prépondérant dans la chaîne d'événements pouvant conduire à une éclosion de maladies hydriques (Watson *et al.*, 2005). Il est important de noter toutefois

que plusieurs des auteurs dont les articles ont été consultés, soulignent qu'il demeure à l'heure actuelle très difficile de déterminer, de façon précise, l'incidence qu'une modification, par exemple de l'occurrence des pluies extrêmes, pourra avoir sur la fréquence et l'ampleur des éclosions de maladies hydriques (Patz *et al.*, 2000; Benson *et al.*, 2000; Huntingford *et al.*, 2007). Par ailleurs, la combinaison de facteurs, météorologiques ou autres, très locaux et s'enchaînant selon une séquence parfois complexe, rend l'analyse des conditions propices à l'éclosion de maladies hydriques très difficile et complique singulièrement l'évaluation des impacts des CC sur l'occurrence de tels épisodes (Benson *et al.*, 2000).

Les considérations précédentes mettent en évidence la difficulté de préciser la nature et l'ampleur précise des impacts en matière d'éclosion de maladies hydriques des scénarios de projections climatiques élaborés dans le cadre de la présente étude. Il est permis de penser toutefois qu'un accroissement des précipitations moyennes, et vraisemblablement des extrêmes de précipitations, favorisera, toutes choses étant égales par ailleurs, une émergence plus fréquente des maladies hydriques. L'amplitude de cette augmentation est impossible à établir mais l'effet pourrait être tout de même mitigé puisque les mois pour lesquels les précipitations sont appelées à croître ne sont pas les mois les plus chauds de l'année. Il a par ailleurs été montré que les événements de pluies extrêmes seront plus susceptibles de survenir dans un climat futur au Québec, et ce, même pour les mois d'été (voir Mailhot *et al.*, 2007a). Ce constat, là encore, supporte l'hypothèse que des conditions météorologiques propices à l'éclosion de maladies hydriques seront plus fréquentes en climat futur qu'elles ne l'ont été par le passé. Il faut se souvenir toutefois que les conditions climatiques ne sont que l'un des facteurs en jeu dans la séquence de facteurs pouvant conduire à l'éclosion des maladies hydriques.

Adaptation et projections climatiques

Plusieurs auteurs s'interrogent sur l'utilisation des projections climatiques dans une perspective d'adaptation dans un contexte où : 1) les incertitudes sur ces projections climatiques associées aux variables pertinentes à bien des secteurs (par exemple les extrêmes climatiques pour le drainage urbain, les tempêtes de toutes sortes pour la sécurité publique) sont très importantes; 2) les échelles spatiales et temporelles de simulation des modèles climatiques sont mal adaptées à l'examen de plusieurs enjeux

(par exemple hydrologie de surface); 3) plusieurs facteurs, autres que les projections climatiques, susceptibles de changement rapide et important pendant la période généralement considérée pour les projections climatiques (entre 50 et 100 ans), auront une incidence, parfois déterminante, sur l'évolution future de la réponse de plusieurs systèmes (par exemple, l'occupation du territoire pour l'hydrologie et le pourcentage de surface imperméable pour l'hydrologie urbaine). Considérant l'ensemble de ces facteurs et la complexité des systèmes, le caractère dynamique de ces derniers, déterminé en partie par les CC, il paraît dès lors difficile d'identifier et de définir une réponse adaptative « optimale » ou, à tout le moins, appropriée. Tous les auteurs s'entendent toutefois sur l'importance d'examiner ces solutions, et ce, malgré les incertitudes dont sont affectées les projections climatiques.

Allen et Frame (2007) soulignent à cet effet l'importance de voir que les projections climatiques elles-mêmes sont appelées à évoluer et, considérant le lien entre CC et émissions de GES, il est vraisemblable que notre appréciation future des impacts des CC (par exemple à travers l'évolution future des températures globales) ait une influence déterminante sur les émissions de GES et, par ricochet, sur l'évaluation des incertitudes ultérieures. Ce type de considération met en évidence l'importance de considérer des mesures d'adaptation souples, « adaptables » à un contexte de projection climatique évolutif et où les incertitudes sur les projections climatiques elles-mêmes évolueront au fil du temps.

Travaux futurs

Comme la brève discussion d'une des sections précédentes le montre, plusieurs avenues de recherche restent à explorer quant à l'impact des projections climatiques en matière de santé publique, et plus spécifiquement sur l'occurrence de maladies d'origine hydrique (voir Huntingford *et al.*, 2007 pour une discussion générale des axes de recherche à investiguer en matière de santé publique et de CC). Les axes de recherche dont il sera question dans ce qui suit traitent plus spécifiquement des travaux à réaliser afin de développer des projections climatiques mieux adaptées à l'évaluation des impacts des CC sur la disponibilité des ressources en eau et la qualité de ces eaux.

Les analyses de tendance réalisées dans le cadre des présents travaux ont porté plus spécifiquement sur les précipitations (et écoulements) mensuelles moyennes. Les

impacts, notamment en matière d'extrêmes (par exemple mois de faibles pluviométries ou faibles écoulements), restent à explorer. Il s'agira dans ce cas d'abord de voir si la variabilité des indices climatiques considérés est significativement affectée par les CC ou si seulement la moyenne est modifiée (voir figure 8.1). Une fois établi le scénario le plus vraisemblable, les impacts en matière d'extrêmes mensuels pourront être davantage investigués.

La définition et l'examen d'indices liés à l'occurrence de plusieurs mois secs successifs sont aussi à considérer. Les indices utilisés par Fowler et Kilsby (2007) sont en ce sens très intéressants puisqu'ils explorent les possibles impacts sur l'occurrence de mois successifs de faibles précipitations, et donc de périodes sèches s'étalant sur plusieurs mois.

Les résolutions spatiale et temporelle des GCM sont par ailleurs mal adaptées à une description des processus hydrologiques à l'échelle des bassins versants (Bronstert *et al.*, 2007). Afin de pallier cette déficience, le recours à des modèles hydrologiques alimentés par les résultats de modèles globaux ou de modèles régionaux est souvent considéré. Cette approche ajoute en complexité à l'approche globale et rend, à tout le moins dans l'état actuel des choses, difficile une appréciation des incertitudes sur les projections qui en résultent, rendant du coup difficile l'utilisation effective des projections qui en résultent dans un contexte d'adaptation (voir Mareuil *et al.*, 2007 pour un exemple et Stainforth *et al.*, 2007a et b pour une discussion de ces questions). Aux erreurs structurales des modèles climatiques s'ajoutent de possibles erreurs structurales des modèles hydrologiques (voir Jiang *et al.*, 2007 qui explorent la variabilité des projections lorsque plusieurs modèles hydrologiques sont comparés) et les incertitudes associées à l'utilisation de modèles régionaux ou de techniques de « downscaling statistique » pour transposer les résultats des modèles globaux pour fin d'utilisation à des échelles plus fines. Nonobstant ces limitations, l'utilisation de modèles hydrologiques devra éventuellement être envisagée bien que, dans un premier temps, nous pensons que les analyses plus globales sont plus indiquées quitte à utiliser par la suite une modélisation plus fine pour une sous-région si des tendances significatives semblent vouloir s'y développer.

Parallèlement à l'utilisation d'approche de résolutions spatiales plus fines, l'utilisation de résultats à un pas de temps journalier s'impose. Outre le fait que cette échelle temporelle soit mieux adaptée, elle permet par ailleurs l'examen d'autres indices décrivant la variabilité des précipitations journalières et la probabilité d'occurrence de périodes sèches (par exemple nombre de jours consécutifs sans pluie ou autres indices de sécheresse).

9. Référence bibliographiques

- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2005). *Leçons tirées des années de sécheresse 2001 et 2002 au Canada : Rapport de synthèse*. Par E. Wheaton, V. Wittrock, S. Kulshreshtha, G. Koshida, C. Grant, A. Chipanshi, B. Bonsal, P. Adkins, G. Bell, G. Brown, A. Howard et R. MacGregor. Publication SRC n° 11602-46E03. Ottawa, ON, Canada, 40 p.
- Allen, M.R. et Frame, D.J. (2007). Call off the quest. *Science*, 318, 582-583.
- Arnell, N.W. (2003a). Relative effects of multi-decadal climatic variability and changes in the mean and variability of climate due to global warming: future streamflows in Britain. *J. Hydrol.*, 270, 195-213.
- Arnell, N.W. (2003b). Effects of IPCC SRES* emission scenarios on river runoff: a global perspective. *J. Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 7(5), 619-641.
- Arnell, N.W. (1999). Climate change and global water resources. *Global Environ. Change*, 9, S31-S49.
- Benson, K., Kocagil, P., et Shortle, J. (2000). Climate change and health in the Mid-Atlantic Region, *Clim. Res.*, 14, 245-253.
- Bergström S., Carlsson B., Gardelin, M., Lindström, G., Pettersson, A., et Rummukainen, M. (2001). Climate change impacts on runoff in Sweden – assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling, *Clim. Res.*, 16, 101-112.
- Bérubé, J. (2007). Évaluation d'un indice de pression sur les approvisionnements municipaux en eau potable au Québec à l'aide d'une méthode de régionalisation des débits d'étiage. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec, QC, Canada, 100 p.
- Blenkinsop, S., et Fowler, H.J. (2007). Change in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. *J. Hydrol.*, 342, 50-71, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.05.003.
- Bonsal, B., Koshida, G., O'Brien, E.G., et Wheaton, E. (2004). Sécheresses. Dans : *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada*. Rapport N° 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, Institut national de recherche sur les eaux, Burlington, ON, Canada, p. 23-30.
- Bourque, A. (2000). Les changements climatiques et leurs impacts, *Vertigo* 1(2), (www.vertigo.uqam.ca).
- Bourque, A. et Simonet, G. (2008). « Québec », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 171-226.
- Bouwer, L.M., Crompton, R.P., Faust, E., Höppe, P., et Pielke Jr., R.A. (2007). Confronting disaster losses. *Science*, 318, 753.
- Brière, F. (1998). *Distribution et collectes des eaux*. Presses Internationales Polytechnique, Montréal, Canada, 400 p.

- Bronstert, A., Kolokotronis, V., Schwandt, D., et Straub, H. (2007). Comparison and evaluation of regional climate scenarios for hydrological impact analysis: General scheme and application example. *Int. J. Clim.*, 27, 1579-1594, DOI: 10.1002/joc.1621.
- Bruce, J., Burton, I., Martin, H., Mills, B., et Mortsch, L. (2000). *Le secteur de l'eau : vulnérabilité et adaptation aux changements climatiques*. Document de travail pour les ateliers régionaux préparé avec l'appui du Fonds d'action pour le changement climatique. Ressources naturelles Canada, Ottawa, ON, Canada.
- Burke, D., Leigh, L., et Sexton, V. (2001). *Tarification municipale de l'eau 1991-1999*. Environnement Canada, Direction de l'économie environnementale, Ottawa, ON, Canada, 56 p.
- Burns, D.A., Klaus, J., et McHale, M.K. (2007). Recent climate trends and implications for water resources in the Catskill Mountain region, New-York, États-Unis, *J. Hydrol.*, 336, 155- 170, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.12.019.
- Caballero, Y., Voirin-Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., LeMoigne, P., Lehenaff, A., et Boone, B. (2007). Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change, *Water Resour. Res.*, 43, W07448, doi:10.1029/2005WR004192.
- Cantelaube, P., et Terres, J.-M. (2005). Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. *Tellus A* 57, 476–487. (doi:10.1111/j.1600-0870.2005.00125.x)
- Carrière, A., Barbeau, B., et Cantin, J.-F. (2007). Vulnerability of drinking water treatment plans to low water in the St. Lawrence River. *J. Water Resour. Plan. Manage.* ASCE, 133(1), 33-38.
- Champagne, S. (2005). Les Lavallois doivent fermer le robinet. *La Presse*, Actualités, 10 août 2005, p. A17.
- Chaplot, V. (2007). Water and soil water resources response to rising levels of atmospheric CO₂ concentration and to changes in precipitation and air temperature. *J. Hydrol.*, 337, 159-171, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.026.
- Charron, D.F., Kathleen, T.M., Waltner-Toews, D., Aramini, J.J., Edge, T., Kent, R. A., Maarouf, A. R., et Wilson, J. (2004) Vulnerability of waterborne diseases to climate change in Canada: A review, *J. Toxicol. Environ. Health, Part A*, 67:20, 1667 -1677, DOI: 10.1080/15287390490492313.
- Cubasch, U., et coauteurs (2001) Projections of future climate change. Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J. T. Houghton et al., Eds., Cambridge University Press, 525–582.
- Cunderlink, J.M., et Simonovic, S.P. (2005). Hydrological extremes in a southwestern Ontario river basin under future climate conditions. *Hydrol. Sci. J.*, 50(4), 631-654.
- Curriero, F.C., Patz, J.A., Rose, J.B., et Lele, S. (2001). The association between extreme precipitation and waterborne disease outbreaks in the United States, 1948–1994. *Am. J. Pub. Health*, August 2001, 91(8), 1194-1199.

- de Elía, R., Caya, D., Côté, H., Frigon, A., Biner, S., Giguère, M., Paquin, D., Harvey, R., et Plummer, D. (2008). Evaluation of uncertainties in the CRCM-simulated North American climate. *Clim. Dyn.* 30, 113-132, doi:10.1007/s00382-007-0288-z.
- de Loë, R., Kreutzweiser, R., et Moraru, L. (2001). Adaptation options for the near term: climate change and the Canadian water sector. *Global Environ. Change*, 11, 231-245.
- Dibike, Y.B., et Coulibaly, P. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models, *J. Hydrol.*, 307, 145-163, doi:10.1016/j.jhydrol.2004.10.012.
- DuMouchel, W. H., et O'Brien, F.L. (1989). Integrating a robust option into a multiple regression computing environment, Computer Science and Statistics: Proceedings of the 21st Symposium on the Interface, Alexandria, VA, American Statistical Association, 1989.
- Duquette, P. (2005). L'eau se fait plus rare à Gatineau. *Le Droit*, Manchette, 7 juin 2005, p. 4.
- Ebi, K.L., Mills, D.M., Smith, J.B., et Grambsch, A. (2004). Climate change and human health impacts in the United States: An update on the results of the U.S. National Assessment Environmental Health Perspectives, 114 (9), September 2006, 1318-1324.
- Ekström M., Jones, P.D., Fowler H.J., Lenderink, G., Buishand, T.A., et Conway, D. (2007a). Regional climate model data used within the SWURVE project 1: projected changes in seasonal patterns and estimation of PET. *Hydrol. Earth Sys. Sci.* 11(3), 1069-1083.
- Ekström M., Hingray, B., Mezghani, A., et Jones, P.D. (2007b). Regional climate model data used within the SWURVE project 2: addressing uncertainty in regional climate model data for five European case study areas. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 11(1), 1085-1096.
- Ekström, M., H.J. Fowler, C.G. Kilsby, et P.D. Jones (2005). New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integrations. 2. Future estimates and use in impact studies. *J. Hydrol.*, 300, 234-251.
- Elgaali, E., et Garcia, L.A. (2007). Using neural networks to model the impacts of climate change on water supplies. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, ASCE, 133(3), 230-243.
- Emori, S., et Brown, S.J. (2005). Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophys. Rev. Lett.*, 32, L17706, doi :10.11029/2005GL023272.
- Environnement Canada (2005). *Rapport de 2004 sur l'utilisation municipale de l'eau. Utilisation de l'eau par les municipalités: statistiques de 2001*. Ottawa, Canada, 8 p. Disponible sur http://www.ec.gc.ca/WATER/fr/info/pubs/sss/f_mun2001.pdf (consultation le 25 février 2008).
- Environnement Canada (2004a). *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Institut national de recherche scientifique. Rapport N° 3, Série de rapports*

d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, Institut national de recherche sur les eaux Burlington, ON, Canada, 148 p. Disponible sur <http://www.nwri.ca/threats/threats-fprint.pdf> (consultation le 25 février 2008).

Environnement Canada (2004b). *La gestion de l'eau - Utilisation de l'eau au Canada en 1996*. http://www.ec.gc.ca/water/fr/manage/use/f_wuse.htm (consultation le 4 mars 2008).

Environnement Canada (1998). *Étude pancanadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique au Québec : Volume VII, Questions sectorielles. Chapitre 1 : Changement et variabilité climatiques : Impacts sur l'eau du Canada*. Ottawa, ON, Canada, 674 p. Disponible sur <http://dsp-psd.pwgsc.gc.ca/Collection/En56-119-6-1998F.pdf> (consultation le 25 février 2008).

Environnement Canada (1997). *Impact et adaptation à la variabilité et au changement du climat au Québec : Tome V de l'étude pan-canadienne : Impacts et adaptation au climat* par L. Bergeron, G. Vigeant et J. Lacroix. Ottawa, Canada, 269 p. Disponible sur <http://dsp-psd.communication.gc.ca/Collection/En56-119-3-1997F.pdf> (consultation le 25 février 2008).

Fowler H.J., Blenkinsop, S., et Tebaldi, C. (2007a). Linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *Int. J. Climatol.*, 27, 1547-1578.

Fowler H.J., Ekström M., Blenkinsop, S., et Smith, A.P. (2007b). Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *J. Geophys. Res.*, 112, D18104, doi:10.1029/2007JD008619.

Fowler H.J., Kilsby, C.G., et Stunell, J. (2007c). Modelling the impacts of projected future climate change on water resources in north-west England. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 11(3), 1115-1126.

Fowler H.J., et Kilsby, C.G. (2007). Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Clim. Change*, 80:337-367, DOI 10.1007/s10584-006-9117-3.

Francis, D., et Hengeveld, H. (1998). *Extreme weather and climate change*. Environnement Canada, 31 p.

Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schidli, J., et Vidale, P.L. (2006). Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.

Frigon, A., Slivitzky, M., Caya, D., et Roy, R. (2007). Construction de projections hydro-climatiques et leurs incertitudes associées à partir de simulations issues de modèles régionaux de climat : application à la gestion des eaux des réservoirs hydroélectriques du Québec. *Houille Blanche*, 6(Décembre 2007): 97-103, doi: 10.1051/lhb:2007089.

Gagnon, A.S., et Gough, W.A. (2005). Climate change scenarios for the Hudson Bay Region: an intermodel comparison. *Clim. Change*, 69, 269-297.

- Gedney, N., Cox, P.M., Betts, R.A., Boucher, O., Huntingford, C., et Stott, P.A. (2006). Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, 439(7078): 835–838.
- George, S. St. (2007). Streamflow in the Winnipeg River basin, Canada: Trends, extremes and climate linkages. *J. Hydrol.*, 332, 396–411, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.07.014
- Ghosh, S., et P. P. Mujumdar (2007). Nonparametric methods for modeling GCM and scenario uncertainty in drought assessment. *Water Resour. Res.*, 43, W07405, doi:10.1029/2006WR005351.
- Giorgi, F., Hewitson, B., Christensen, J., Fu, C., Jones, R., Hulme, M., Mearns, L., Von Storch, H., et Whetton, P. (2001a). Regional climate information – evaluation and projections. Dans: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P., Dai, X., Maskell, K., et Johnson, C.I. (éds), *Climate change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, p. 583–638.
- Giorgi, F., Whetton, P., Jones, R., Christensen, J., Mearns, L., Hewitson, L., Von Storch, H., Francisco, R., et Jack, C. (2001b). Emerging patterns of simulated regional climatic changes for the 21st century due to anthropogenic forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 3317–3320.
- Gouvernement du Québec (1997). *Symposium sur la gestion de l'eau au Québec. Document de référence*. Ministère du Conseil exécutif, Québec, QC, Canada, 59 p.
- Graham, L.P., Andréasson, J., et Carlsson, B. (2007a). Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods – a case study on the Lule River basin. *Clim. Change*, 81:293–307, DOI 10.1007/s10584-006-9215-2.
- Graham, L.P., Hagemann, S., Jaun, S., et Bniston, M. (2007b). On interpreting hydrological change from regional climate models. *Clim. Change*, 81:97–122, DOI 10.1007/s10584-006-9217-0.
- Grinevald J. (1992). De Carnot à Gaya, l'histoire de l'effet de serre. *La Recherche* N° 243, vol 23, mai 1992.
- Groleau, A., Mailhot, A., et Talbot, G. (2007). Trend analysis of winter rainfall over Southern Quebec and New Brunswick (Canada). *Atmosphere-Ocean*, 45(3), 153–162, doi10.3137/ao.450303.
- Groisman, P.Y., Knight, R.W., Easterling, D.R., Karl, T.R., Hegerl, G.C., et Razuvaev, V.N. (2005). Trends in intense precipitation in the climate record. *J. Clim.*, 18, 1326–1350.
- Groisman, P.Y., Karl, T.R., Easterling, D.B., Knight, R.W., Jamason, P.F., Hennessey, K.J., Suppiah, R., Page, C.M., Wibig, J., Fortuniak, K., Razuvaev, V. N., Dougals, A., Førland, E., et Zhai, P.-M (1999). Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change. *Clim. Change*, 42, 243–283.

- Groupe d'étude des sécheresses du SEA (1986). *Climatologie appliquée de la sécheresse dans les provinces des Prairies*. Rapport N° 86-4, Centre climatologique canadien. Downsview, ON, Canada, 197 p.
- Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F.J., et Palmer, T.N. (2005). The rationale behind the success of multi-model ensembles in seasonal forecasting. – I. Basic concepts. *Tellus*, 57A, 219-233.
- Holland, P. W., et Welsch, R.E. (1979). Robust regression using iteratively reweighted least-squares, *Communications in Statistics: Theory and Methods*, A6, 1977, pp. 813-827.
- Huber, P. J. (1981). *Robust Statistics*, Wiley, 1981.
- Huntingford, C., Hemming, D., Gash, J.H.C., Gedney, N., et Nuttall, P.A. (2007) Impact of climate change on health: what is required of climate modellers? *Trans. Roy. Soc. Trop. Med. Hyg.*, 101, 97-103.
- Huntington, T.G. (2003). Climate warming could reduce runoff significantly in New England, USA, *Agric. Forest Meteorol.*, 117, 193-201.
- Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F., et Moneo, M. (2007) Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resour. Manage.*, 21:775–788 DOI 10.1007/s11269-006-9111-6.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: The physical science basis – Summary for policy makers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 18 p.
- IPCC (2000). Emissions scenarios. Summary for policymakers. Special report of Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group III. IPCC, Geneva, Switzerland, 21 p.
- Jiang, T., Chen, Y.D., Xu, C.-Y., Chen, X., Chen, X., et Singh, V.P. (2007). Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China, *J. Hydrol.*, 336, 316-333, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.01.010.
- Jollands, N., Ruth, M., Bernier C., et Golubiewski, N. (2007) The climate's long-term impact on New Zealand infrastructure (CLINZI) project—A case study of Hamilton City, New Zealand. *J. Environ. Manage.*, 83 (2007) 460–477.
- Kharin, V.V., et Zwiers, F. W. (2002). Climate predictions with multi-model ensembles. *J. Clim.*, 15, 793-799.
- Knight, C.G., Knight, S.H.E., Massey, N., Aina, T., Christensen, C., Frame, D.J., Kettleborough, J.A., Martin, A., Pascoe, S., Senserson, B., Stainforth, D.A., et Allen, M.R. (2007). Association of parameter, software, and hardware variation with large-scale behaviour across 57,000 climate models. *PNAS*, 104(30), 12259-12264, doi/10.1073/pnas.0608144104.
- Lasserre, F., et Descroix, L. (2002). *Eaux et territoires – Tensions, coopérations et géopolitique de l'eau*. Les Presses de l'Université Laval, Québec, QC, Canada, 478 p.

- Lavoie, I., Laurion, I., Warren, A., et Vincent, W.F. (2007). *Les fleurs d'eau de cyanobactéries, revue de littérature*. INRS-ETE Rapport N° 916, Québec, QC, Canada, 124 p.
- Leavesley, G.H. (1994). Modeling the effects of climate change on water resources - A review. *Clim. Change*, 28: 159-177.
- Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., et Bush, E. (2008). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 488 p.
- Loukas, A., Vasiliades, L., et Dalezios, N.R. (2002). Climatic impacts on the runoff generation processes in British Columbia, Canada. *Hydrol. Earth Sys. Sci.*, 6(2), 211-227.
- MacKenzie, W.R., Hoxie, N.J., Proctor, M.E., Gradus, S., Blair, K.A., Peterson, D.E., Kazmierczak, J.J., Addiss, D.G., Fox, K.R., Rose J.B., et Davis, J.P. (1994). A massive outbreak in Milwaukee of cryptosporidium infection transmitted through the public water supply. *N. Engl. J. Med.*, 331, 161-167.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D., et Talbot, G. (2007a). Assessment of future change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *J. Hydrol.*, 347(1-2), 197-210, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.019.
- Mailhot, A., Duchesne, S., et Villeneuve, J.-P. (2007b). Les changements climatiques : enjeux et perspectives en matière d'infrastructures urbaines. *Contact Plus*, la Revue de l'Association des Ingénieurs Municipaux du Québec, n° 62, été 2007, p. 20-26.
- Mailhot, A., et Duchesne, S. (2005). Impacts et enjeux liés aux changements climatiques en matière de gestion des eaux en milieu urbain. *Vertigo*, hors-série (1 septembre 2005): 1-9.
- Maracchi, G. (2000). Agricultural drought – a practical approach to definition, assessment and mitigation strategies. Dans : Vogt, J.V. et Somma, F. (éds), *Drought and Drought Mitigation in Europe*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 63-75.
- Mareuil, A., Leconte, R., Brissette, F., et Minville, M. (2007). Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Châteauguay River basin, Canada. *Can. J. Civ. Eng.*, 34, 1048-1060, doi:10.1139/L07-022.
- Marsalek, J., Watt, W.E., Lefrançois, L., Boots, B.F., et Wooss, S. (2004). Approvisionnement en eau des municipalités et développements urbains. Dans : *Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada*. Rapport N° 3, Série de rapports d'évaluation scientifique de l'INRE et Série de documents d'évaluation de la science de la DGSAC, Institut national de recherche sur les eaux Burlington, ON, Canada, p. 39-46.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., et Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *8th Conference on Applied Climatology*, January 17-22, Anaheim, CA.

- MDDEP (2006). *Guide de conception des installations de production d'eau potable, Vol.1*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, QC, Canada. Disponible sur <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/index.htm> (consultation le 21 février 2008).
- MDDEP (2004). *Bilan de l'eau potable au Québec*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, QC, Canada, 46 p. Disponible sur <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/bilan03/bilan.pdf> (consultation le 21 février 2008).
- Mehdi, B., Mrena, C., et Douglas, A. (2006). S'adapter aux changements climatiques: Une introduction à l'intention des municipalités canadiennes. Réseau canadien de recherche sur les impacts climatiques et l'adaptation (C-CIARN), 36 p.
- Meehl, G.A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J.F.B., Stouffer, R.J., et Taylor, K.E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset – A new era in climate change research. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, September 2007, 1383-1394.
- Meehl, G. A., et co-auteurs (2006) Climate change projections for the twenty-first century and climate change commitment in the CCSM3. *J. Clim.*, 19, 2597–2616.
- MENV (2002). *L'eau. La vie. L'avenir. Politique nationale de l'eau*. Ministère de l'Environnement du Québec. Envirodoq : ENV/2002/0310. Québec, QC, Canada, 94 p.
- MENV (2000). *Plan d'action québécois 2000-2002 sur les changements climatiques*. Ministère de l'Environnement du Québec. Envirodoq : ENV2000-0173. Québec, QC, Canada.
- Merritt, W.S., Alila, Y., Barton, M., Taylor, B., Cohen, S., et Neilsen, D. (2006). Hydrologic response to scenarios of climate change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia. *J. Hydrol.*, 326(1-4): 79-108.
- Montminy, M.J. (2005). Le niveau des sources au seuil critique. La Ville de Shawinigan émet une interdiction d'arroser. *Le Nouvelliste* (Trois-Rivières). Actualités, 12 août.
- Mortsch, L., Hengeveld, H., Lister, M., Lofgren, B., Quinn, F., Slivitzky, M., et Wenger, L. (2000). Climate change impacts on the hydrology of the Great Lakes – St. Lawrence System. *Can. Water Resour. J.*, 25(2): 153-179.
- Moulton, R.J., et Cuthbert, D.R. (2000). Cumulative impacts/risk assessment of water removal loss from the Great Lakes – St. Lawrence River system. *Can. Water Resour. J.*, 25(2): 181-208.
- Mukheibir, P. (2007) Qualitative assessment of municipal water resource management strategies under climate impacts: The case of the Northern Cape, South Africa *Water SA*, 33(4), 575-581.
- Murphy, J.M., Booth, B.B.B., Collins, M., Harris, G.R., Sexton, D.M.H., et Webb, M.J. (2007). A methodology for probabilistic predictions of regional climate change from perturbed physics ensembles, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 1993-2028. doi:10.1098/rsta.2007.2077.

- Nantel, È. (2006). *Élaboration d'une méthode d'estimation des vulnérabilités historiques des approvisionnements en eau potable au Québec*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec, QC, Canada, 134 p.
- Nantel, È., Mailhot, A., Rousseau, A.N., et Villeneuve, J.-P. (2005). A methodology to assess historical and current municipal water supply vulnerabilities: an application to Quebec municipalities. Proceedings of the Eight International Conference on Computing and Control for the Water Industry, University of Exeter, Royaume-Uni, 5-7 septembre 2005, Volume 2, p. 185.
- New, M., Lopez, A., Dessai, S., et Wilby, R. (2007). Challenges in using probabilistic climate change information for impact assessments: an example from the water sector, *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2117-2131, doi:10.1098/rsta.2007.2080.
- Ouranos (2004). *S'adapter aux changements climatiques*. Ouranos, Montréal, QC, Canada, 84 p. Disponible sur <http://www.ouranos.ca/cc/changclim9.pdf> (consultation le 21 février 2008).
- Pal, J.S., Giorgi, F., et Bi, X. (2004). Consistency of recent European summer projection trends and extremes with future regional climate projections. *Geophys. Res. Lett.*, 31, doi:10.1029/2004GL019836.
- Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought*. U.S. Weather Bureau, Document de recherche 45, Washington, DC, 58 p.
- Palmer, T., Shutts, G., Hagedorn, R., Doblas-Reyes, F., Jung, T., et Leutbecher, M. (2005a) Representing model uncertainty in weather and climate prediction. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 33, 163–193. (doi:10.1146/annurev.earth.33.092203.122552).
- Palmer, T. N., Doblas-Reyes, F. J., Hagedorn, R., et Weisheimer, A. (2005b). Probabilistic prediction of climate using multi-model ensembles: from basics to applications. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360, 1991–1998. (doi:10.1098/rstb.2005.1750)
- Patz, J.A., McGeehin, M.A., Bernard, S.M., Ebi, K.L., Epstein, P.R., Grambsch, A., Gubler, D.J., Reiter, P., Romieu, I., Rose, J.B., Samet, J.M., et Trtanj, J. (2000). The potential health impacts of climate variability and change for the United States: Executive summary of the report of the health sector of the U.S. National Assessment. *Environ. Health Persp.*, 108(4), 367-376.
- Phillips, I.D., et McGregor, G.R. (1998). The utility of a drought index for assessing the drought hazard in Devon and Cornwall, South West England. *Meteor. Appl.*, 5: 359-372.
- Piani, C., Frame, D. J., Stainforth, D. A., et Allen, M. R. (2005). Constraints on climate change from a multi-thousand member ensemble of simulations. *Geophys. Res. Lett.* 32, L23 825. (doi:10.1029/2005GL024452)
- Pietroniro, A., Leconte, R., Toth, B., Peters, D.L., Kouwen, N., Conly, F.M. et Prowse, T. (2006). Modelling climate change impacts in the Peace and Athabasca catchment and delta : III – integrated model assessment, *Hydrol. Process.*, 20, 4231-4245.

- Plummer, D.A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R., et de Elía, R. (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *J. Clim.*, 19 (13), 3112-3132.
- PricewaterhouseCoopers (2002). *Portrait financier de la gestion publique de l'eau - Ville de Montréal*. Montréal, Canada, 36 p. + annexes.
- Radio-Canada (2002). *La Ville de Québec pourrait manquer d'eau si la sécheresse se poursuit*. www.radio-canada.ca/Québec (mise à jour du 4 septembre 2002).
- Ressources naturelles Canada (2004). *Les ressources en eau - Impacts et adaptation liés au changement climatique : perspective canadienne*. Direction des impacts et de l'adaptation au changement climatique, Ottawa, ON, Canada, 190 p. Disponible sur http://adaptation.nrcan.gc.ca/perspective/pdf/report_f.pdf (consultation le 25 février 2008).
- Risbey, J.S., Hamza, K., et Marsden, J.S. (2007). Use of climate scenarios to aid in decision analysis for interannual water supply planning. *Water Resour. Manage.*, 21:919–932. DOI 10.1007/s11269-006-9064-9.
- Rose, J.B., Daeschner, S. Easterling, D.R. et al. (2000). Climate and waterborne disease outbreaks. *J. Am. Water Works Ass.*, 92(9), 77-87.
- Rousseau, A.N., Mailhot, A., Slivitzky, M., Villeneuve, J.-P., Rodriguez, M.J., et A. Bourque (2004). Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Québec. Niveau des connaissances et axes de recherche à privilégier dans une perspective de changements climatiques. *Rev. can. ressour. hydr./Can. Water Resour. J.*, Vol 29(2), 125-138.
- Rousseau, A.N., Mailhot, A., et Villeneuve, J.-P. (2003). Connaissons-nous bien la capacité de nos bassins versants et aquifères régionaux à fournir de l'eau potable à la population du Québec sous de nouvelles conditions climatiques? Dans : *Recueil de conférences du 26^e Symposium sur les eaux usées & Atelier sur l'eau potable*, Laval, Canada, 17-18 septembre 2003, p. 261-267.
- Roy, L., Leconte, R., Brissette, F.P., et Marche, C. (2001). The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River Basin. *Hydrol. Proc.*, 15, 3167-3179.
- Ruth, M., Bernier, C., Jollands, N., et Golubiewski, N. (2007). Adaptation of urban water supply infrastructure to impacts from climate and socioeconomic changes: The case of Hamilton, New Zealand. *Water Resour. Manage.*, 21:1031–1045, doi:10.1007/s11269-006-9071-x.
- Scibek, J., et Allen, D.M. (2006). Modeled impacts of predicted climate change on recharge and groundwater levels. *Water Resour. Res.*, 42, W11405, doi:10.1029/2005WR004742.
- Seager, R., Ting, M., Held, I., Kushnir, Y., Lu, J., Vecchi, G., Huang, H.-P., Harnik, N., Leetmaa, A., Lau, N.-C., Li, C., Velez, J., et Naik, N. (2007). Model projections of an imminent transition to a more arid climate in Southwestern North America. *Science*, 316, 1181-1184. DOI: 10.1126/science.1139601.
- Semmler, T., et D. Jacob (2004). Modeling extreme precipitation events – a climate change simulation for Europe. *Global Plan. Change*, 44, 119-127.

- SIARL (2007). *Syndicat intercommunal d'assainissement de la région de Lagny-sur-Marne - Les usages domestiques*. http://www.siarl.fr/usage_domestique.htm (consultation le 4 mars 2008).
- Slivitzky, M. (1998). Le capital eau : son potentiel et ses usages – Les lacs et les rivières. Dans : *Symposium sur la gestion de l'eau au Québec, Volume 1 : Recueil des textes des conférenciers*. J.-P. Villeneuve, A. Rousseau et S. Duchesne (éds), INRS-Eau, Québec, QC, Canada, p. 69-83.
- Smith, J., Lavender, B., et Burton, I. (2001). Stratégie d'adaptation en vue de réduire la vulnérabilité des canadiens aux changements. *Isuma*, 2(4): 70-77.
- Stainforth, D. A., Allen, M.R., Tredger, E.R., et Smith, L.A. (2007a). Confidence, uncertainty and decision-support relevance in climate predictions. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2145-2161, doi:10.1098/rsta.2007.2074.
- Stainforth, D. A., Downing, T.E., Washington, R., Lopez, A., et New, M. (2007b). Issues in the interpretation of climate model ensembles to inform decisions. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2163-2177, doi:10.1098/rsta.2007.2073.
- Stainforth, D. A., Aina, T., Christensen, C., Collins, M., Faull, N., Frame, D.J., Kettleborough, J.A., Knight, S., Martin, A., Murphy, J.M., Oiani, C., Sexton, D., Smith, L.A., Spicer, R.A., Thorpe, A.J., et Allen, M.R. (2005). Uncertainty in predictions of the climate response to rising levels of greenhouse gases. *Nature* 433, 403–406. (doi:10.1038/nature03301).
- Street, J. O., Carroll, R.J., et Ruppert, D. (1988). A note on computing robust regression estimates via iteratively reweighted least squares, *American Stat.*, 42,152-154.
- Stemp-Morlock G. (2007). Australia's war on drought. *Environ. Health Persp.*, 115 (7): A348-A348.
- Sushama, L., Laprise, R., Caya, D., Frigon, A., et Slivitsky, M. (2006). Canadian RCM projected climate-change signal and its sensitivity to model errors. *Int. J. Clim.*, 26, 2141-2159.
- Sushama, L., Laprise, R., Caya, D., Larocque, M., et Slivitsky, M. (2004). On the variable-lag and variable-velocity cell-to-cell routing schemes for climate models. *Atmosphere-Ocean*, 42(4), 221-233.
- Tebaldi, C., et Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 2053–2075, doi:10.1098/rsta.2007.2076.
- Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J.M., et Meehl, G.A. (2006). Going to the extremes – An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. *Clim. Change*, 79 (3-4), 181-211.
- Thériault, C. (2005). Pénurie d'eau et rareté du saumon au Bic. *Le Soleil, L'Est et la Côte-Nord*, 23 juillet, p. A18.
- Thomas, G., et Henderson-Sellers, A. (1990). An evaluation of proposed representation of subgrid hydrologic processes in climate models. *J. Clim.*, 4, 898-910.

- Thomson, M. C., Doblas-Reyes, F. J., Mason, S. J., Hagedorn, R., Connor, S. J., Phindela, T., Morse, A. P., et Palmer, T. N. (2006). Malaria early warnings based on seasonal climate forecasts from multi-model ensembles. *Nature* 439, 576–579. (doi:10.1038/nature04503)
- Vincent L.A., et Mekis, E. (2006). Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century. *Atmosphere-Ocean*, 44(2): 177–193.
- von Deimling, T. S., Held, H., Ganopolski, A., et Rahmstorf, S. (2006). Climate sensitivity estimated from ensemble simulations of glacial climate. *Clim. Dynam.* 27, 149–163. (doi:10.1007/s00382-006-0126-8)
- Walsh, C.J., Roy, A.H., Feminella, J.W., Cottingham, P.D., Groffman, P.M., et Morgan, R.P.. (2005). The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure. *J. North Am. Benthol. Soc.*, 24(3), 706-723.
- Watson, R.T., Patz, J., Gubler, D.J., Parson, E.A., et Vincent, J.H. (2005). Environmental health implications of global climate change. *J. Environ. Monit.*, 7, 834 – 843.
- Watson, R.T. et the Core Writing Team (2001). *Climate change 2001: Synthesis report*. intergovernmental panel on climate change, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 34 p.
- Yue, S., Pilon. P., Phinney, B., et Cavadias, G. (2002a). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrol. Process.* 16: 1807–1829.
- Yue, S., Pilon. P., Phinney, B., et Cavadias, G. (2002b). Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *J. Hydrol.*, 259: 254–271.
- Yue, S., Pilon. P., Phinney, B., et Cavadias, G. (2002c). Corrigendum to "Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series" *J. Hydrol.*, 259 (2002), 254–271], *J. Hydrol.*, 264, 262-263.
- Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., Lambert, F.H., Gillett, N.P., Solomon, S., Stott, P.A., et Nozawa, T. (2007). Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature*, 448, 461-466, doi:10.1038/nature60025.
- Zhang, X., Harvey, K.D., Hogg, W.D., et Yuzyk, T.D. (2001). Trends in Canadian streamflow. *Water Resour. Res.*, 37(40), 387-398.
- Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D., et Niitsoo, A. (2000). Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. *Atmosphere-Ocean*, 38(3): 395-429.

Annexe A - Méthode d'agrégation des séries et de combinaison des résultats

Soit $a_{i,j}^{(k)}$ la partie de la surface totale de la tuile j de la grille du modèle k couvrant (en tout ou en partie) la tuile i de la grille de référence. Par ailleurs, définissons la série à la tuile j pour la variable x au pas de temps t (par exemple la précipitation totale au mois de juillet) par $\{x_j^{k,l,m}(t)\}$ où k désigne le modèle, l , le membre et m , le scénario de gaz à effet de serre.

À partir des séries aux différentes tuiles pour la simulation $\{k,l,m\}$, l'on « reconstruit » une série sur la grille de référence en « projetant » les précipitations de la grille du modèle sur cette grille de référence, ce qui peut s'écrire sous la forme :

$$y_i^{(k,l,m)}(t) = \sum_{j \subset i} \frac{a_{i,j}^{(k)}}{A_j^{(k)}} x_j^{(k,l,m)}(t) \quad (\text{A.1})$$

où $y_i^{(k,l,m)}(t)$ est la « nouvelle » valeur de la variable au temps t pour la simulation $\{k,l,m\}$ à la tuile i de la grille de référence et $A_j^{(k)}$ est la surface totale de la tuile j du modèle k . La somme porte sur toutes les tuiles de la grille du modèle k couvrant en tout ou en partie la tuile i de la grille de référence ($j \subset i$).

L'analyse de tendance portera donc sur chacune de ces séries de la grille de référence $\{y_i^{(k,l,m)}(t)\}$. De même, l'on définit par $\alpha_i^{k,l,m}(y)$ la tendance associée à la série $\{y_i^{(k,l,m)}(t)\}$. On combine les résultats des différentes simulations en accordant un poids identique à chaque simulation et en regroupant les simulations selon la tendance détectée à la tuile considérée, ce qui peut s'écrire sous la forme :

$$f_{i,m}^\alpha(y) = \frac{1}{N} \sum_k \sum_{l(k)} \delta[\alpha - \alpha_i^{k,l,m}(y)] \quad (\text{A.2})$$

où $f_{j,m}^\alpha$ est la probabilité d'occurrence des tendances $\alpha = \{+, -, 0\}$ pour la tuile j de la grille de référence et le scénario de GES m et N est le nombre de simulations considérées, c'est-à-dire :

$$N = \sum_k I_k^{(m)} \quad (\text{A.3})$$

où $I_k^{(m)}$ correspond au nombre de membres disponibles pour le scénario de GES m et le modèle k . Enfin, $\delta[n - n']$ désigne la fonction delta de Dirac définie par :

$$\delta[n - n'] = \begin{cases} 0 & \text{si } n \neq n' \\ 1 & \text{si } n = n' \end{cases} \quad (\text{A.4})$$

La fonction delta indique simplement que, pour la tuile de la grille de référence considérée, seule la contribution des simulations de même tendance est considérée dans la somme.

Enfin définissons $\Delta_i^{k,l,m}(y)$ la variation de la moyenne à la tuile i de la variable y subie sur la période 1900-2100 (ou toute autre période jugée pertinente) pour la simulation $\{k, l, m\}$ (après avoir ajusté un modèle non stationnaire sur les données de la grille de référence). On peut définir la valeur moyenne sur les simulations de cette variation pour chaque classe de tendance par :

$$\langle \Delta_{i,m}^\alpha(y) \rangle = \frac{1}{N_i^{(m,\alpha)}} \sum_k \sum_{l(k)} \Delta_i^{k,l,m}(y) \delta[\alpha - \alpha_i^{k,l,m}(y)] \quad (\text{A.5})$$

où $N_i^{(m,\alpha)}$ est le nombre de simulations du scénario de GES m montrant une tendance α pour la tuile i , c'est-à-dire :

$$N_i^{(m,\alpha)} = \sum_k \sum_{l(k)} \delta[\alpha - \alpha_i^{k,l,m}(y)] \quad (\text{A.6})$$

Par ailleurs, si l'on désire considérer une approche où l'on accorde un poids égal à chaque modèle, comme nous l'avons fait dans le présent rapport, il faut d'abord effectuer une moyenne sur les membres disponibles, ce qui s'écrit dans le cas de la probabilité d'observer la tendance α :

$$f_i^{(m,\alpha)}(y) = \frac{1}{N_M^{(m)}} \sum_k \left(\frac{1}{I_k^{(m)}} \sum_{l(k)} \delta[\alpha - \alpha_i^{k,l,m}(y)] \right) \quad (\text{A.7})$$

où $I_k^{(m)}$ est le nombre de membres disponibles pour le modèle k simulant le scénario de GES m alors que $N_M^{(m)}$ est le nombre de modèles différents simulant le scénario de GES m . De même pour la variation présent-futur :

$$\langle \Delta_{i,m}^\alpha(y) \rangle = \frac{1}{\bar{N}_i^{(m,\alpha)}} \sum_k \left(\frac{1}{I_{i,k}^{(m,\alpha)}} \sum_{l(k)} \Delta_i^{k,l,m}(y) \delta[\alpha - \alpha_i^{k,l,m}(y)] \right) \quad (\text{A.8})$$

où $I_{i,k}^{(m,\alpha)}$ est le nombre de membres disponibles pour le modèle k simulant le scénario de GES m montrant une tendance α pour la tuile i et $\bar{N}_i^{(m,\alpha)}$ est le nombre de modèles différents simulant le scénario de GES m et dont la série à la tuile i est de tendance α .

Annexe B - Précipitations mensuelles – tendances – scénarios A1B et B1

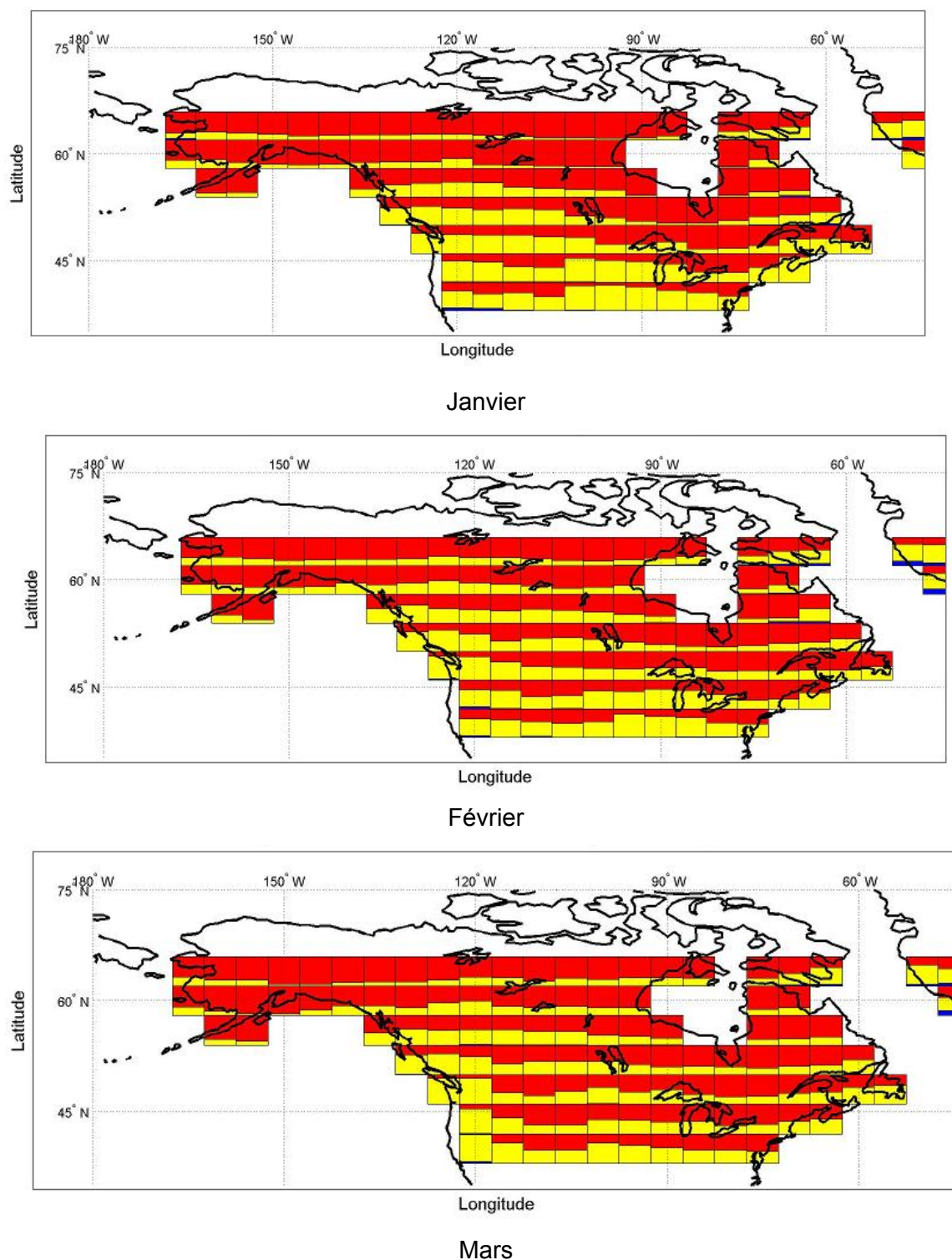


Figure B. 1 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

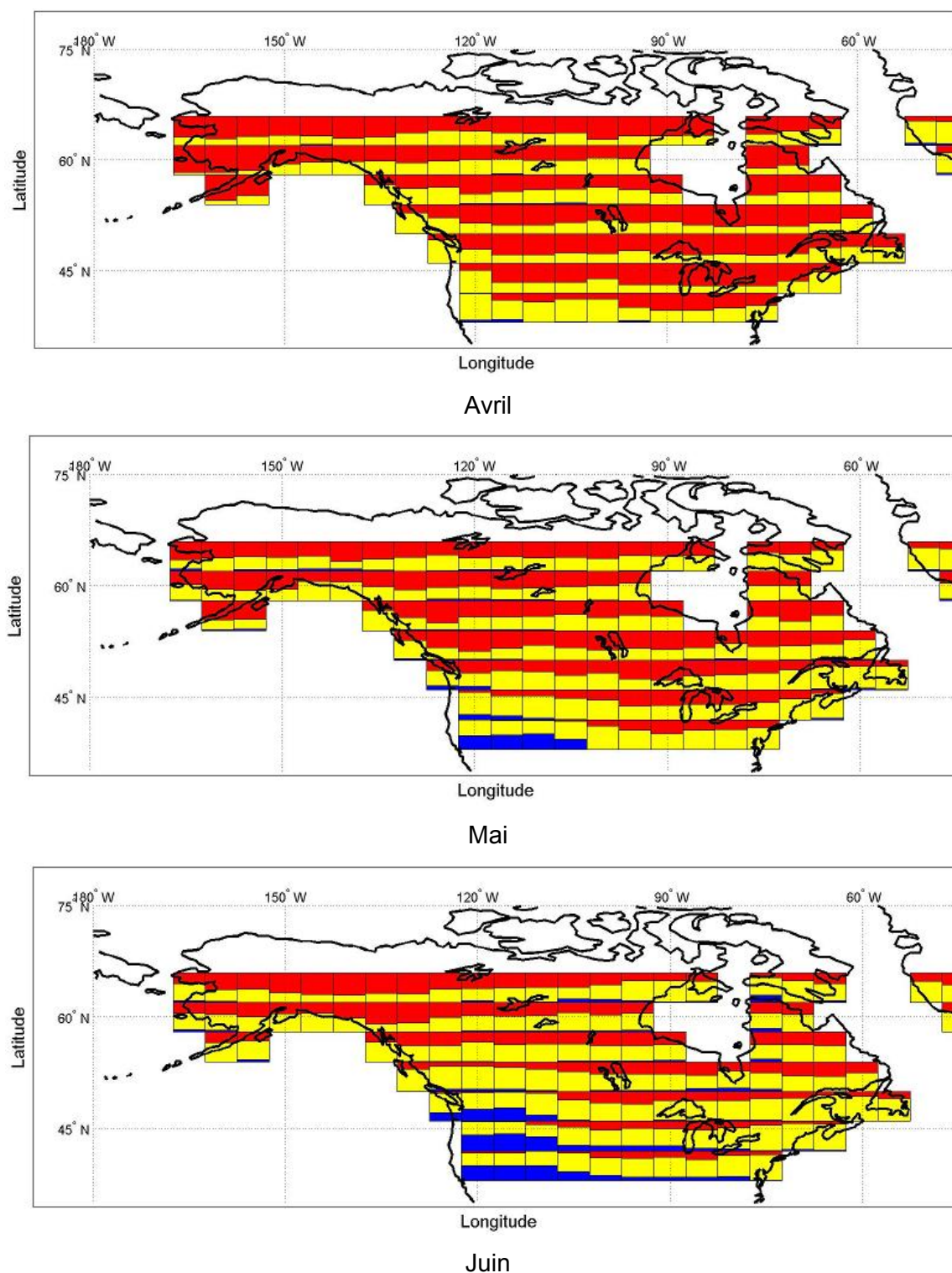


Figure B. 2 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

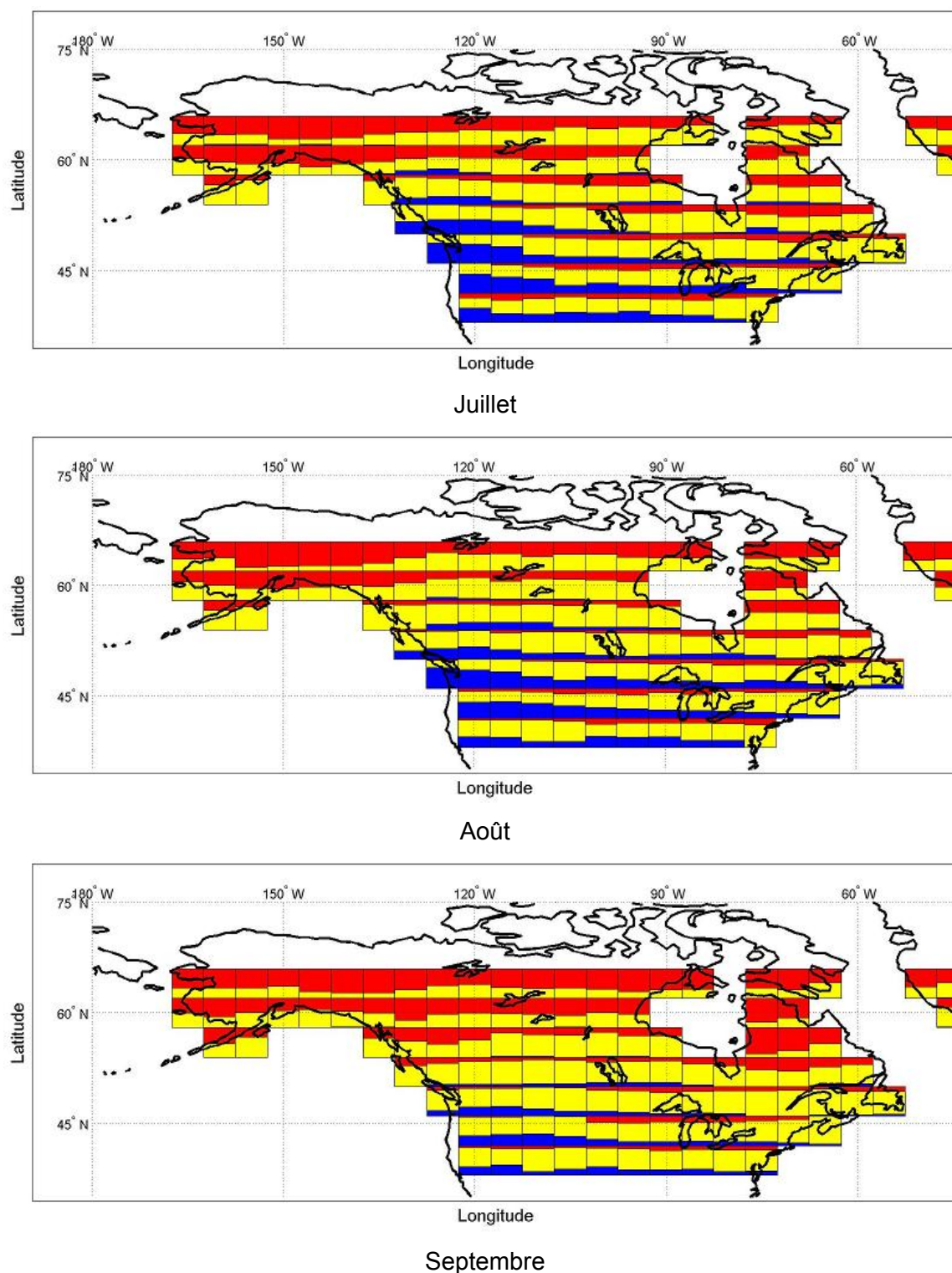


Figure B. 3 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

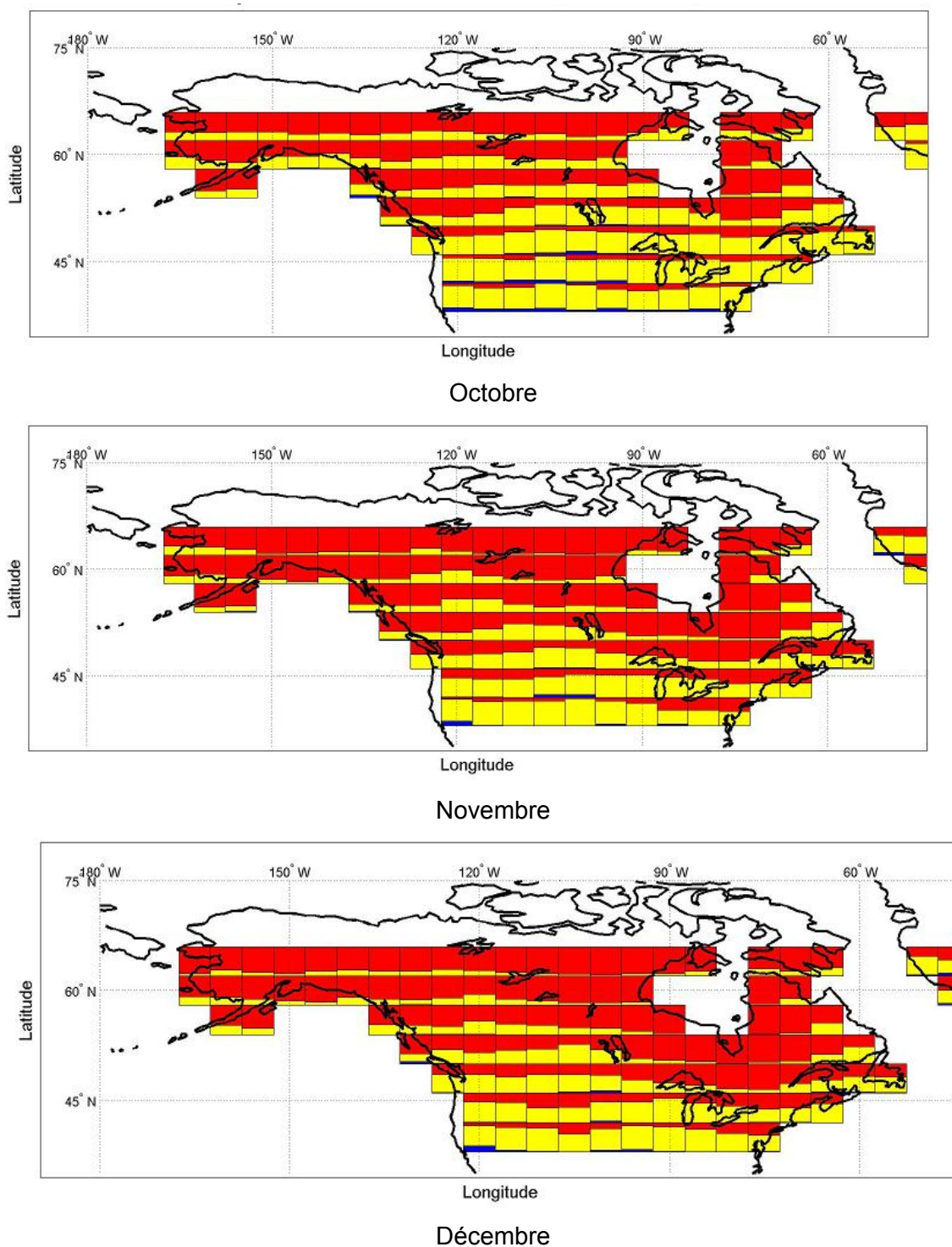


Figure B. 4 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

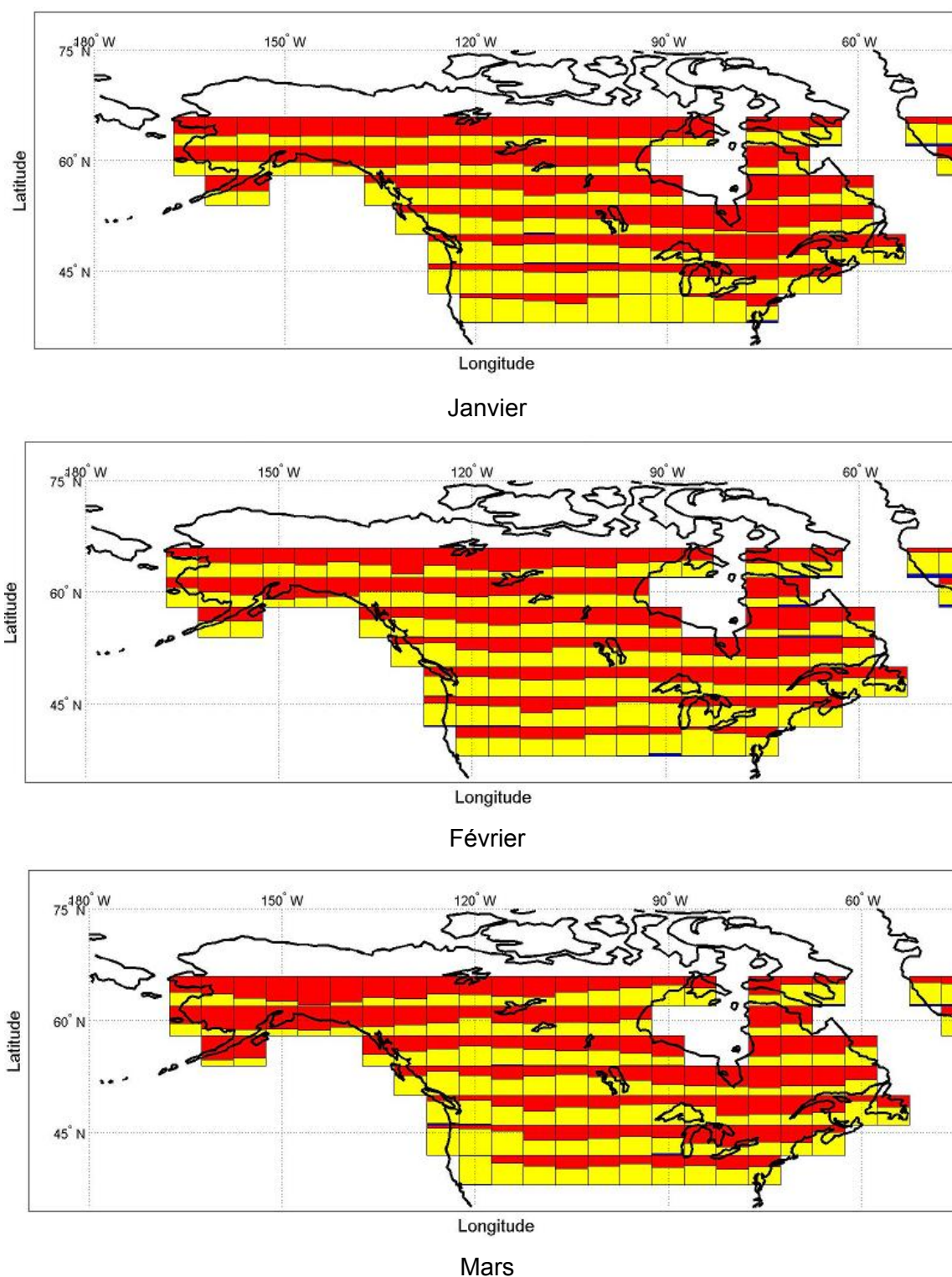


Figure B. 5 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

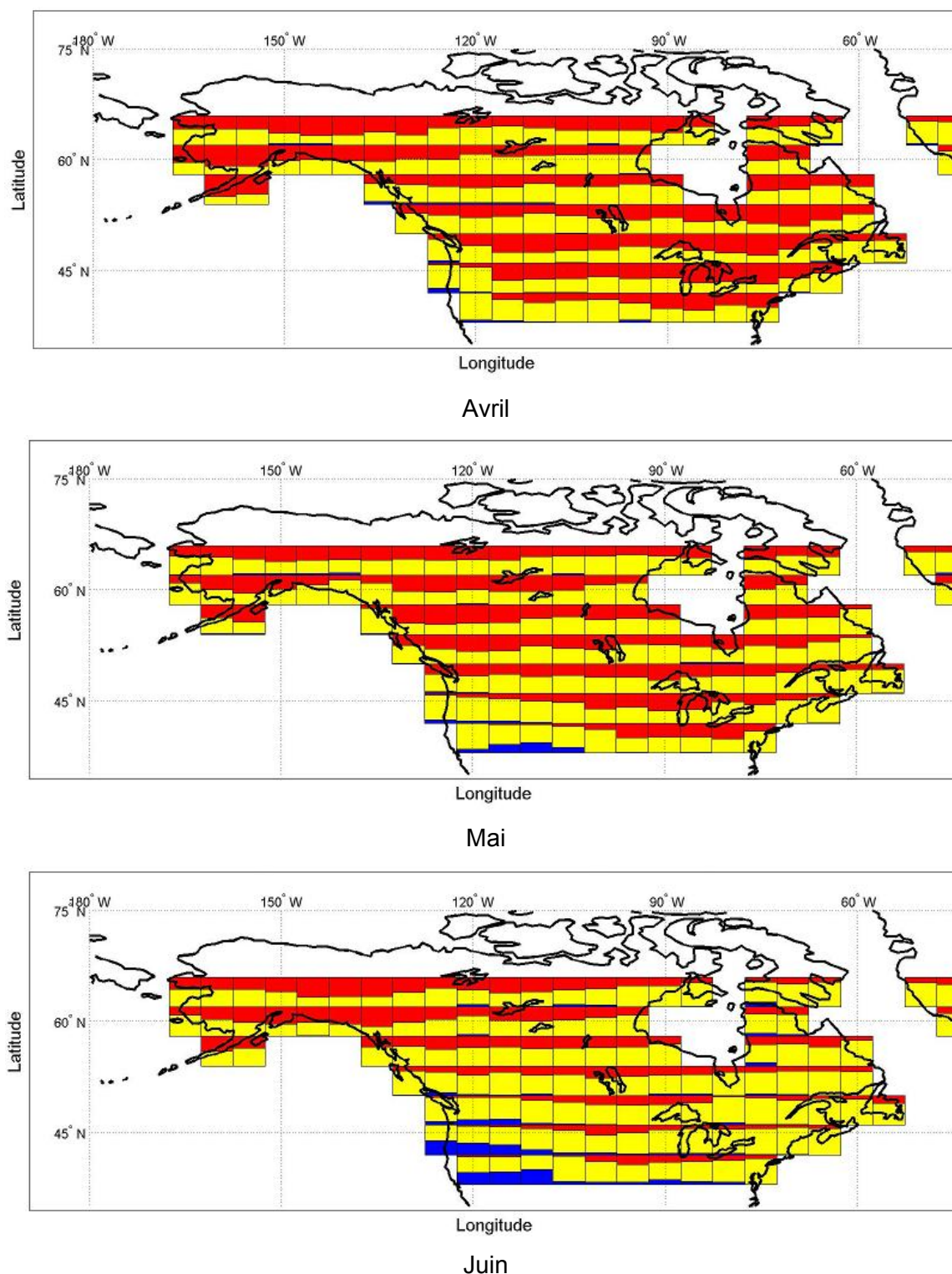
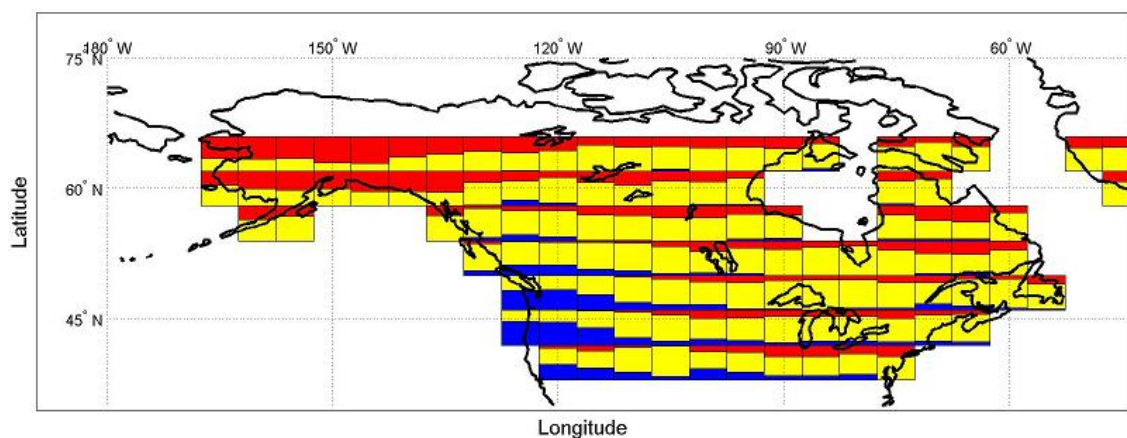
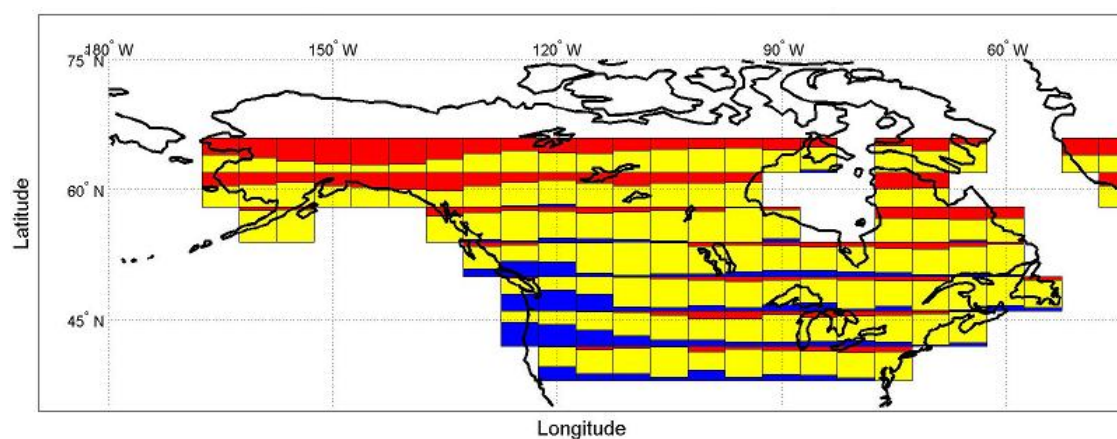


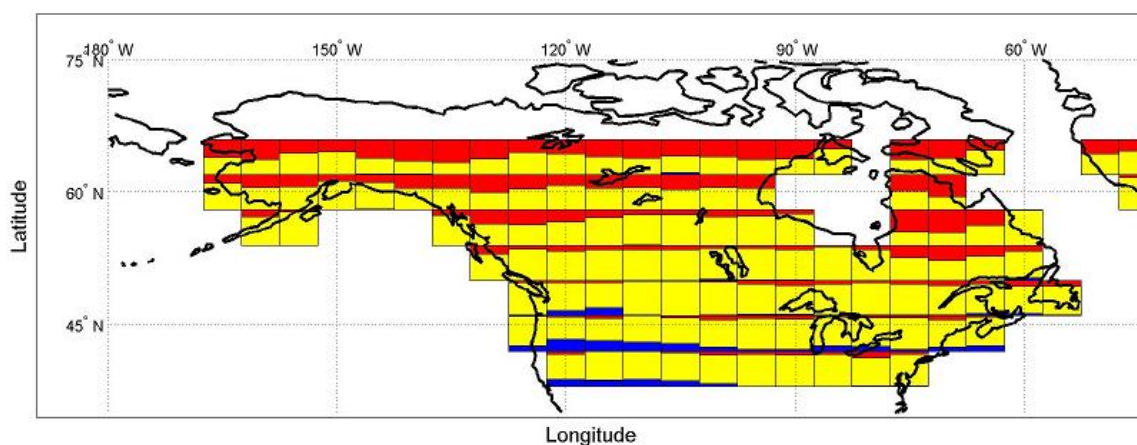
Figure B. 6 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)



Juillet



Août



Septembre

Figure B. 7 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

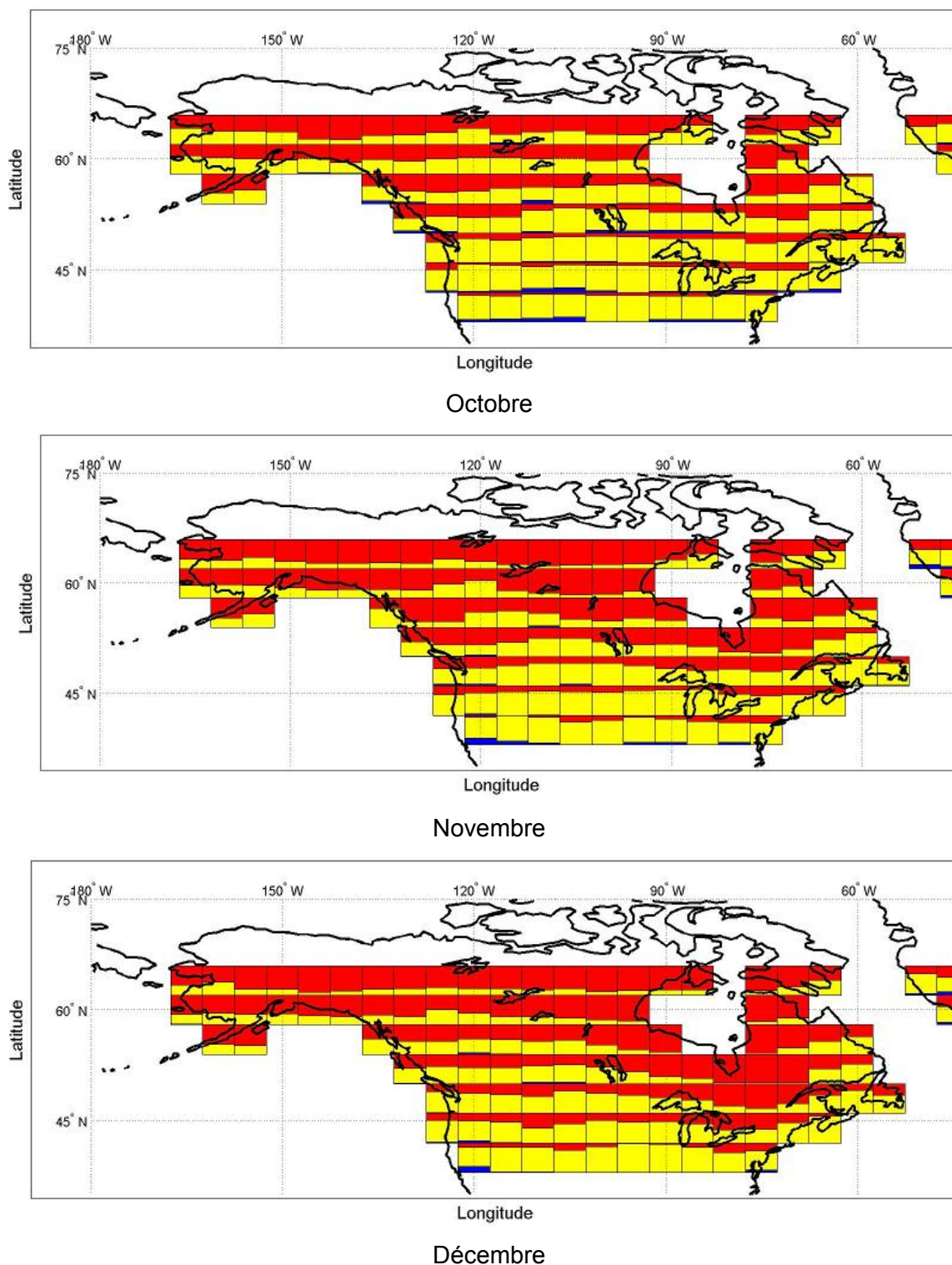
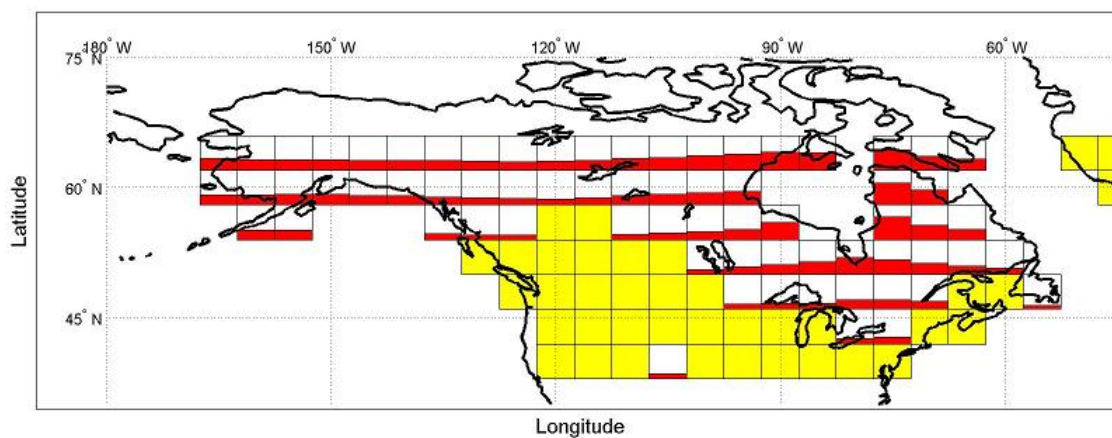
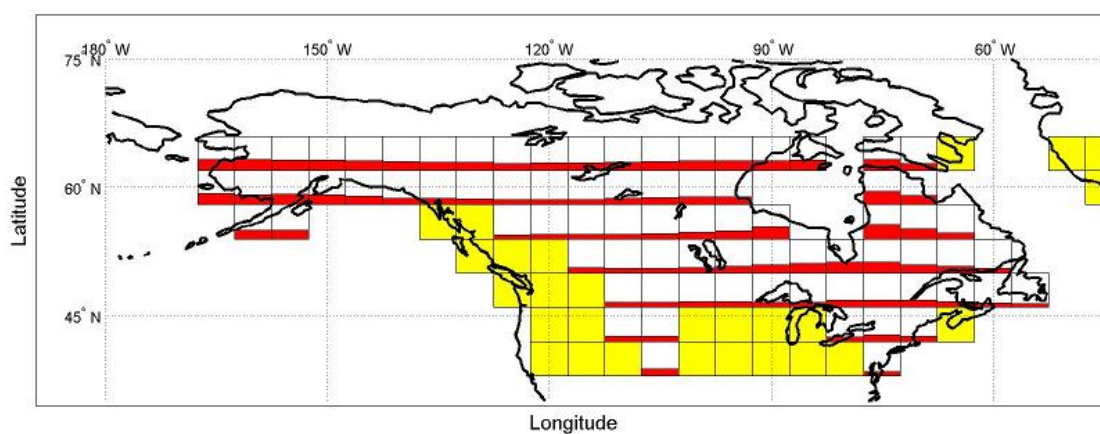


Figure B. 8 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

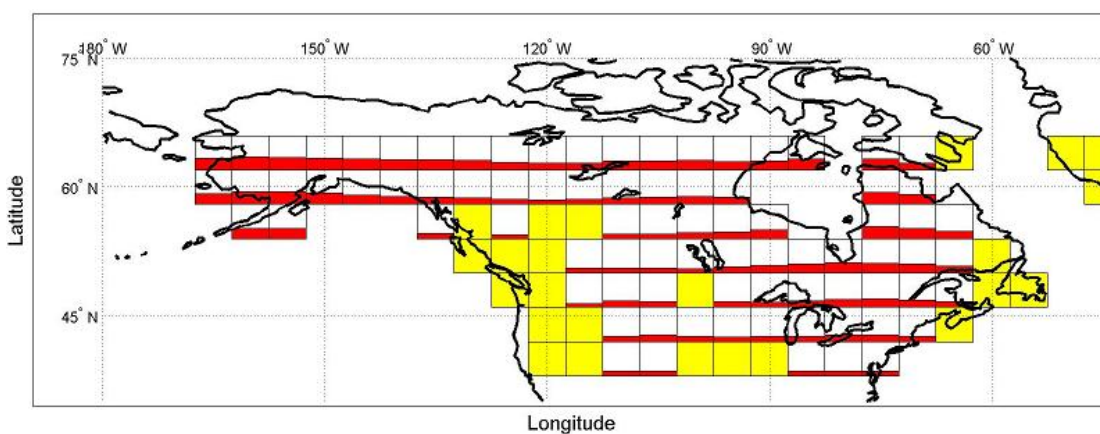
Annexe C - Précipitations mensuelles – variations moyennes sur la période 1900-2100 - scénarios A1B et B1



Janvier



Février



Mars

Figure C 1 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES A1B).

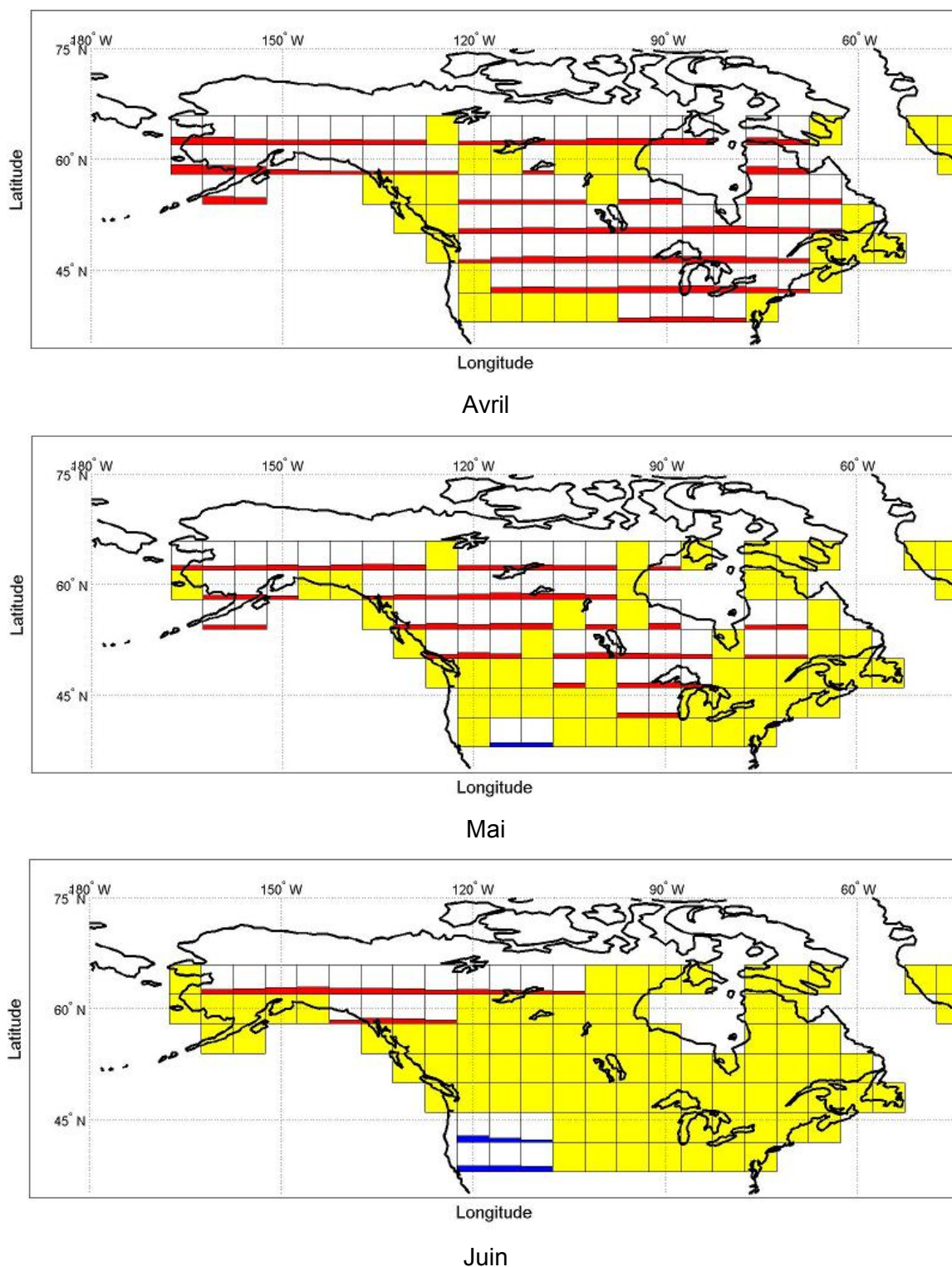


Figure C 2 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES A1B).

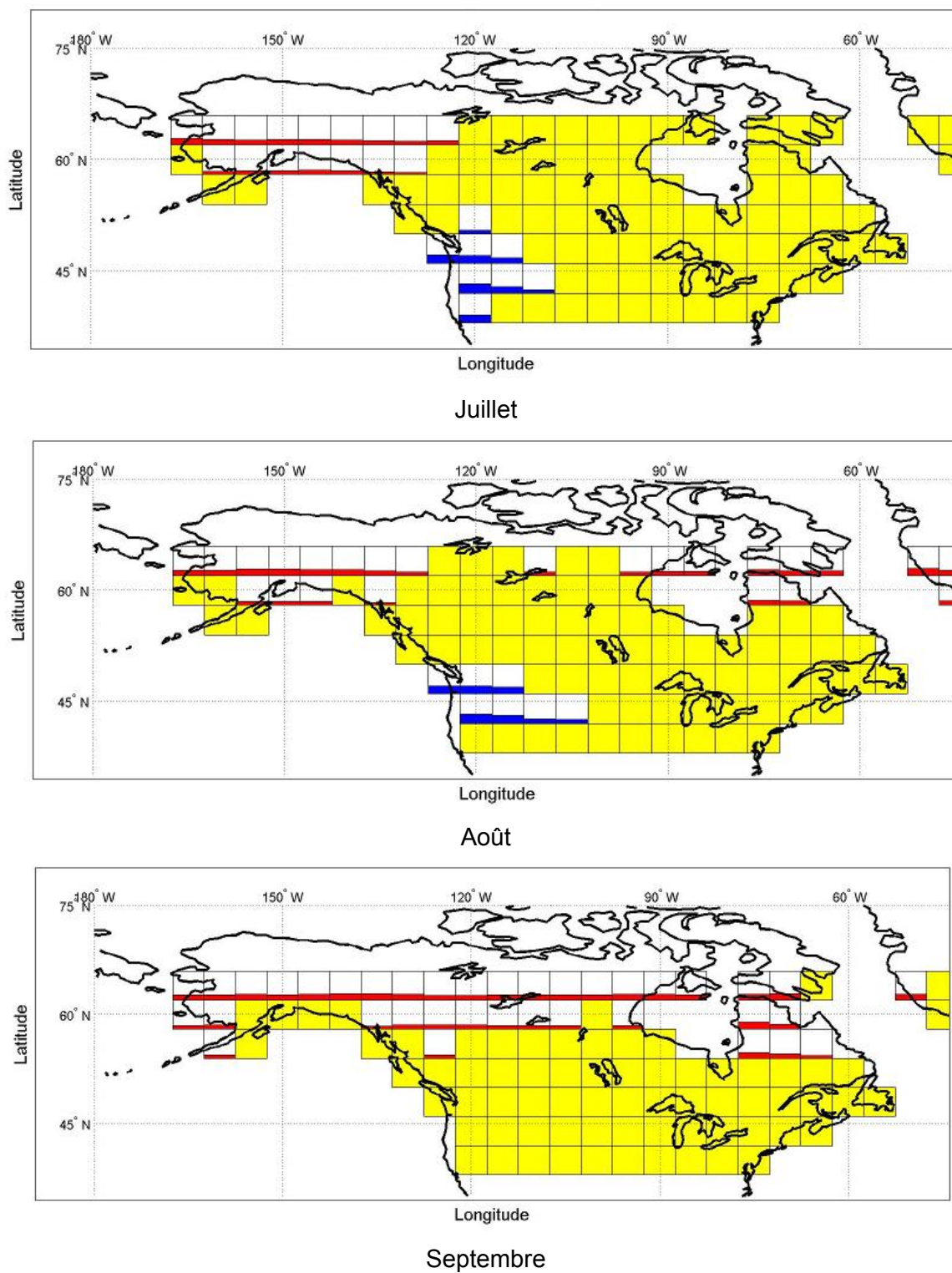


Figure C 3 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES A1B)

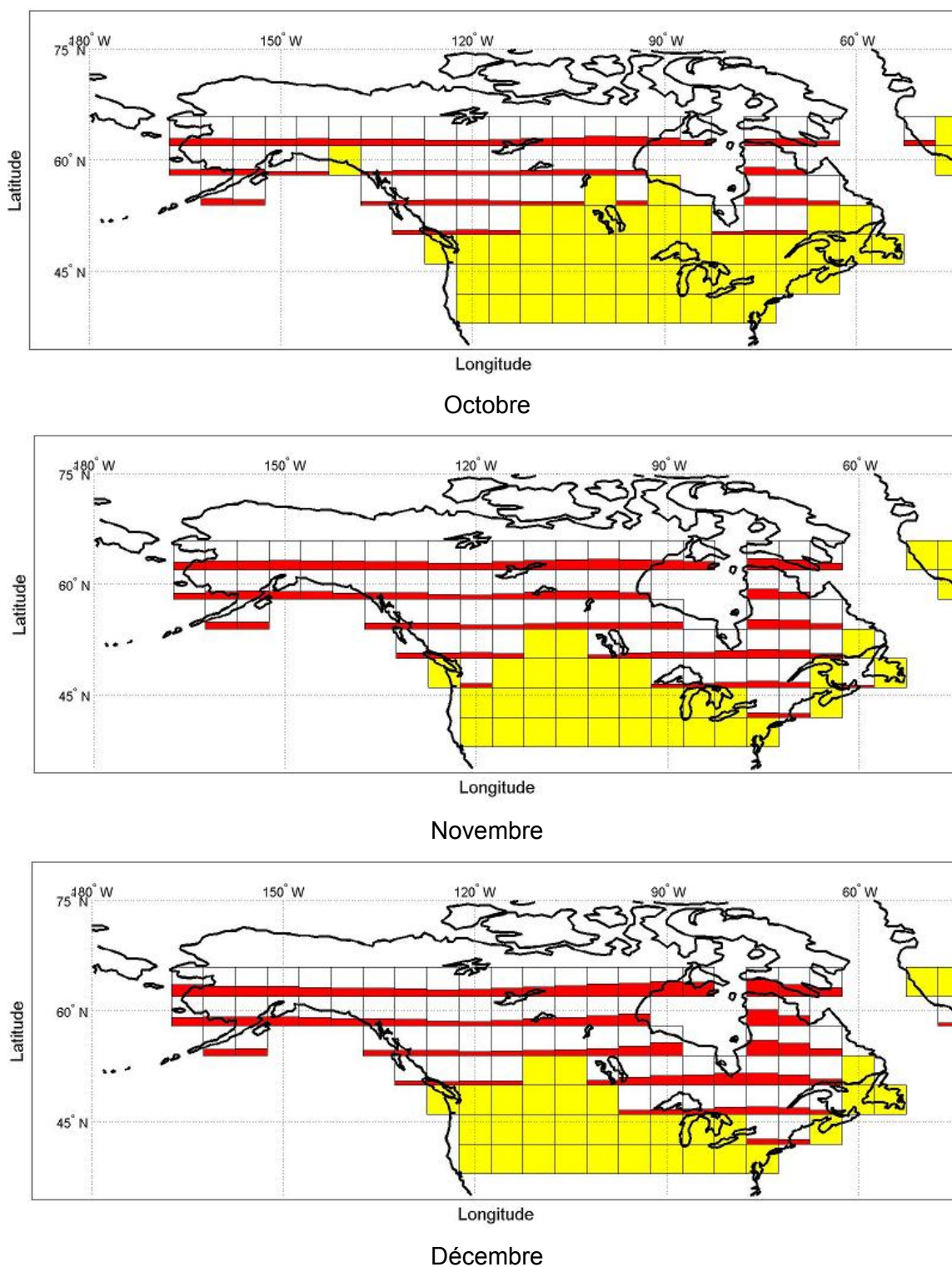


Figure C 4 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES A1B)

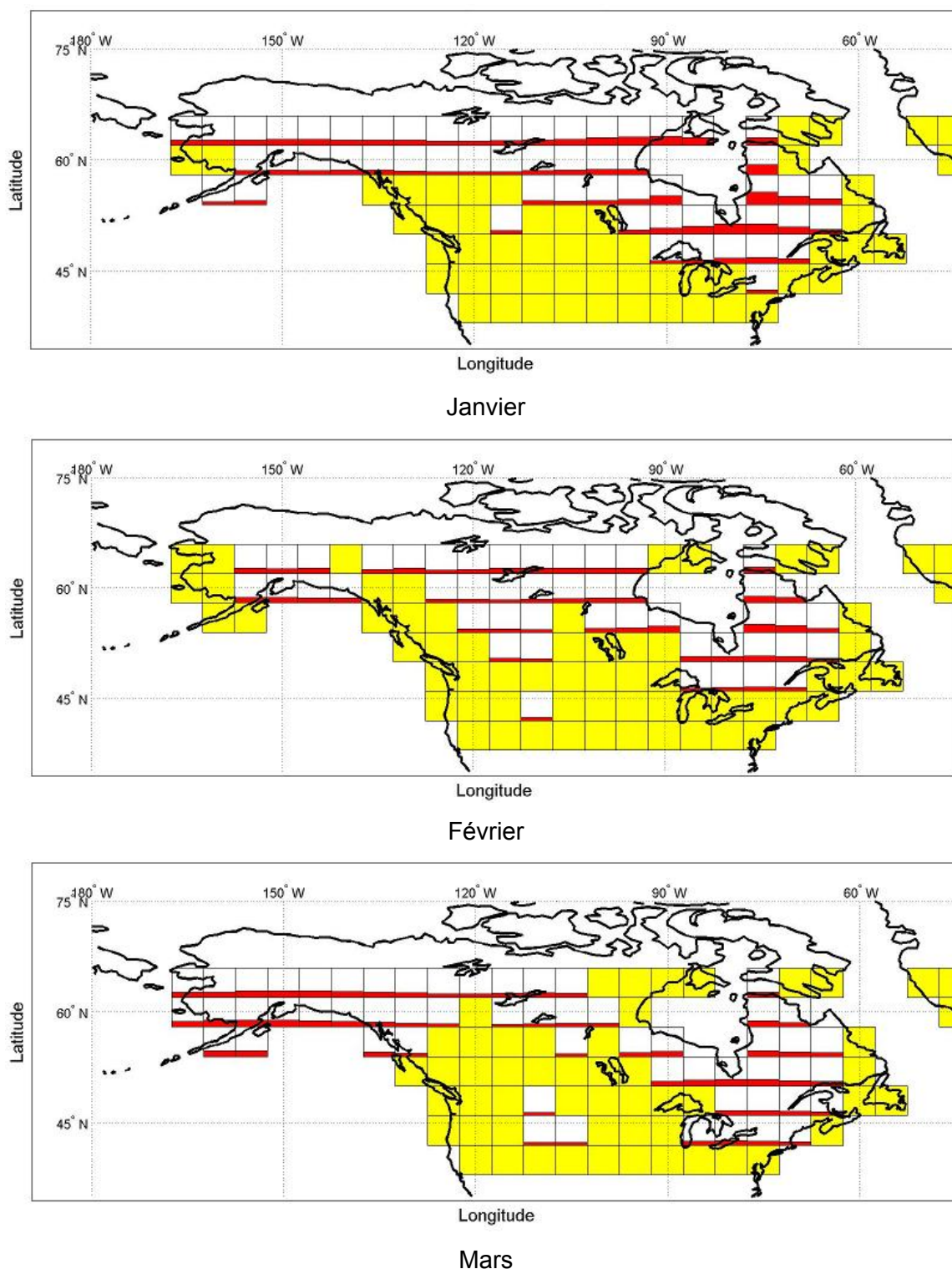


Figure C 5 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES B1)

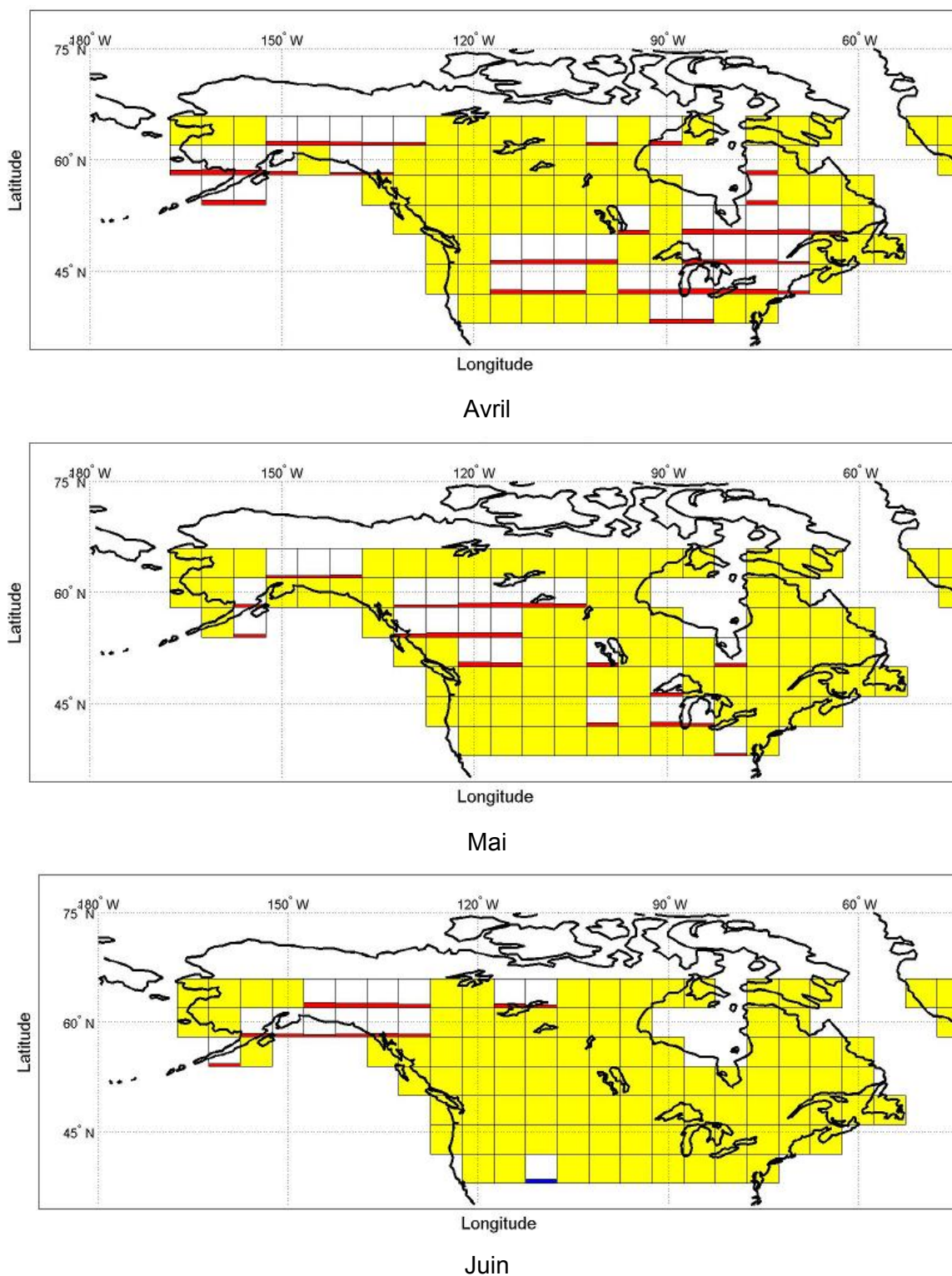


Figure C 6 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES B1)

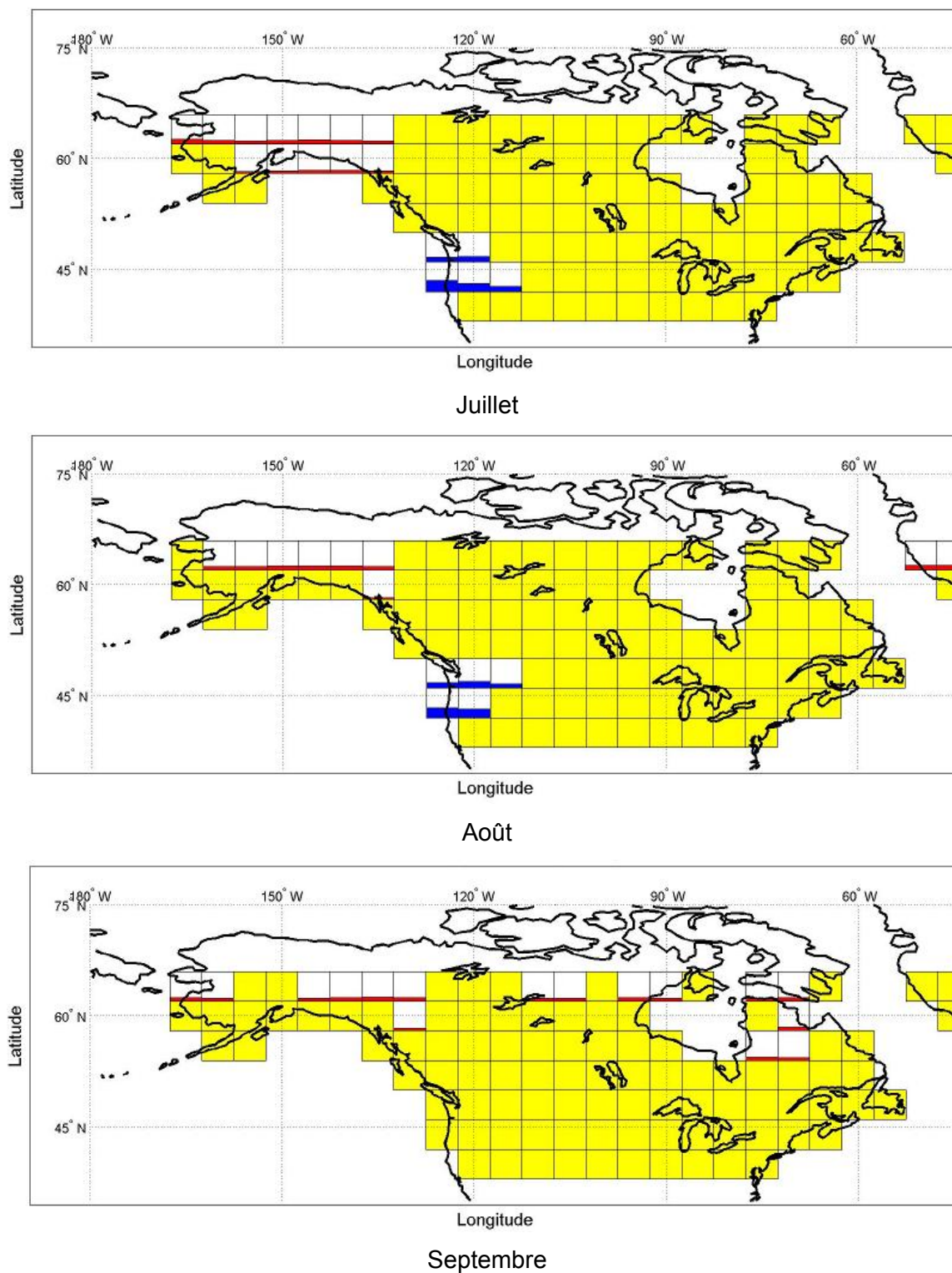


Figure C 7 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES B1)

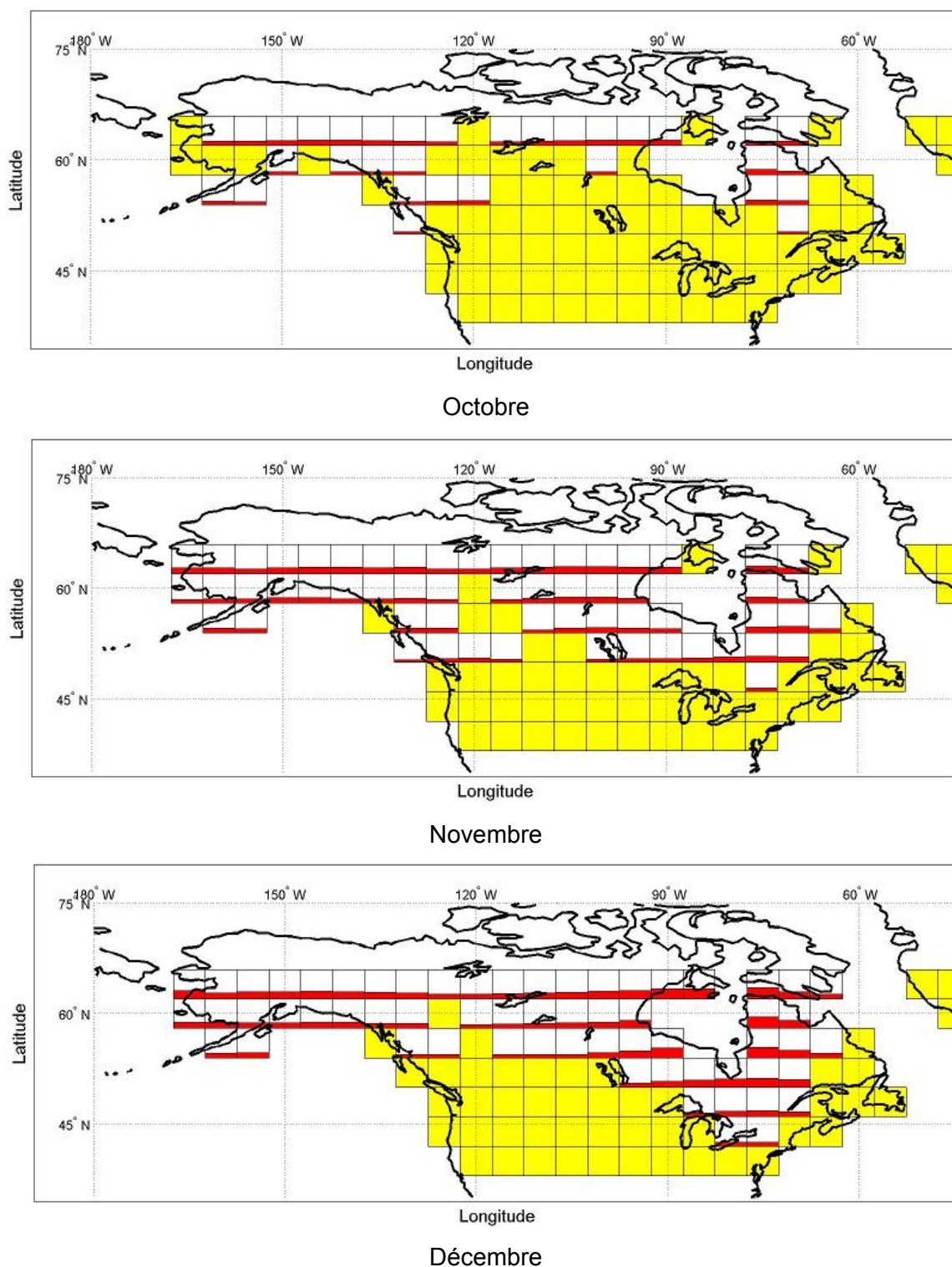


Figure C 8 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES B1)

Annexe D - Écoulements mensuels – tendances – scénarios A1B et B1

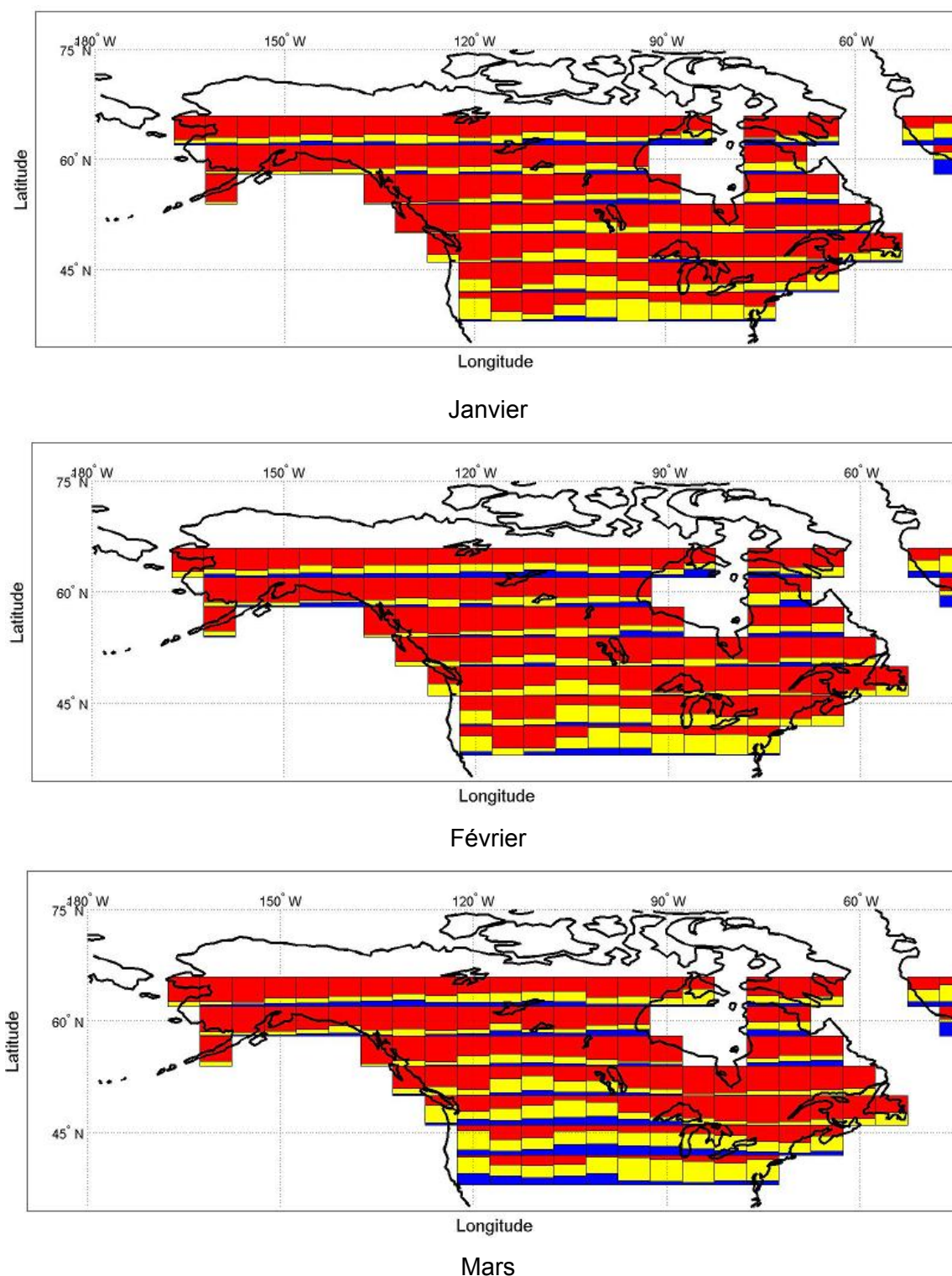


Figure D 1 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

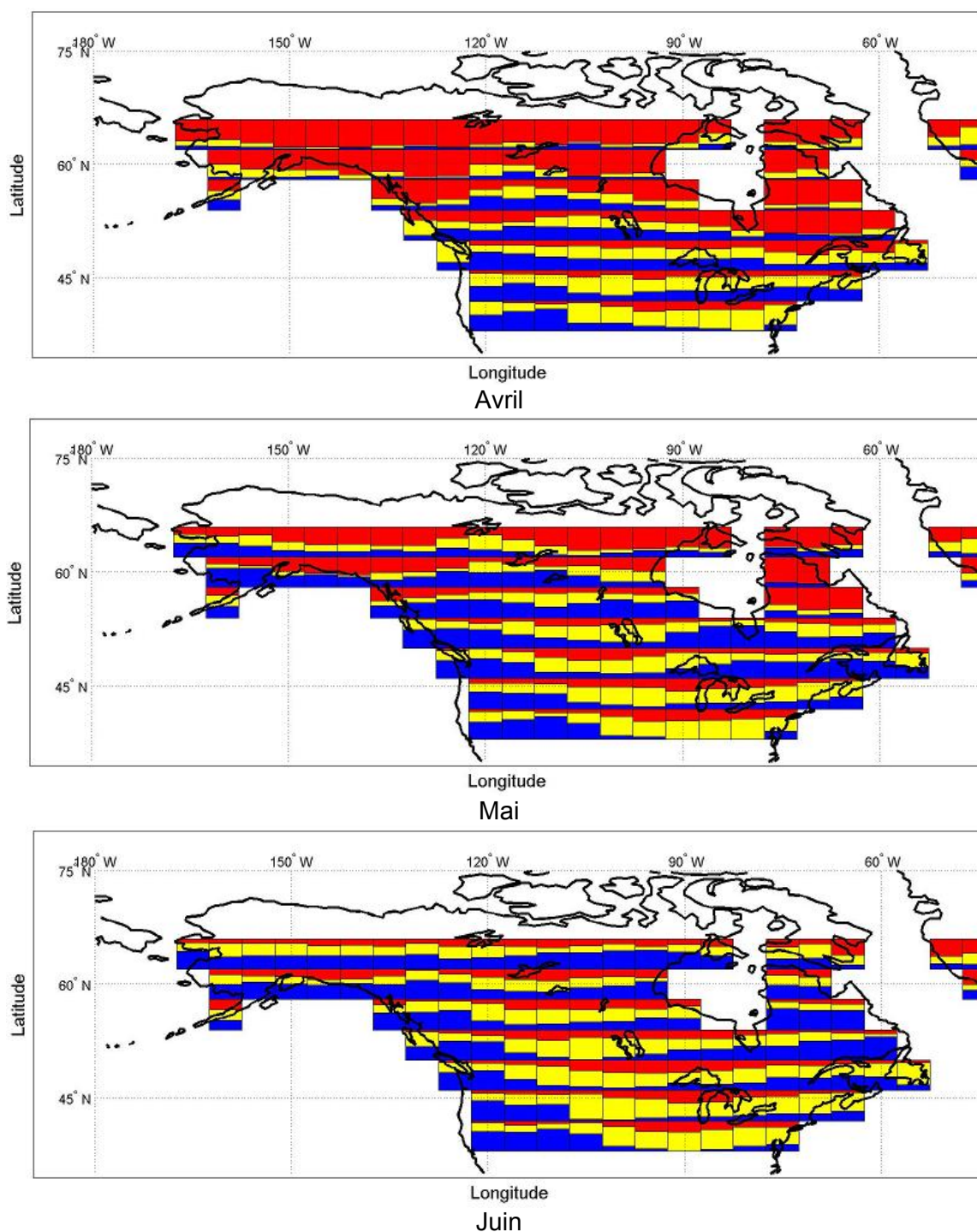


Figure D 2 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

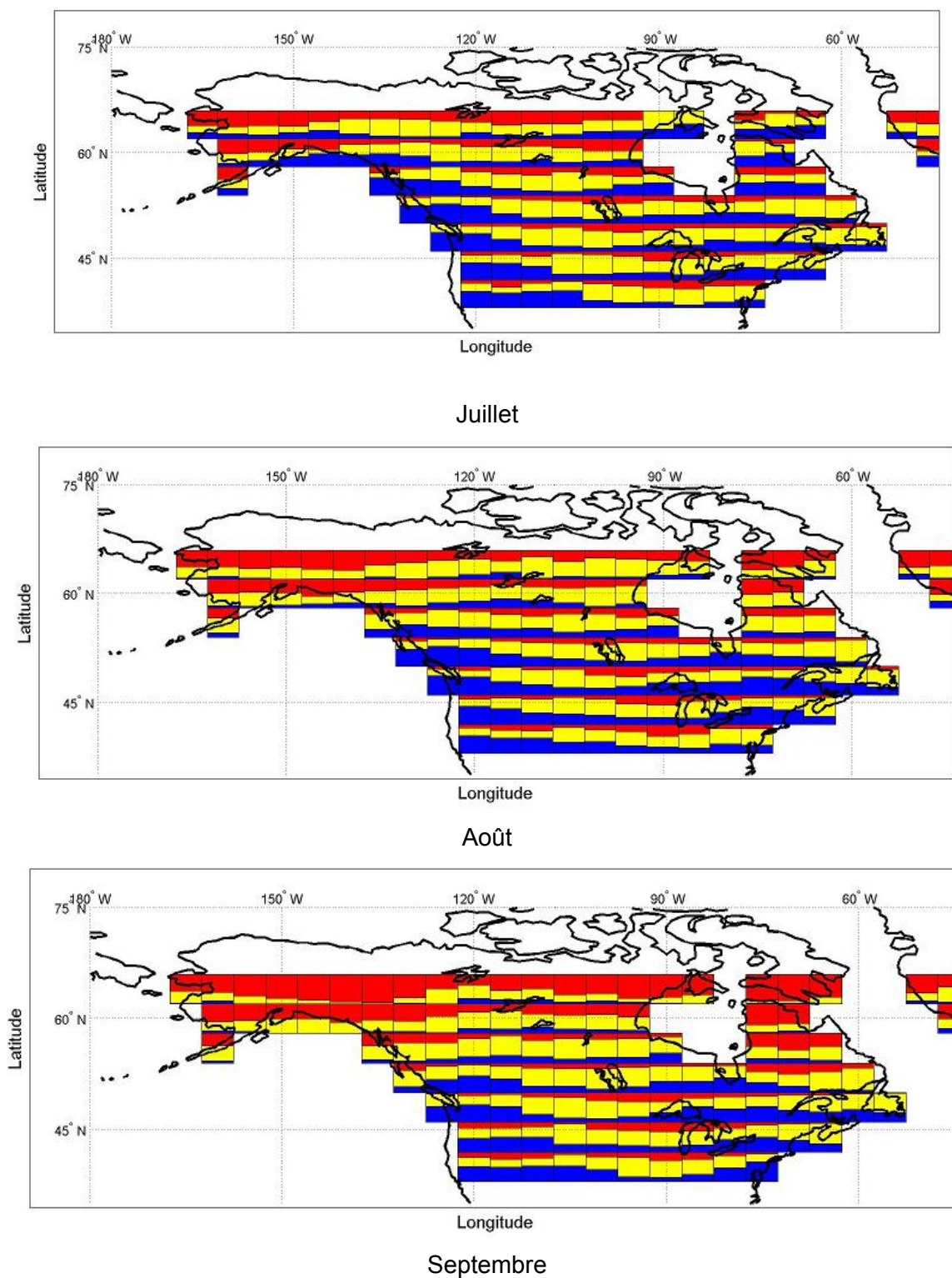


Figure D 3 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

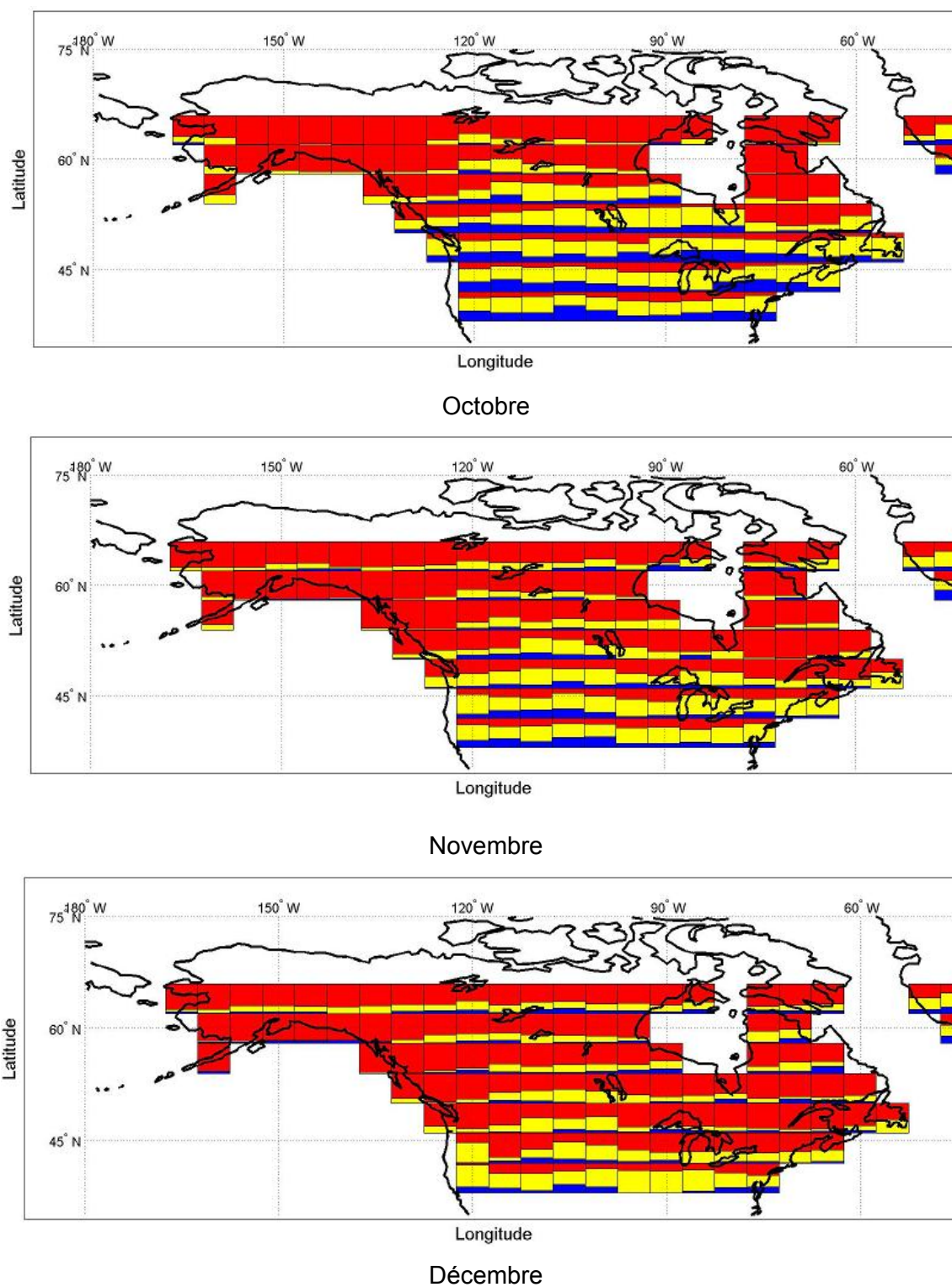


Figure D 4 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

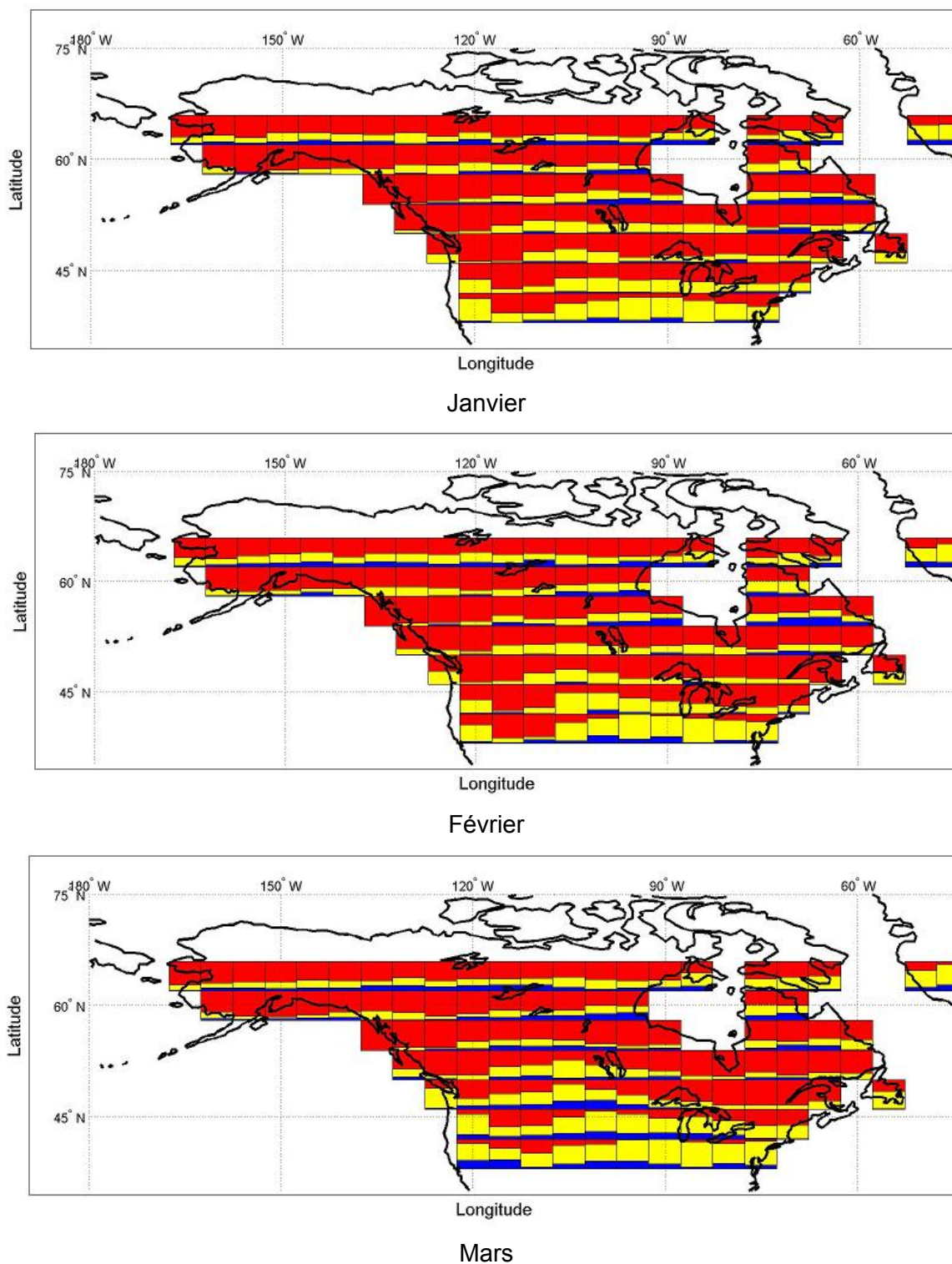


Figure D 5 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (janvier, février et mars) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

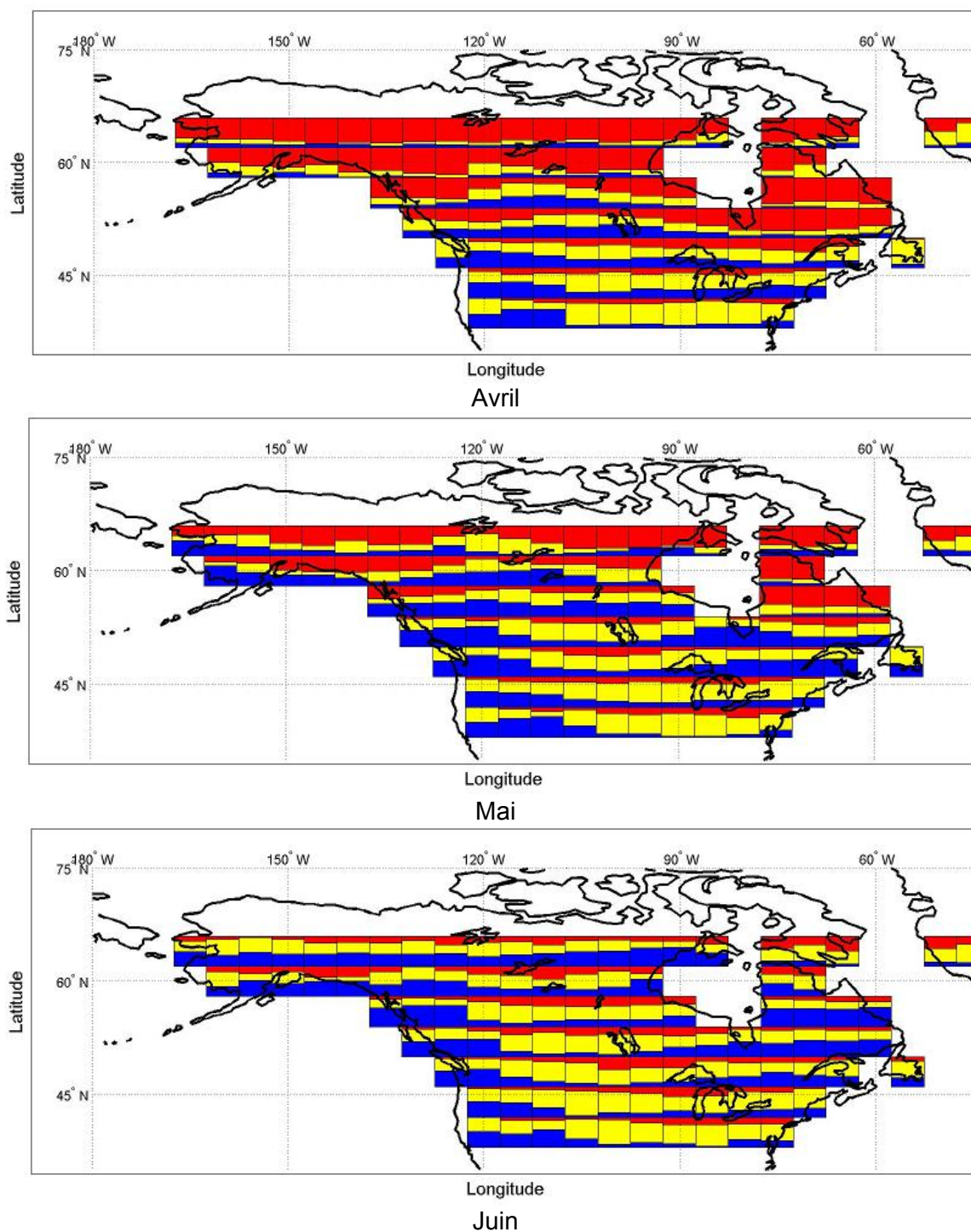


Figure D 6 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (avril, mai et juin) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

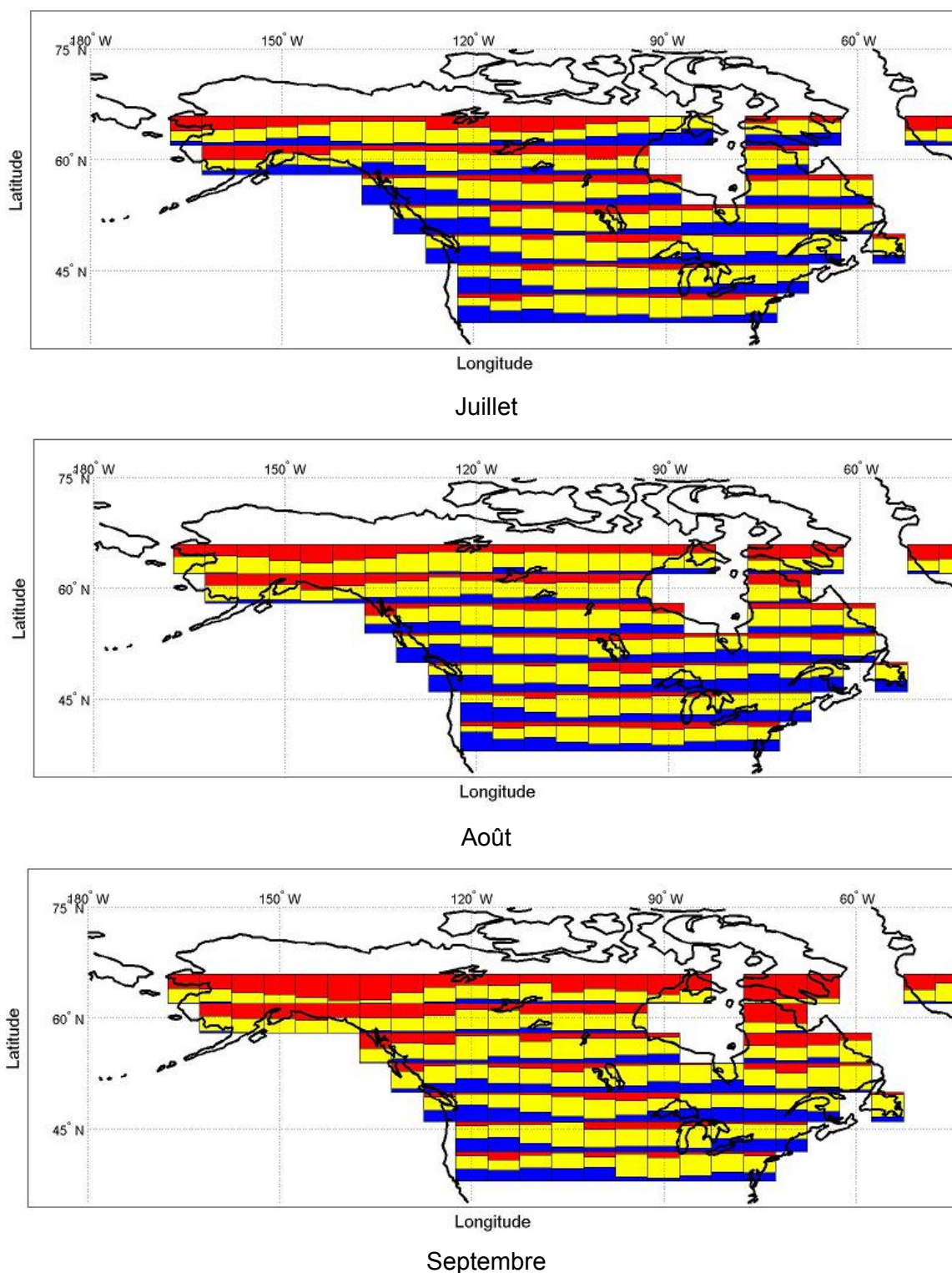
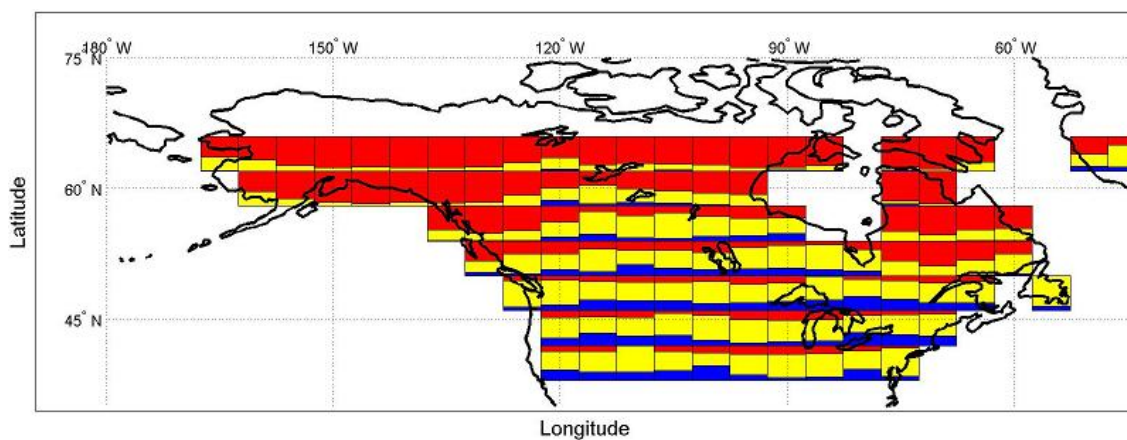
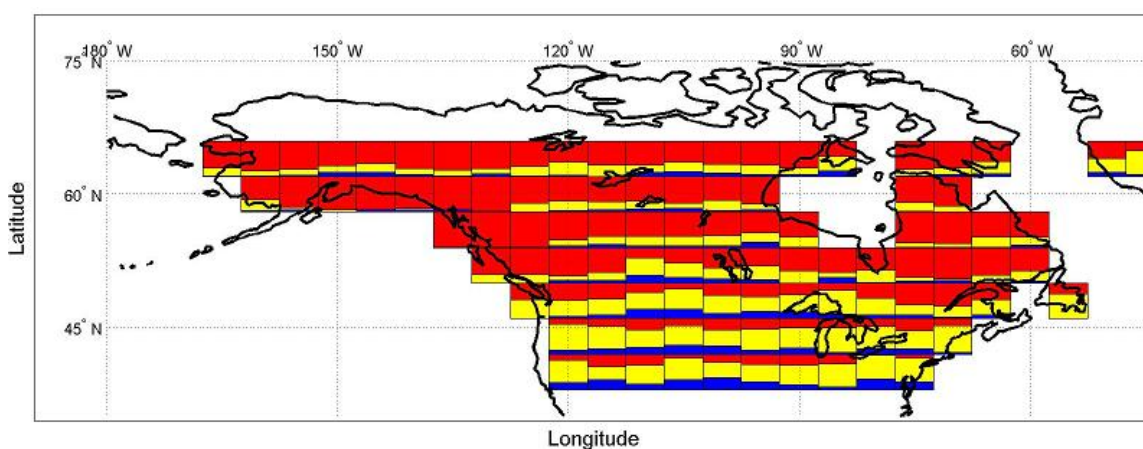


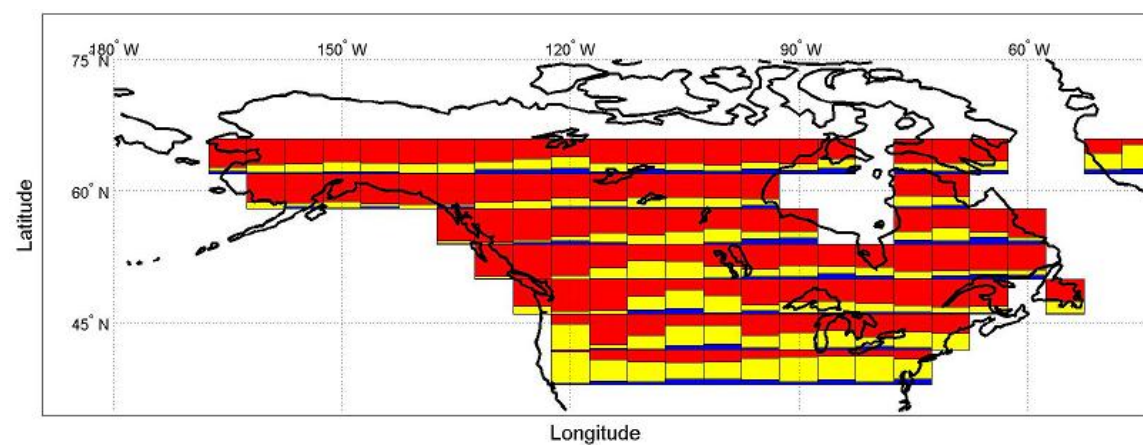
Figure D 7 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (juillet, août et septembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)



Octobre



Novembre



Décembre

Figure D 8 Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels (octobre, novembre et décembre) sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

Annexe E - Écoulements mensuels – variations moyennes sur la période 1900-2100 - scénarios A1B et B1

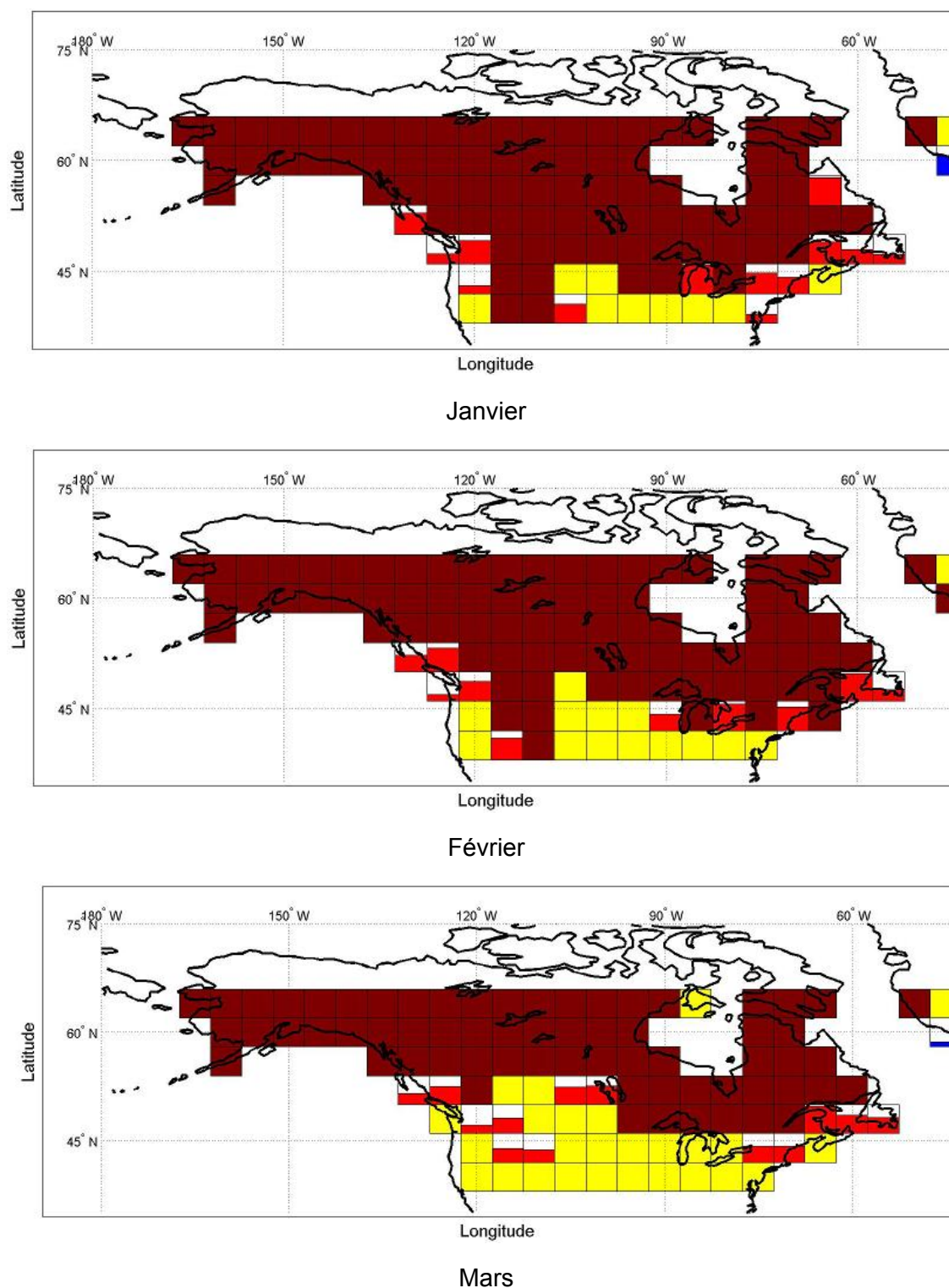


Figure E 1 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES A1B)

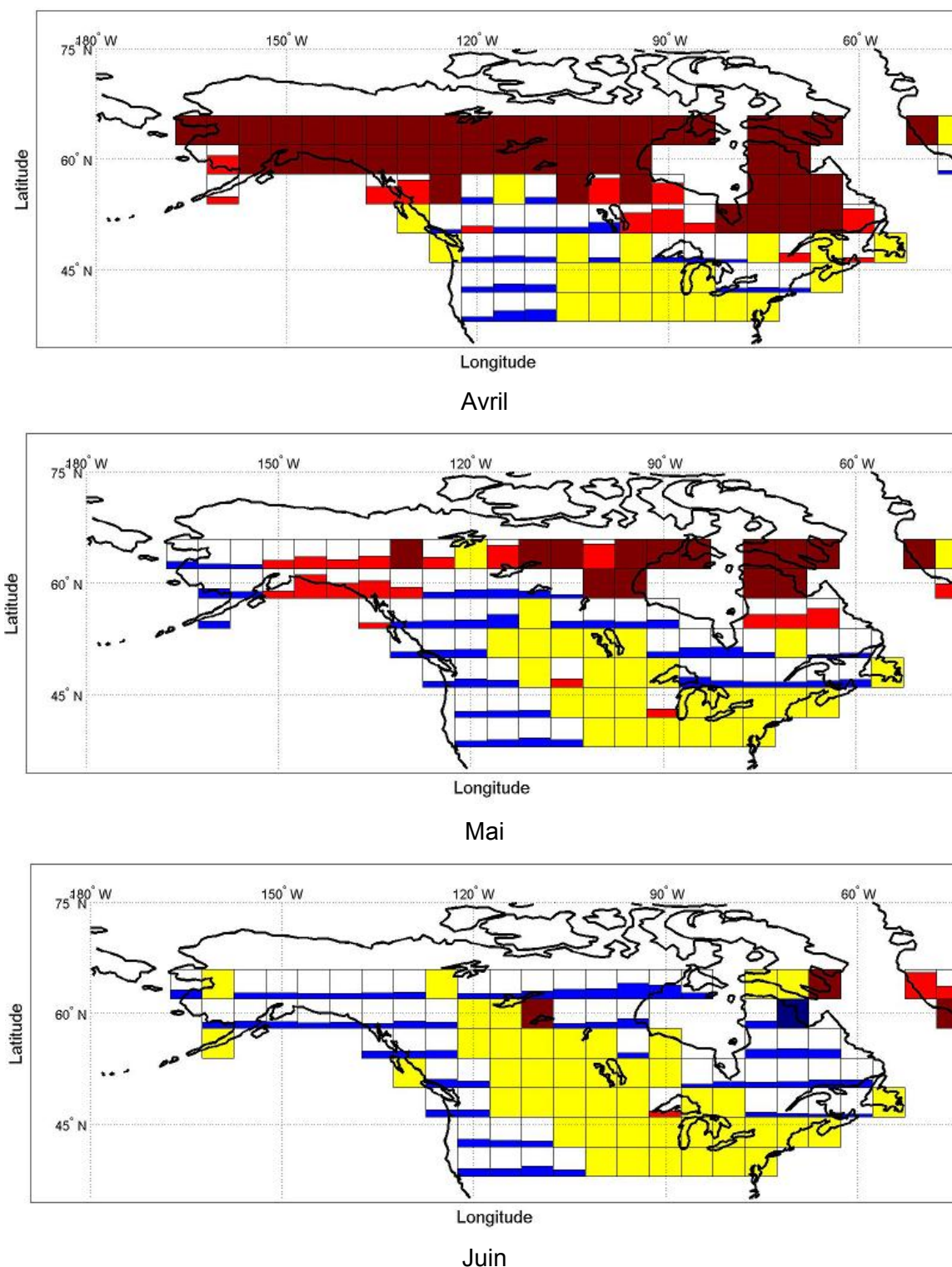


Figure E 2 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES A1B)

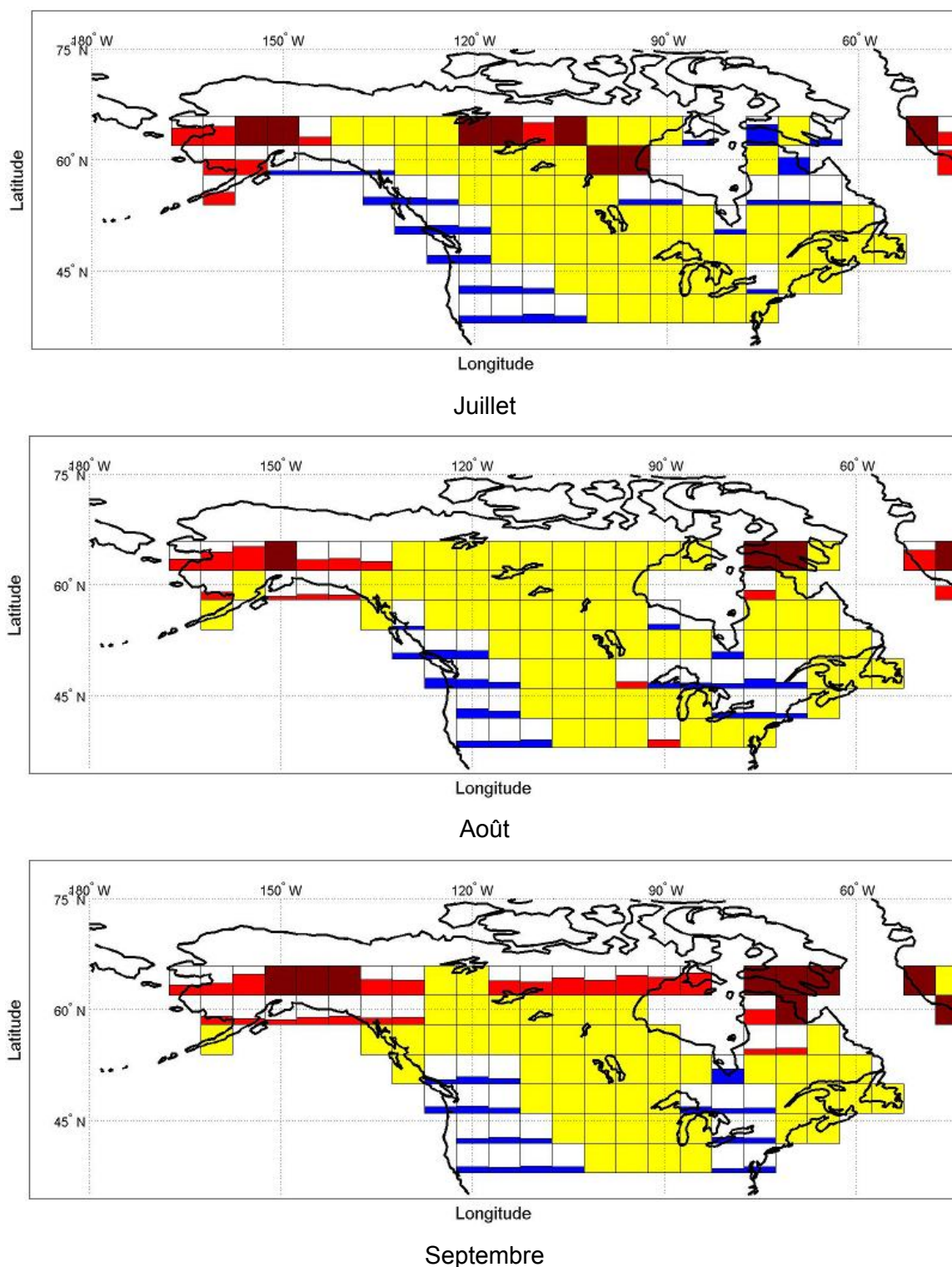


Figure E 3 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES A1B)

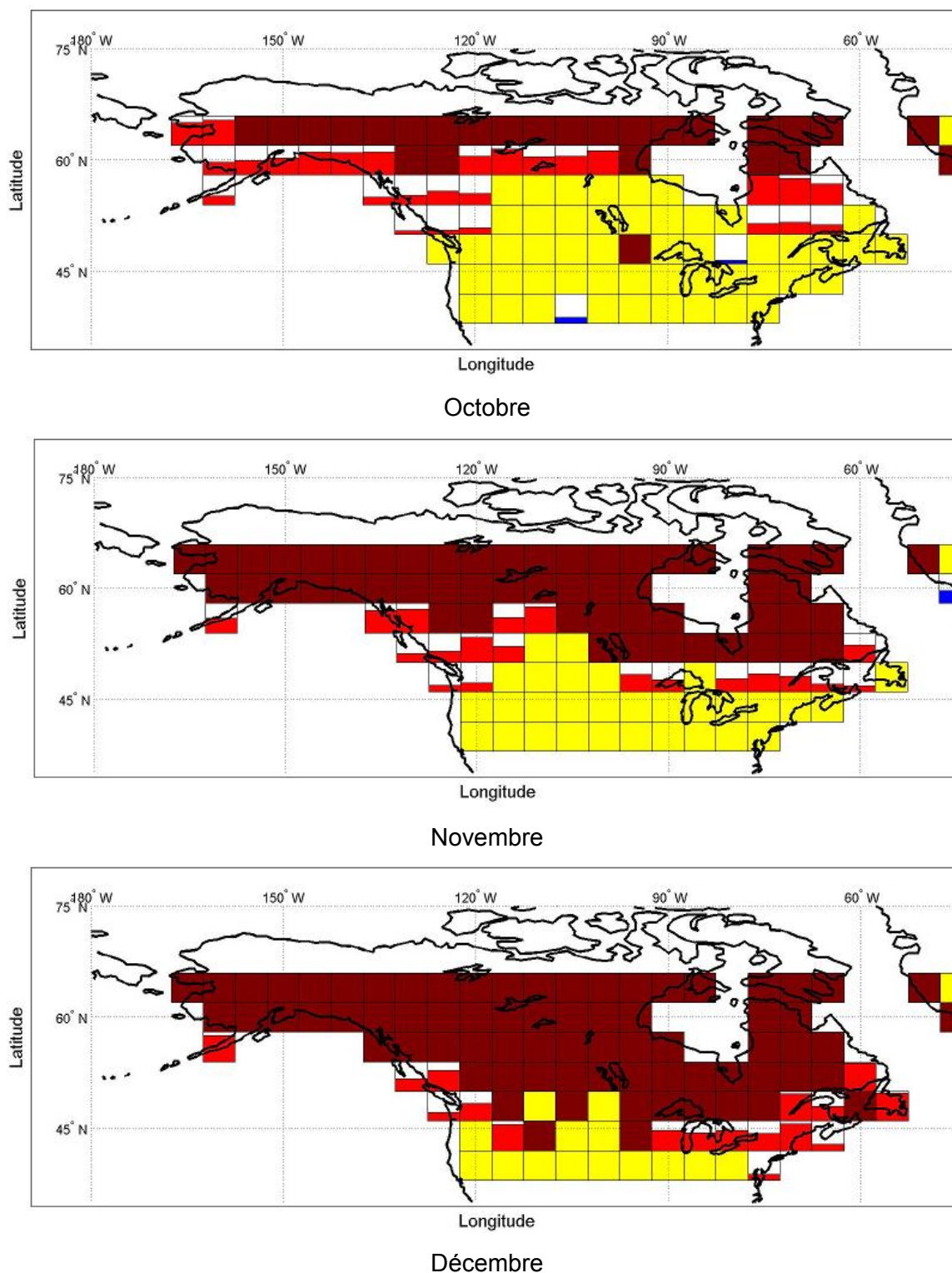


Figure E 4 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES A1B)

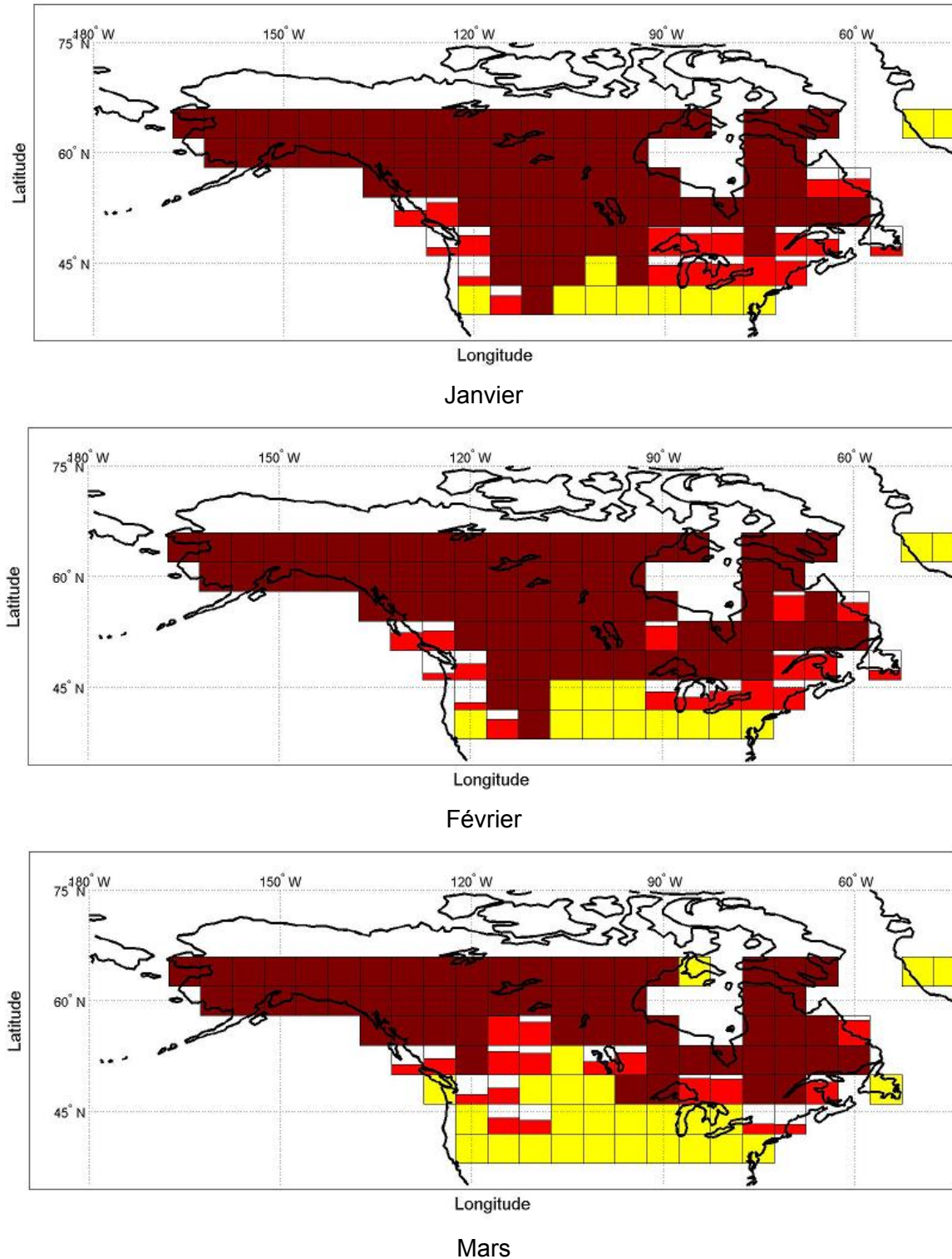


Figure E 5 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (janvier, février et mars; scénario de GES B1)

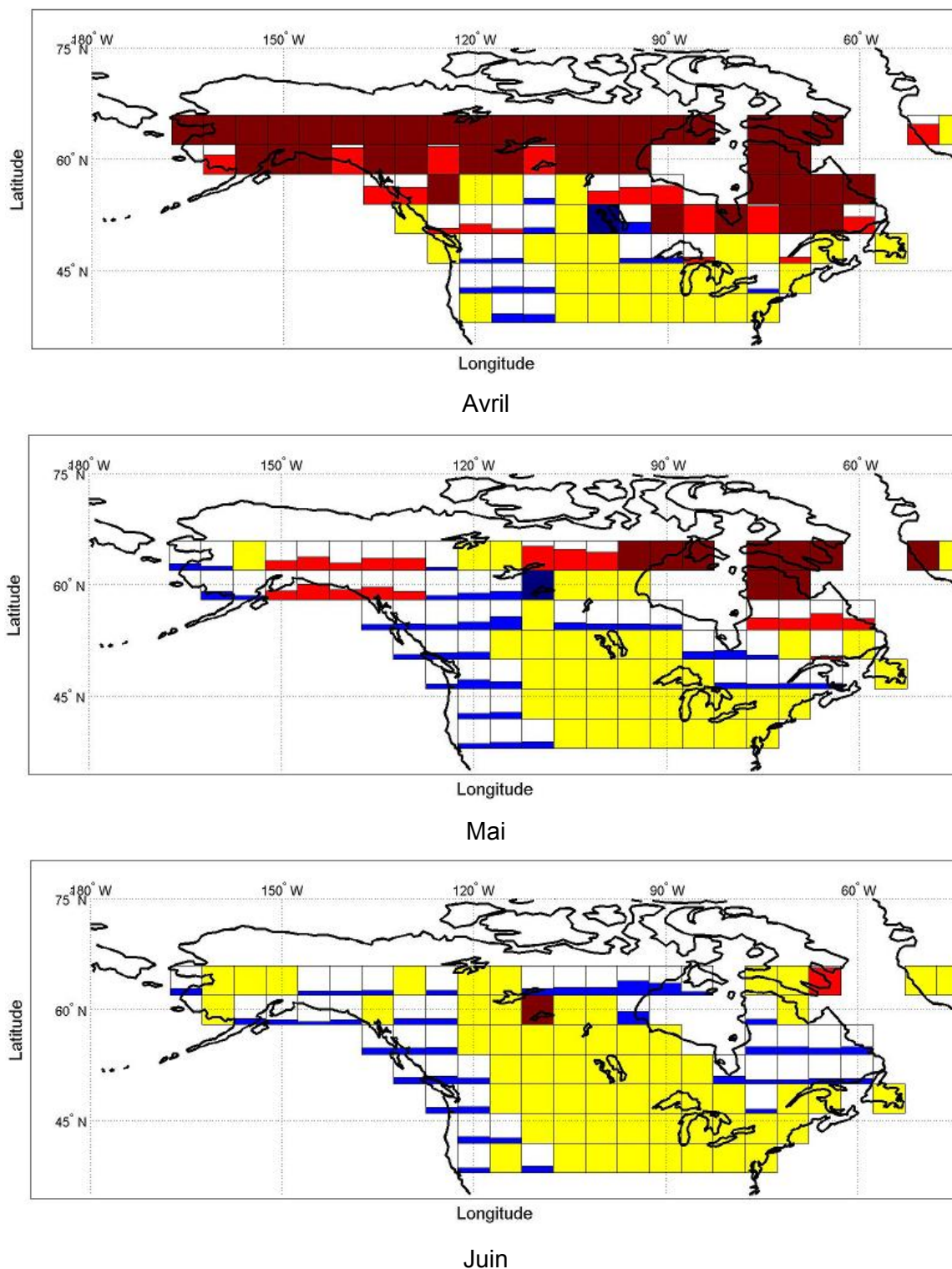


Figure E 6 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (avril, mai et juin; scénario de GES B1)

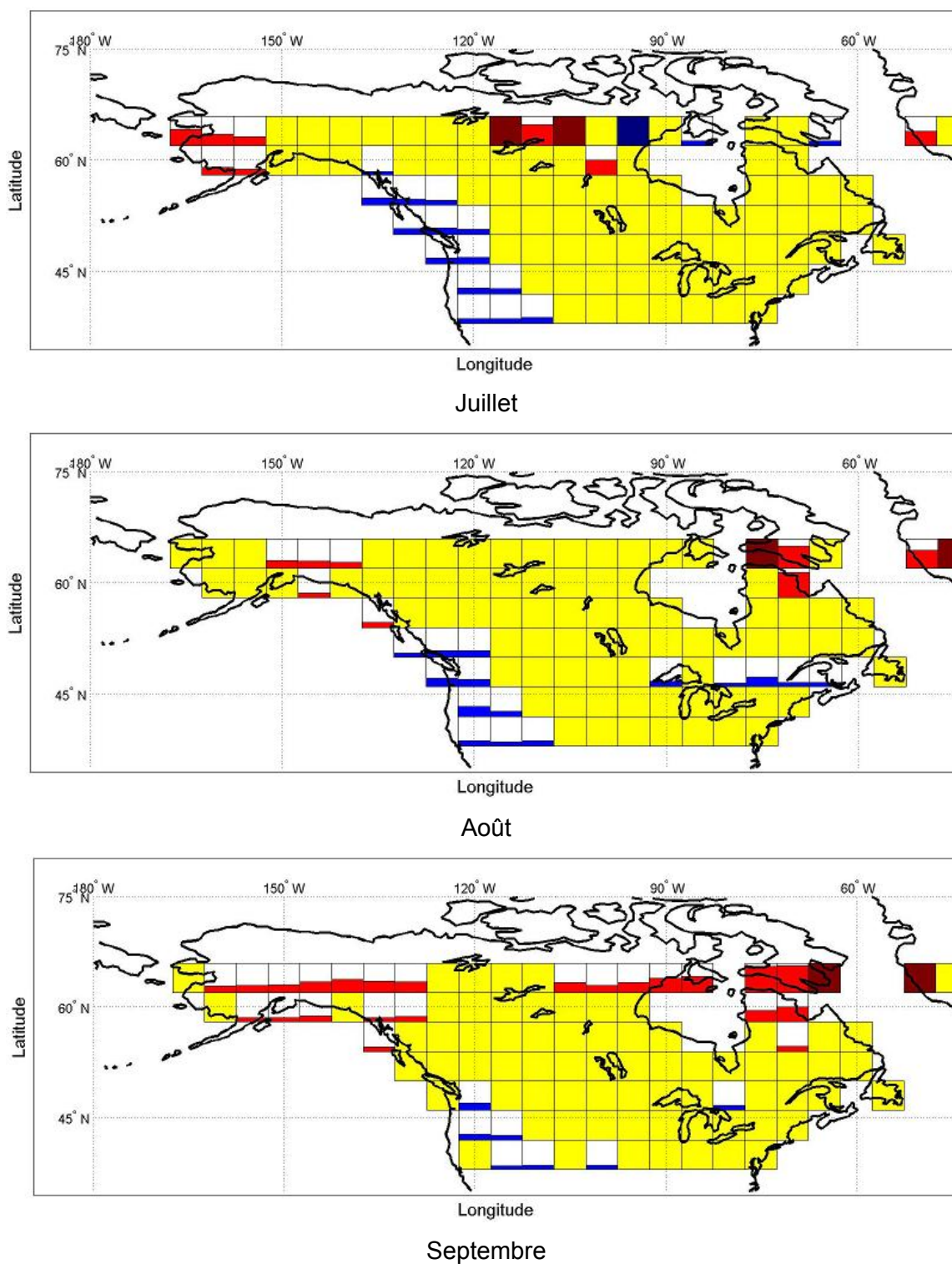


Figure E 7 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (juillet, août et septembre; scénario de GES B1)

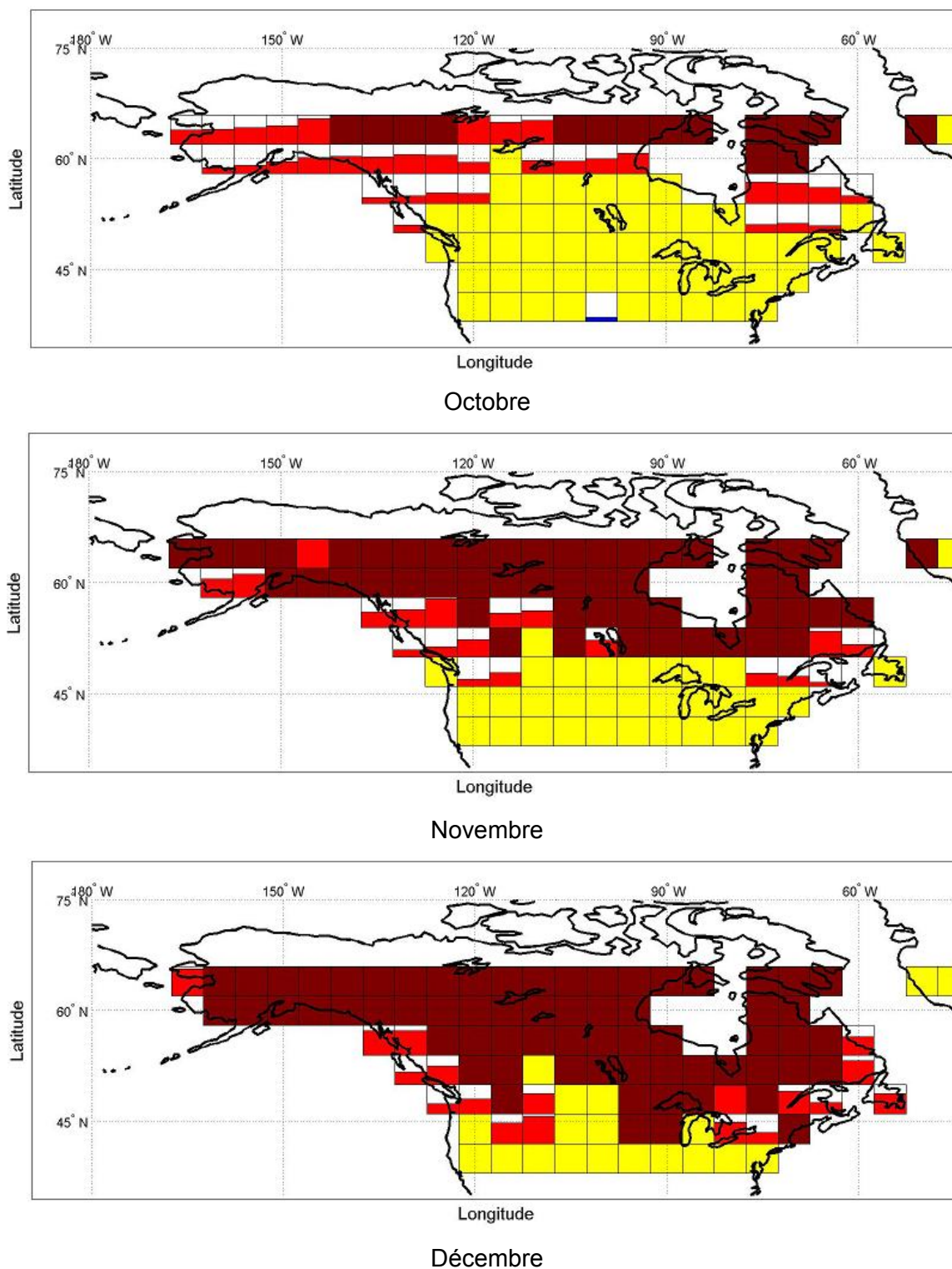


Figure E 8 Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (octobre, novembre et décembre; scénario de GES B1)