Université du Québec
INRS-ETE

Analyse des tendances futures pour les précipitations et les écoulements au Canada et la partie nord des États-Unis

Par
Guillaume Talbot

Mémoire
présenté pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M. Sc.)

Jury d'évaluation

Examinateur externe :	Anne Frigon, Ouranos
Examinateur interne :	Karem Chokmani, INRS-ETE
Directeur de recherche :	Alain Mailhot, INRS-ETE
Co-directeur de recherche :	Sophie Duchesne, INRS-ETE

© Droits réservés de Guillaume Talbot, 2009

RÉSUMÉ

Dans un contexte de changements climatiques, des tendances à la hausse pour les températures risquent d'avoir une influence sur les précipitations et les volumes d'eau disponibles à la consommation en modifiant la quantité d'énergie impliquée dans le cycle de l'eau. Dans le but d'évaluer les impacts possibles des changements climatiques sur les réserves d'eau du Canada et du nord des États-Unis, les données provenant de 23 modèles de circulation générale (MCG) ont été utilisées afin de vérifier si des tendances dans les précipitations et les écoulements risquent d'apparaître sur la période 1900-2100. Sur les séries de données mensuelles, des tests de Mann-Kendall et des calages de tendance ont été appliqués afin de vérifier si les changements étaient significatifs ou non, et d'évaluer leur amplitude. Les résultats pour les précipitations indiquent une forte cohérence entre les modèles pour prédire une hausse durant l'hiver sur l'ensemble du territoire, mais particulièrement dans le Nord canadien. Des tendances à la baisse pourraient également apparaître sur la côte ouest, durant la saison estivale. Du côté des écoulements, on prévoit des hausses en hiver et des diminutions en été, et ce, pour l'ensemble du territoire. La région des Prairies ne devrait toutefois pas être affectée pour les écoulements, ni en hiver, ni en été. Par ailleurs, il semble que le forçage anthropique détermine les tendances futures, puisqu'une plus forte probabilité d'observer des changements est observée lorsque des scénarios de gaz à effet de serre pessimistes, tels que le A2, sont utilisés. Enfin, une comparaison des données des MCG avec les historiques d'Environnement Canada a été effectuée pour les précipitations sur la période 1900-2007. Elle a montré que tous les MCG sous-estiment systématiquement les tendances observées à partir des historiques. Cela peut indiquer que les capacités des modèles à reproduire les tendances historiques sont limitées, voire insuffisantes, et que les tendances futures pourraient être elles aussi sous-estimées.

REMERCIEMENTS

Tout au long de ce projet, différentes personnes ont contribué directement ou indirectement à son aboutissement et je voudrais en profiter pour les remercier en guise de préambule.

Tout d'abord, un merci spécial à M. Alain Mailhot qui m'a donné ma première vraie chance en science et qui m'a permis de développer plusieurs habiletés qui, je le crois, me serviront encore longtemps. Je me considère chanceux d'avoir eu un directeur de maîtrise et un mentor tel que lui. Merci également à ma codirectrice, Sophie Duchesne, dont la patience et la bonne humeur inébranlables, conjuguées à ses talents de chercheure, ont permis à ce projet de se dérouler de façon agréable.

À l'INRS-ETE, merci à Audrey Groleau, Patrick Gagnon et David Huard pour leur aide technique. Merci également à Diane Tremblay pour son aide à la mise en page.

Par ailleurs, merci aux correcteurs, Karem Chokmani et Anne Frigon, pour leurs commentaires pertinents, qui ont permis d'améliorer considérablement la valeur de ce document.

Je voudrais remercier aussi Diane Chaumont, du consortium Ouranos, qui a travaillé dur pour extraire et m'acheminer les données des MCG, en plus d'avoir grandement amélioré la qualité du projet en nous suggérant de travailler avec un grand nombre de modèles. Merci pareillement à M. Louis Lefaivre pour son expertise et M. Xuebin Zhang qui nous a gracieusement fourni les données de précipitations historiques canadiennes.

Merci à ma famille et à mes amis pour leur soutien constant depuis toujours et qui m'ont permis de me rendre où je suis. Merci enfin à ma conjointe, qui est une des plus belles gratifications que j'aie reçues au cours de cette maîtrise (en plus de me faire réaliser la chance que j'ai de travailler devant un ordinateur plutôt qu'avec de l'eau usée).

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION **1**

2. REVUE DE LITTÉRATURE **5**

2.1 Tendances historiques pour les précipitations **5**
2.1.1 Étude d'Akinremi *et al.* (1999) 5
2.1.2 Études de Zhang *et al.* (2000 et 2001) 6
2.1.3 Étude de Vincent et Mekis (2006) 7

2.2 Les modèles de circulation générale (MCG) **7**
2.2.1 Historique et fonctionnement général 8
2.2.2 Scénarios de Gaz à Effet de Serre (GES) 10
2.2.3 Variabilité interne des modèles 12
2.2.4 Validation des MCG pour les précipitations 13
2.2.5 Limites des écoulements pour les MCG 13
2.2.6 Variabilité intermodèle et analyse multimodèle 14
2.2.7 Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) 15
2.2.8 Études utilisant des approches multimodèles 16

3. MÉTHODOLOGIE **25**

3.1 Résultats des MCG **25**

3.2 Identifiants des simulations **27**

3.3 Analyse multimodèle **29**

3.4 Grille de référence et construction des séries **29**

3.5 Analyse des tendances **32**

3.6 Estimation des écarts présent-futur **32**

3.7 Comparaison avec les données historiques **33**

3.8 Combinaison des résultats des différents modèles **38**

3.9 Analyse du forçage anthropique **39**

4. RÉSULTATS **43**

4.1 Comparaison entre les données historiques et les MCG **43**

4.2 Tendances sur les précipitations **52**
4.2.1 Probabilité d'obtenir des tendances 53
4.2.2 Écarts moyens pour la période 1900-2100 55
4.2.3 Influence du forçage anthropique 57

4.3 Tendances sur les écoulements 61
4.3.1 Probabilité d'apparition des tendances.....61
4.3.2 Écarts moyens pour la période 1900-2100.....63
4.3.3 Influence du forçage anthropique 65

5. DISCUSSION ET CONCLUSION.....69

6. BIBLIOGRAPHIE.....77

Annexe A : Méthode de combinaison des séries et des résultats 83

Annexe B : Précipitations mensuelles – tendances – scénarios A1B et B1..... 87

Annexe C : Précipitations mensuelles – variations moyennes sur la période 1900-2100 - scénarios A1B et B1 89

Annexe D : Écoulements mensuels – tendances – scénarios A1B et B1 91

Annexe E : Écoulements mensuels – variations moyennes sur la période 1900-2100 - scénarios A1B et B1 93

Annexe F : Comparaison des résultats entre les tendances historiques et les tendances simulées par les MCG sur la période 1900-2007 - scénarios A1B et B1..... 95

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Schéma présentant les phénomènes de base impliqués dans les MCG (inspiré de NOAA, 2008) 9

Figure 2.2 : Évolution des modèles climatiques 10

Figure 2.3 : Émissions de CO_2 (a) et concentration atmosphérique de CO_2 (b) en fonction des années, pour les trois scénarios de GES 12

Figure 3.1 : Territoire couvert par la présente étude 27

Figure 3.2 : Identifiant d'une série de données 28

Figure 3.3 : Exemple d'une série de pluies mensuelles 28

Figure 3.4 : Grille de référence 30

Figure 3.5 : Exemple d'application de la méthode d'agrégation des séries. Les tuiles carrées en trait mince 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 31

Figure 3.6 : Exemple de résultats lors de la comparaison des MCG et des données historiques 37

Figure 3.7 : Différentes régions du graphique des ratios $u_1 = p_{B1}/p_{A2}$ et $u_2 = p_{A1B}/p_{A2}$ 41

Figure 4.1 : Probabilité de tendances positive, négative ou d'une absence de tendance pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2007 pour le scénario de GES A2 45

Figure 4.2 : Pourcentage d'efficacité de chaque MCG à reproduire les tendances des données historiques, tous mois et tous scénarios de GES confondus 49

Figure 4.3 : Probabilité de tendances positiv, négative ou d'une absence de tendance pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 54

Figure 4.4 : 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 (scénario de GES A2). 56

Figure 4.5 : Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les précipitations mensuelles pour les scénarios A1B et A2 et les scénarios B1 et A2 pour les mois de janvier à juin 59

Figure 4.6 : Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les précipitations mensuelles pour les scénarios A1B et A2 et les scénarios B1 et A2 pour les mois de juillet à décembre 60

Figure 4.7 : Probabilité de tendances positive, négative ou d'une absence de tendance pour les écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 62

Figure 4.8 : 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 (scénario de GES A2). 64

Figure 4.9 : Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les écoulements mensuels pour les scénarios A1B et A2 et les scénarios B1 et A2 pour les mois de janvier à juin 66

Figure 4.10 : Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les écoulements mensuels pour les scénarios A1B et A2 et les scénarios B1 et A2 pour les mois de juillet à décembre 67

Figure B-1 : Probabilité de tendances positive, négative ou d'une absence de tendance pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B 87

Figure B-2 : Probabilité de tendances positive, négative ou d'une absence de tendance pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 88

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 (scénario de GES A1B) 89

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 (scénario de GES B1) 90

Figure D-1: Probabilité de tendances positive, négative ou d'une absence de tendance pour les écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B 91

Figure D-2 : Probabilité de tendances positive, négative ou d'une absence de tendance pour les écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 92

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 (scénario de GES A1B) 93

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 (scénario de GES B1) 94

Figure F-1 : Probabilité de tendances positive, négative ou d'une absence de tendance pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2007 pour le scénario de GES A1B 95

Figure F-2 : Probabilité de tendances positive, négative ou d'une absence de tendance pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2007 pour le scénario de GES B1 96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Résumé des résultats de Zhang *et al.* (2000) 6

Tableau 3.1 : Liste des simulations utilisées pour l'élaboration des projections climatiques 26

Tableau 3.2 : Matrice de confusion 35

Tableau 3.3 : Exemple de matrice de confusion 38

Tableau 4.1 : Matrice de confusion entre les données historiques et chacun des modèles pour les précipitations mensuelles, sur la période 1900-2007, tous mois et tous scénarios de GES confondus. 46

Tableau 4.2 : Pourcentage d'efficacité de chaque MCG à reproduire les tendances des données historiques de précipitations, tous mois et tous scénarios de GES confondus, en considérant séparément les tuiles des données historiques présentant des tendances positives, négatives ou non significatives. 50

Tableau 4.3 : Répartition des tuiles pour chaque modèle selon qu'elles présentent une tendance positive, négative ou non significative sur les données de précipitations mensuelles, tous mois et tous scénarios de GES confondus 51

Tableau 4.4 : Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A2}$, $p_{B1} > p_{A1B}$ ou $p_{A1B} > p_{A2}$ pour les séries des précipitations 58

Tableau 4.5 : Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A2}$, $p_{B1} > p_{A1B}$ ou $p_{A1B} > p_{A2}$ pour les séries des écoulements 65

1. Introduction

Au niveau environnemental, l'un des enjeux soulevant le plus de polémiques en ce début de XXIe siècle est la désormais célèbre question des changements climatiques (CC). Dans un premier temps, de nombreux chercheurs et organismes scientifiques se sont penchés sur le phénomène afin de savoir si celui-ci est un simple aléa du climat terrestre ou si, au contraire, il constitue une conséquence de l'activité humaine. Le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) conclut toutefois que la responsabilité humaine est « sans équivoque », se basant sur la corrélation entre la croissance des concentrations de gaz à effet de serre (GES) et différentes observations à long terme telles que l'augmentation de la température moyenne, la hausse du niveau de la mer, le retrait des glaciers et plusieurs autres observations (GIEC, 2007a). D'autres études, telles que celle de Zhang *et al.* (2007), ont étayé cette affirmation en montrant que les activités anthropiques avaient eu une influence sur la variation des précipitations à l'échelle mondiale, au cours du XXe siècle.

Une fois la question de l'existence des CC établie, l'étape suivante consiste à estimer leurs impacts futurs afin de s'y adapter, le cas échéant. Bien que l'extrapolation à partir des séries historiques représente une solution potentielle pour les prédictions à court terme, les modèles climatiques produits par différents groupes de recherche dans le monde constituent actuellement la seule option disponible pour avoir un aperçu de ce que nous réserve le futur. Pour simuler le climat à une échelle planétaire, on utilise ce qu'on appelle les modèles de circulation générale (MCG), qui permettent de tenir compte des principaux phénomènes climatiques terrestres. Toutefois, la science de la modélisation climatique est encore relativement jeune et différentes incertitudes doivent être prises en considération lorsque les résultats de simulations des MCG sont analysés. Les principales sources d'incertitudes sont associées aux estimations des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le futur, aux représentations imparfaites et incomplètes des processus climatiques au sein des modèles, et enfin à la variabilité naturelle du climat (voir section 2.2). Bref, on doit donc considérer que les valeurs avancées par les modèles sont entachées d'incertitude, et il faut impérativement garder ce fait en mémoire.

Parmi les variables climatiques simulées par les modèles, l'une des plus pertinentes du point de vue humain, outre la température, est la quantité de précipitations. En effet, l'importance de l'eau dans nos sociétés n'est plus à démontrer, ce qui fait qu'un manque, ou même une surabondance, peut être catastrophique. Ainsi, une pénurie prolongée aura des effets sur la qualité et la quantité d'eau potable disponible pour les habitants, mais également des impacts reliés aux pertes en hydroélectricité ou dans le domaine de l'agriculture. À l'inverse, des inondations peuvent également causer des dommages importants aux niveaux humain, économique ou matériel. Or, il se trouve que la quantité de précipitations futures sera fortement influencée par les changements climatiques. En effet, une hausse de la température moyenne devrait avoir pour effet d'augmenter la quantité d'énergie impliquée dans le cycle de l'eau (Held et Soden, 2000) et donc, en principe, d'augmenter le volume des précipitations. La répartition spatiale des précipitations risque aussi de changer. De même, l'évapotranspiration pourra être modifiée suite à une hausse des températures et avoir un impact sur la disponibilité de la ressource.

Pour estimer l'évolution de toutes ces interactions et de leur impact sur la ressource eau, différentes études ont analysé les résultats d'un ou de quelques MCG. Par exemple, Roy *et al.* (2001) ont utilisé les résultats du MCG canadien pour analyser les variations saisonnières de débit sur la rivière Châteauguay. Dans le même domaine, Wilby et Harris (2006) ont utilisé quatre MCG afin d'étudier les étiages sur le bassin de la Tamise, en Grande-Bretagne. Bien que ce type d'étude était très pertinent au moment de leur réalisation, en raison du nombre limité de modèles et de simulations alors disponibles, plusieurs auteurs, dont Hagedorn *et al.* (2005), Tebaldi *et al.* (2005), Zhang *et al.* (2007) et Sheffield et Wood (2007), ont depuis montré l'utilité d'utiliser plusieurs modèles. En effet, tel que mentionné plus haut, les modèles sont sujets aux incertitudes et le choix d'un modèle en particulier plutôt qu'un autre donnera des résultats forts différents vu la complexité des phénomènes impliqués. Il est donc de plus en plus reconnu que le fait d'utiliser plusieurs modèles permet de compenser l'erreur reliée au choix d'un seul modèle, de tenir compte de la variabilité intermodèle et de donner une réponse « moyenne » plausible. Plus de détails seront donnés à ce sujet à la section 2.2.6.

Dans le cadre de ce mémoire, l'objectif principal a été d'analyser les impacts futurs des CC sur les volumes d'eau disponibles au Canada, en Alaska et au nord des États-Unis. Afin de tenir compte des incertitudes reliées à la modélisation climatique mentionnées précédemment, 23 MCG provenant de différents centres de recherche dans le monde (voir section 3.1) ont été utilisés. La variable climatique analysée en premier lieu est la précipitation, étant considérée comme la variable clé du cycle de l'eau pour les régions situées dans les latitudes élevées (Cunderlink et Simonovic, 2005; Arnell, 1999; Pal *et al.,* 2004). Dans un deuxième temps, l'écoulement (volume d'eau résultant) directement simulé par les MCG est analysé afin de tenir compte des autres processus ayant un impact sur le volume d'eau disponible (évaporation, couvert de neige, eau dans le sol, etc.).

Il est important de préciser que l'aptitude des MCG à simuler les écoulements a fréquemment été remise en question (Thomas et Henderson-Sellers, 1990; Sushama *et al.,* 2004; Sushama *et al.,* 2006; Graham *et al.,* 2007). En effet, le cycle hydrologique est représenté très différemment d'un MCG à l'autre et, de plus, les échelles spatiales et temporelles des MCG ne sont pas nécessairement assez fines pour représenter adéquatement les phénomènes impliqués dans le processus d'écoulement. La variable « écoulement » a tout de même été étudiée dans ce mémoire, bien que l'analyse des résultats obtenus pour cette variable doit toujours tenir compte des limites mentionnées précédemment.

Pour les précipitations comme pour les écoulements, l'échelle temporelle utilisée est mensuelle. Les deux principales raisons de ce choix sont qu'un plus grand nombre de modèles sont disponibles pour cette échelle et qu'il est possible d'obtenir des séries temporelles continues s'étendant de 1900 à 2100, soit sur plus de 200 ans, ce qui est beaucoup plus long que les séries de données journalières accessibles actuellement. Le premier argument permet de tenir compte de la variabilité intermodèle citée précédemment (voir section 2.2.6 pour plus de détails). En ce qui concerne les séries continues, on observe fréquemment dans la littérature l'utilisation de séries tronquées (ex. : 1960-2000, puis 2045-2065) lors d'analyses d'impacts en climat futur. Or, le fait d'utiliser des séries continues plus longues permet d'effectuer des analyses beaucoup plus robustes et de tenir compte des fluctuations pouvant survenir au cours des 200 ans considérés. Par ailleurs, nous n'avons pas analysé les tendances sur les totaux de

précipitations (ou d'écoulements) annuels, préférant nous concentrer sur la variabilité saisonnière du climat pour les latitudes considérées.

Un élément important dans le cadre de la présente étude est l'accent mis sur la différence entre les types de tendances, selon qu'elles soient statistiquement significatives ou non. On retrouve fréquemment dans la littérature des études utilisant plusieurs MCG et qui regroupent les modèles simplement en moyennant les écarts entre le présent et le futur et en négligeant la significativité de la tendance. Or, cette méthode a le désavantage de considérer sur un même pied les faibles tendances qui pourraient résulter du « hasard » (ou de la variabilité naturelle du climat) et les tendances plus prononcées causées par le forçage anthropique. Par souci de rigueur, les tendances, significatives ou non, de même que les cas positifs et négatifs, seront donc traités indépendamment dans le cadre de cette étude. La méthode appliquée permet également d'attribuer des probabilités à chacune des trois tendances possibles, soit les tendances positives significatives, négatives significatives et non significatives.

Par ailleurs, un autre objectif important de la présente étude est la comparaison des données de précipitations simulées par les MCG durant le dernier siècle (1900-2007) avec les données historiques fournies par Environnement Canada (voir Mekis et Hogg, 1999; Zhang *et al.*, 2000). L'intérêt de cette comparaison réside dans le fait qu'elle permet de quantifier la performance des MCG en climat présent et, par la même occasion, d'évaluer si les modèles sont aptes à reproduire les tendances observées. Cette aptitude à reproduire le climat passé, sans fournir une évaluation *stricto sensu* de la capacité des modèles à simuler le climat futur, est une étape obligée de tout processus visant à pondérer les performances relatives des différents MCG.

Le présent document est structuré comme suit. Dans un premier temps, le chapitre 2 présente un survol de certaines récentes études traitant des tendances climatiques pour le Canada et de l'usage des MCG dans l'analyse du climat. Par la suite, le chapitre 3 présente la méthodologie utilisée dans le cadre de ce projet. Enfin, les chapitres 4 et 5 portent respectivement sur les résultats obtenus, puis sur la discussion de ces résultats et la conclusion.

2. Revue de littérature

Le chapitre 2 présente un aperçu de différentes études pertinentes pour le présent travail. Dans un premier temps, la section 2.1 s'attarde aux études portant sur les tendances historiques de précipitations au Canada. Puis, la section 2.2 couvre l'utilisation des MCG pour l'analyse des tendances climatiques futures.

2.1 Tendances historiques pour les précipitations

Cette section donne un aperçu des changements qui ont été observés jusqu'à maintenant dans les précipitations, au Canada et au nord des États-Unis.

2.1.1 Étude d'Akinremi *et al.* (1999)

Cette étude porte sur la région des Prairies canadiennes et sur l'impact que peuvent avoir les changements climatiques sur différents indices de précipitations tels que la quantité totale annuelle, la répartition des intensités des événements pluvieux, le nombre d'événements pluvieux et le rapport pluie-neige. En se basant sur les données de 37 stations couvrant 75 ans, préalablement homogénéisées, l'étude tente de vérifier si des tendances significatives se dégagent des dernières décennies. Dans cette région où la culture des céréales est très développée, des modifications de pluviométrie pourraient avoir des conséquences néfastes. Les auteurs rapportent une augmentation significative du nombre d'événements pluvieux (particulièrement ceux de faible intensité) et, par la même occasion, une augmentation de la quantité totale de pluie annuelle. Toutefois, du côté de la neige, une diminution de la quantité de neige est observée, ce qui, selon les auteurs du présent mémoire, pourrait s'expliquer par le fait que le réchauffement climatique accroît la probabilité que la température dépasse le point de congélation de l'eau.

2.1.2 Études de Zhang *et al.* (2000 et 2001)

Vers la fin des années 90, Vincent et Gullett (1999) de même que Mekis et Hogg (1999) ont rendu disponible une banque de données regroupant les données homogénéisées d'un grand nombre de stations canadiennes, pour les températures et les précipitations (une version à jour de ces données de précipitations est d'ailleurs utilisée dans le cadre de ce mémoire; voir section 3.7). À partir de ces données, Zhang *et al.* (2000) ont effectué une analyse de tendances sur six indices de température et de précipitations pour l'ensemble du Canada, pour une période allant de 1900 à 1998 (sud du Canada) et de 1950 à 1998 (sud et nord du Canada). Il faut noter que les données comprises entre 1900 et 1950 étaient plutôt rares pour le Nord canadien. Les résultats de l'étude sont résumés au tableau 2.1 :

Tableau 2.1 : Résumé des résultats de Zhang *et al.* (2000)

Indices	Sud du Canada Période 1900-1998	Ensemble du Canada Période 1950-1998
Température maximale	Faible augmentation (<0,5 °C)	Augmentation dans l'ouest de 1,5 à 2 °C. Diminution de 1 °C dans le nord-est
Température minimale	Augmentation de 1 à 2,5 °C	Augmentation dans l'ouest de 1 à 2 °C. Diminution de 1,5 °C dans le nord-est
Température moyenne	Augmentation de 0,9 °C	Augmentation dans l'ouest de 1 à 2 °C. Diminution de 1 à 1,5 °C dans le nord-est
Écart minimum-maximum de température	Diminution de l'ordre de 0,5 à 2 °C	Faible augmentation (<0,5 °C)
Précipitation totale	Augmentation de 12 %	Augmentation de 5 à 35 %
Rapport neige/précipitations totales	Faible augmentation (<5 %) dans le sud. Diminution de 10 % dans le nord-est	Augmentation de 5 à 20 % dans le nord. Diminution de 5 à 10 % dans le sud-ouest

Zhang *et al.* (2001) se sont également intéressés aux écoulements en rivière pour la période 1947-1997 (ou 1957-1997 ou 1967-1997, selon les données disponibles), dans l'ensemble du Canada (243 stations). Parmi les conclusions les plus importantes de l'étude, on doit noter une augmentation significative des écoulements mensuels pour les mois de mars et avril, mais une diminution pour les mois d'été et d'automne, et ce, pour tout le Canada. On remarque aussi que la date de crue printanière apparaît plus tôt au fil des ans dans la grande majorité de la région traitée. Ce fait a également été observé par Hodgkins *et al.* (2005) dans la région du nord-est des États-Unis, près de la frontière canado-américaine. Un des effets négatifs de cette situation

est que, comme l'évacuation de l'eau de fonte se fait plus tôt dans l'année, la période de vulnérabilité aux sécheresses s'allonge.

2.1.3 Étude de Vincent et Mekis (2006)

Cette vaste étude parue en 2006 fait la somme de plusieurs indices journaliers d'extrêmes de températures et de précipitations pour l'ensemble du Canada. Les données utilisées proviennent des mêmes bases de données homogénéisées que celles utilisées par Zhang *et al.* (2000) et couvrent les périodes 1900-2003 (sud du Canada) et 1950-2003 (ensemble du Canada). Au niveau des précipitations qui nous intéressent plus particulièrement, dix indices ont été utilisés permettant une caractérisation en fonction du type de précipitations (neige ou pluie), de l'intensité et de la fréquence des événements extrêmes.

Les auteurs rapportent une augmentation générale du nombre de jours (par année) avec précipitations et avec pluie, mais également une diminution des moyennes de pluie et de précipitations journalières. Une diminution a également été constatée au niveau du nombre maximum de jours sans pluie, ce qui laisse présager des conditions défavorables à l'apparition de sécheresses estivales. Concernant la quantité de neige tombée, une augmentation significative a été constatée entre 1900 et 1970, suivie d'une diminution, probablement attribuable à la diminution du nombre de jours sous le point de congélation, selon les auteurs. Au niveau des extrêmes, aucune tendance significative n'a été observée, sauf pour le nombre de jours avec de fortes précipitations (supérieures au 95e centile) qui a augmenté.

2.2 Les modèles de circulation générale (MCG)

Les modèles climatiques constituent actuellement un outil incontournable dans l'estimation des impacts futurs des changements climatiques. Ces modèles ont fortement évolué au fil des ans, suivant entre autres la progression de notre connaissance du climat, mais également celle des capacités de l'informatique. Actuellement, le type de modèle le plus fréquemment utilisé est ce qu'on appelle les « Modèles Couplés Atmosphère-Océan de Circulation Générale », ou en anglais « Atmosphere-Ocean General Circulation Models » (AOGCM). Ils sont fréquemment

présentés dans la littérature sous l'acronyme MCG (ou en anglais GCM, pour « Global Circulation Model »), que l'on utilisera pour la suite de ce document. La section 2.2 présente un aperçu de leur origine, de leur mécanique et de leur usage en climatologie.

2.2.1 Historique et fonctionnement général

Le premier modèle climatique, où les interactions entre les océans, l'atmosphère et la terre sont considérées, a été développé au *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*, de l'Université de Princeton, New Jersey, vers la fin des années 60. Le principe de base à cette époque était sensiblement le même qu'aujourd'hui, c'est-à-dire que l'on utilisait un système d'équations différentielles basées sur les lois de la physique, de la mécanique des fluides et de la chimie. Ce système d'équations est par la suite résolu sur une grille tridimensionnelle représentant la Terre, afin d'obtenir une reproduction vraisemblable du climat (voir la figure 2.1 pour une représentation sommaire du fonctionnement des MCG). Chaque élément de cette grille est appelé « tuile » et correspond à une région de la planète qui est approximée comme homogène du point de vue des caractéristiques physiques. Toutefois, les capacités informatiques de l'époque étaient beaucoup moins développées qu'aujourd'hui; l'ordinateur utilisé était un Univac 1108, possédant une mémoire d'une capacité de 500 kilobits. Par conséquent, seulement un sixième de la surface terrestre était couverte afin de limiter le temps de calcul (NOAA, 2008).

Au fil des ans, les performances des ordinateurs se sont grandement développées. Par conséquent, la complexité des phénomènes modélisés de même que la résolution temporelle et spatiale des modèles ont pu s'accroître considérablement. La figure 2.2 illustre ainsi la progression des MCG au fil du temps, alors que se sont ajoutés des éléments tels que les nuages, les éruptions volcaniques, le cycle du carbone, etc. (GIEC, 2007b). Il faut aussi noter que les modèles couplés atmosphère-océan ne sont pas devenus la norme immédiatement après l'apparition du modèle de Princeton, mais se sont plutôt généralisés au cours des années 90.

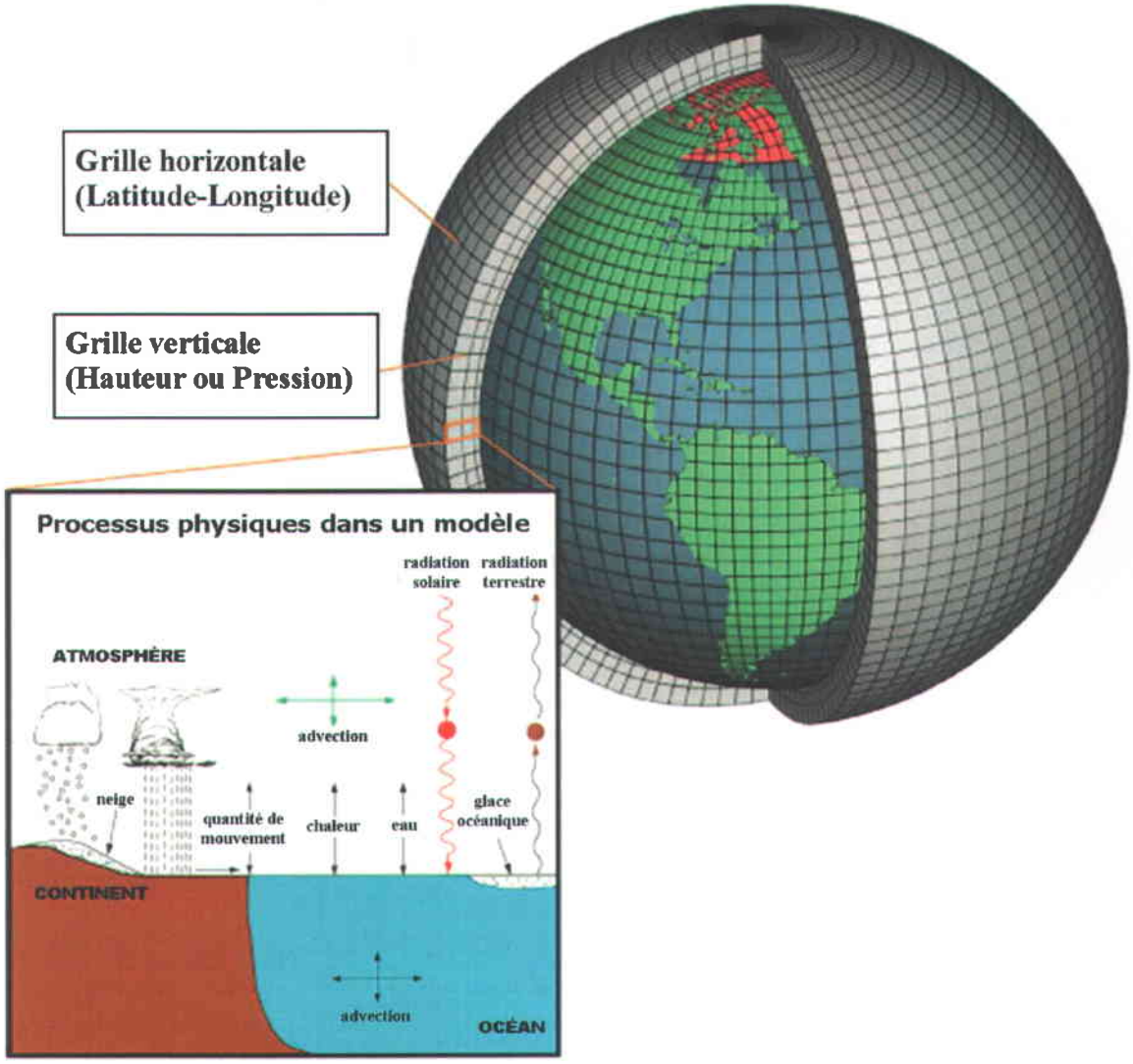

Figure 2.1 : Schéma présentant les phénomènes de base impliqués dans les MCG (inspiré de NOAA, 2008)

Actuellement, les MCG peuvent être utilisés pour l'étude des changements climatiques en faisant varier en fonction du temps les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (GES). Ces gaz, tels que le CO_2, le méthane et plusieurs autres, ont la propriété de faire diminuer les pertes de chaleur par radiation de l'atmosphère vers l'espace (pour une explication plus détaillée de l'effet de serre, le lecteur est invité à consulter Grinevald, 1992). En faisant varier ces paramètres dans les modèles, on peut ainsi observer une évolution vraisemblable du climat et voir ses effets sur différentes variables telles que la température et les précipitations.

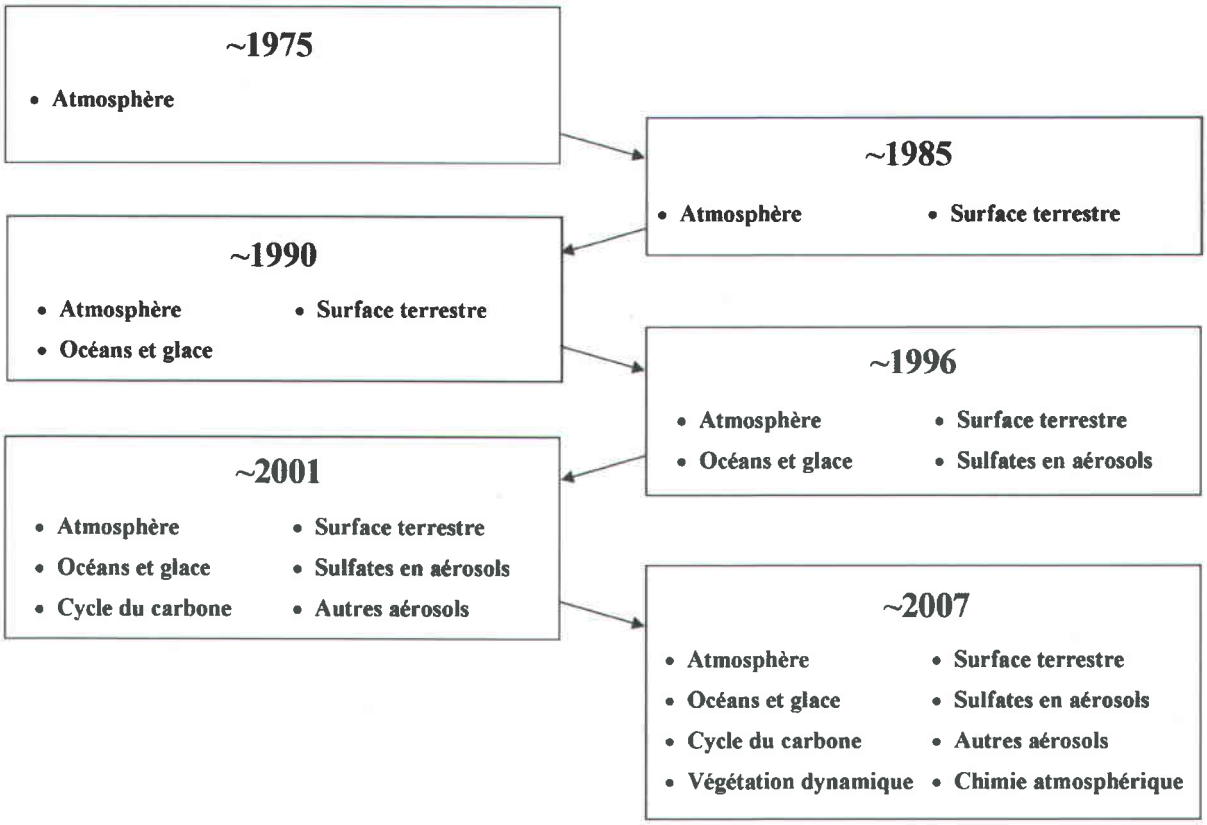

Figure 2.2 : Évolution des modèles climatiques

2.2.2 Scénarios de Gaz à Effet de Serre (GES)

Le moteur principal derrière les changements climatiques que l'on observe actuellement est très probablement l'augmentation des gaz à effet de serre (GIEC, 2007a). De l'Antiquité jusqu'à l'aube de la Révolution industrielle, les concentrations de ces gaz sont demeurées stables. Toutefois, l'usage intensif de carburants fossiles a par la suite fait considérablement augmenter ces concentrations, comme, par exemple, le CO_2 qui est passé de 280 à 480 ppm en l'espace de 200 ans (GIEC, 2007b). Bien que ces valeurs aient été mesurées, l'évolution des concentrations en GES dans le futur demeure incertaine, puisque ces concentrations sont fortement influencées par l'activité anthropique et qu'elles peuvent donc varier selon l'évolution de divers facteurs. Afin de déterminer l'évolution future (après l'an 2000) des concentrations utilisées dans les MCG et afin également d'étudier l'impact de nos actions futures sur le cours des événements, différents scénarios ont été mis au point par des groupes de travail faisant

partie du GIEC, en tenant compte de l'évolution probable de la technologie, de la démographie, de l'agriculture et des classes sociales (GIEC, 2007b). Dans le cadre de la présente étude, trois scénarios post-2000 sont utilisés : les scénarios A1B, B1 et A2. Ce choix se justifie par le fait que ces trois scénarios sont les plus couramment utilisés dans la littérature et par les MCG, et non pas parce qu'ils sont considérés plus probables que d'autres. Les paragraphes suivants donnent une description de ces scénarios.

2.2.2.1 Scénario B1

Ce scénario se caractérise d'abord par une augmentation de la population mondiale jusqu'à 9 milliards de personnes en 2050, suivie d'une diminution progressive jusqu'en 2100, pour atteindre 7 milliards d'habitants à la fin du XXIe siècle. Aux niveaux social, économique et environnemental, ce scénario suppose une forte conscientisation et la mise en œuvre d'efforts en vue de rendre opérationnels les principes du développement durable. L'impact sur les GES se traduit par une faible augmentation des concentrations entre 2000 et 2050, suivie d'une forte diminution jusqu'en 2100 (voir figure 2.3). De façon générale, on pourrait qualifier le scénario B1 d'optimiste.

2.2.2.2 Scénario A1B

Au niveau démographique, le scénario A1B suppose la même tendance que le scénario B1, soit une hausse jusqu'en 2050, suivie d'une diminution progressive jusqu'en 2100. Du côté économique, les hypothèses d'une hausse moyenne annuelle de 3 % de l'économie mondiale, d'une diminution de l'écart entre les pays riches et pauvres, d'échanges culturels plus importants et d'une augmentation du revenu *per capita* dans toutes les régions du globe sont retenues. Enfin, on suppose une diversification progressive des sources d'énergie utilisées ainsi que des innovations technologiques dans plusieurs secteurs. Au niveau des GES, cela se traduit par une augmentation des concentrations de l'ordre de 50 % pour la période de 2000 à 2050, suivie d'une diminution progressive par la suite (voir figure 2.3).

2.2.2.3 Scénario A2

Le scénario A2 repose sur l'hypothèse d'un monde qui évolue très peu, comparativement au scénario A1B. Cela implique peu d'échanges culturels et technologiques, et donc une perpétuation des inégalités sociales. De plus, la population mondiale continue d'augmenter de

façon importante, pour atteindre près de 15 milliards d'habitants en 2100. La hausse de la demande énergétique, conjuguée à la stagnation de la technologie dans les pays moins fortunés, se traduit dans le scénario A2 par une augmentation soutenue des GES, et ce, tout au long du XXIe siècle (voir figure 2.3). On pourrait donc affirmer que des trois scénarios, le A2 est le plus pessimiste d'un point de vue environnemental.

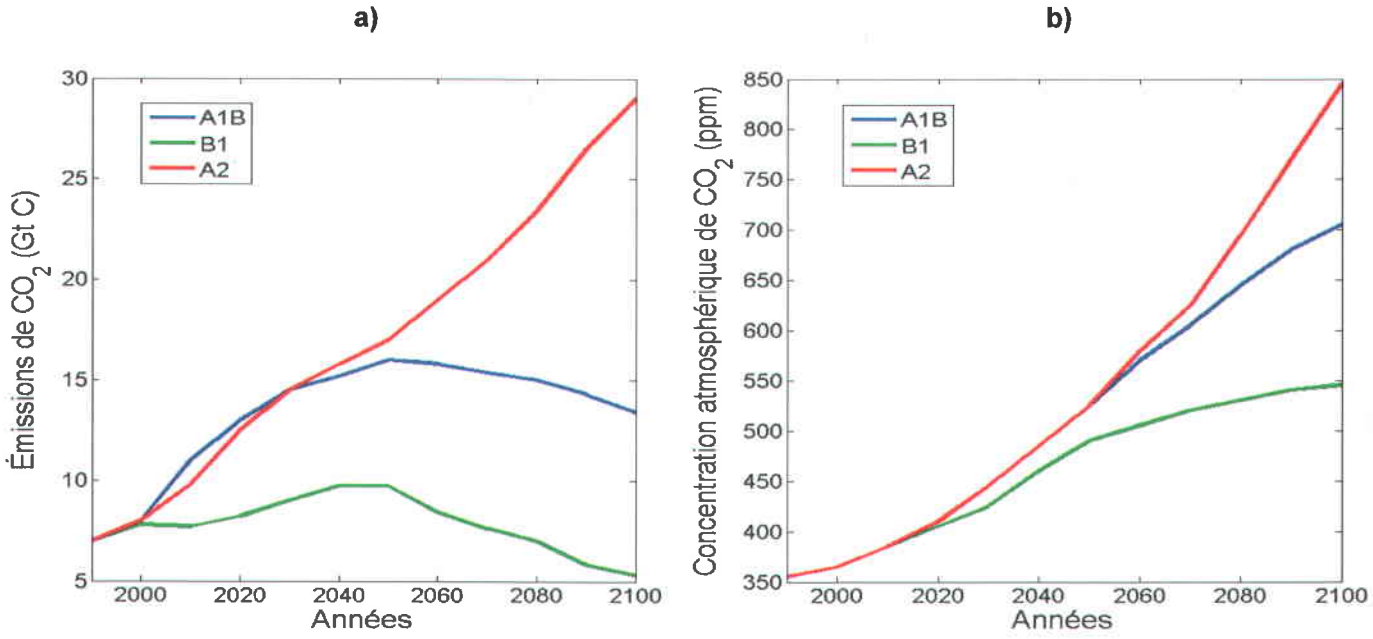

Figure 2.3 : Émissions de CO_2 (a) et concentration atmosphérique de CO_2 (b) en fonction des années, pour les trois scénarios de GES (Inspiré de Encyclopedia of Earth, 2007; GIEC, 2000)

2.2.3 Variabilité interne des modèles

Lors de la modélisation de systèmes aussi complexes et non linéaires que le climat, on observe une propriété intrinsèque à ces systèmes que l'on appelle « variabilité interne » (Lucas-Picher *et al.*, 2008). En effet, on observe lors des simulations que d'infimes perturbations du système (par exemple, sur les conditions initiales) peuvent modifier considérablement son évolution future. Cette propriété, qui résulte des phénomènes non linéaires et des processus de rétroaction impliqués dans le climat, est également considérée intrinsèque aux modèles climatiques. Les concepteurs des MCG doivent donc en tenir compte et vérifier si les variations induites par la variabilité interne du modèle sont plus importantes que celles attribuables au forçage anthropique. Plusieurs simulations supplémentaires dans lesquelles les conditions

initiales sont légèrement perturbées, que l'on appelle « membres », sont réalisées afin d'estimer cette variabilité interne (Lucas-Picher *et al.*, 2008). En comparant et en combinant les résultats obtenus pour chacun des membres, on peut tenir compte de l'incertitude reliée à la variabilité interne des modèles et aux conditions initiales (Hagedorn *et al.*, 2005).

2.2.4 Validation des MCG pour les précipitations

Récemment, quelques études se sont intéressées à la capacité des MCG à reproduire le climat au niveau des précipitations, dont Allan et Soden (2007), Wentz *et al.* (2007), de même que Zhang *et al.* (2007). Dans un premier temps, Allan et Soden (2007) ont comparé les données historiques de précipitations provenant de réanalyses à celles d'un groupe de onze MCG dans la région tropicale pour la période 1979-2006. Leur principale conclusion est que les tendances sur les données observées sont substantiellement plus grandes en amplitude que celles simulées par les MCG. Dans un second temps, Wentz *et al.* (2007) se sont basés sur des données satellites de précipitations pour la période 1987-2006, et ont observé que les tendances pour cette période, à l'échelle mondiale, étaient près de deux fois plus grandes en amplitude que pour les tendances simulées par un groupe de plusieurs MCG. Enfin, Zhang *et al.* (2007) ont comparé les données de précipitations historiques à l'échelle mondiale sur la période 1925-1999 et ont eux aussi observé que les tendances historiques étaient plus importantes que celles simulées par un groupe de plusieurs MCG.

2.2.5 Limites des écoulements pour les MCG

Dans les modèles climatiques, l'écoulement se définit comme étant l'excès d'eau instantané pour une tuile donnée, sans transformation ni translation dans les eaux souterraines, les lacs ou les cours d'eau (Graham *et al.*, 2007). *Grosso modo*, les écoulements se calculent à partir d'un bilan fermé impliquant l'apport des précipitations, les pertes dues à l'évapotranspiration et enfin les changements dans les réserves d'eau dans le sol et dans le couvert nival. Toutefois, leur utilisation dans des études d'impact est plutôt limitée. En effet, de nombreuses différences existent entre les MCG au niveau de la représentation de ces processus, ce qui complique la comparaison entre les modèles. De plus, certaines études considèrent que les échelles spatiales et temporelles utilisées par les MCG sont insuffisantes pour représenter adéquatement les processus impliqués dans le cycle hydrologique (Graham *et al.*, 2007). C'est

pourquoi on retrouve fréquemment dans la littérature l'utilisation de modèles hydrologiques alimentés par les précipitations et l'évaporation générées par les MCG (ou par les modèles régionaux du climat, aussi appelés MRC) plutôt que l'utilisation directe des écoulements (Blenkinsop et Fowler, 2007; Fowler et Kilsby, 2007). Toutefois, comme le présent travail se veut une analyse à une échelle plus globale, l'utilisation de modèles hydrologiques sera mise de côté, mais pourra être envisagée si des échelles plus fines sont nécessaires ultérieurement.

2.2.6 Variabilité intermodèle et analyse multimodèle

Bien que les processus physiques et chimiques en jeu soient assez semblables d'un MCG à l'autre, il n'en demeure pas moins que de multiples différences existent autant au niveau des résolutions spatiales et temporelles des modèles qu'au niveau de la modélisation des phénomènes et de la paramétrisation. Conséquemment, les résultats issus de divers modèles seront différents; c'est ce qu'on appelle la variabilité intermodèle. Parfois l'écart pourra être faible, mais, dans certains cas, on pourra observer qu'un modèle prédit une augmentation d'une variable quelconque (ex. : précipitations) alors qu'un autre modèle prédit une diminution, comme dans le cas de Elgaali et Garcia (2007). Cette variabilité intermodèle 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.,* 2007b; Tebaldi et Knutti, 2007).

Afin de tenir compte de cette variabilité inhérente aux MCG, la méthode la plus communément utilisée consiste à considérer les résultats de plusieurs modèles; cette approche est retrouvée dans la littérature sous le nom d'approche multimodèle. Hagedorn *et al.* (2005) montrent en effet que le fait d'utiliser autant de modèles que possible permet d'obtenir des résultats plus robustes qu'en se servant d'un seul modèle. En effet, il peut arriver qu'un modèle performe mieux que l'ensemble des autres modèles, pour un indice climatique, une région et une saison donnés. Toutefois, si on considère plusieurs paramètres ou indicateurs simultanément, peu de modèles parviendront à se démarquer dans toutes les catégories, vu les forces et les faiblesses inhérentes à chaque modèle (ex. : un modèle peut représenter adéquatement les précipitations, mais moins bien les écoulements). De plus, rien ne garantit qu'un modèle qui performe bien dans le passé sera aussi bon dans le futur. Le fait d'utiliser plusieurs modèles à la fois permet

de contrebalancer les mauvaises performances de l'un par les bonnes d'un autre, et donc d'obtenir une réponse raisonnablement fiable (Hagedorn *et al.*, 2005).

Différentes variantes de l'approche multimodèle ont été développées au fil du temps. Par exemple, si l'on tient compte de l'incertitude sur les conditions initiales dans notre analyse multimodèle et que plusieurs membres sont utilisés, on parle alors « d'analyse d'ensemble multimodèle » (Hagedorn *et al.*, 2005). De plus, on peut également faire la distinction entre l'analyse d'ensemble multimodèle simple et l'analyse d'ensemble multimodèle optimale. La première consiste à considérer tous les modèles et membres comme étant équiprobables, tandis que la seconde accorde plus d'importance à certains modèles, selon la capacité de chacun à reproduire le climat actuel (Hagedorn *et al.*, 2005). Toutefois, l'approche d'ensemble simple sera privilégiée pour la suite de la présente étude, et ce, pour deux raisons : 1) la longueur des données historiques est trop courte pour pouvoir évaluer correctement les pondérations dans la méthode optimale (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'ensemble multimodèle optimales (Hagedorn *et al.,* 2005). De plus, un avantage non négligeable est le fait que l'approche simple est beaucoup plus facile d'application. Par ailleurs, comme il a été commenté dans Blenkinsop et Fowler (2007), la capacité d'un modèle donné à reproduire le climat présent varie beaucoup spatialement, temporellement et selon les indices climatiques considérés. Cela rend alors le choix d'un critère de pondération très difficile. Enfin, il convient de mentionner que, selon un argumentaire présenté par Stainforth *et al.* (2007a), l'approche optimale, qui se base sur l'habileté des modèles à reproduire le climat présent, serait inappropriée, voire trompeuse, puisque le problème de la science de la projection climatique 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).

2.2.7 *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP)

Lors des débuts des MCG, chaque laboratoire dans le monde développait indépendamment son modèle à l'écart des autres. Cela pouvait s'expliquer entre autres par les moyens peu

développés à l'époque pour transmettre d'importantes quantités de données informatiques. Cette tendance allait toutefois évoluer au milieu des années 90 alors que le World Climate Research Program (WCRP) organisa le premier projet d'intercomparaison des modèles couplés atmosphère-océan, aussi appelé CMIP. Cette première version du projet visait à mettre en commun les résultats de quelques modèles climatiques afin de voir si des tendances similaires se dégageaient de chacun. Ce projet a lui aussi évolué au fil des temps, alors que le nombre de modèles a augmenté, et que ceux-ci utilisent dorénavant des scénarios de GES communs, soit les scénarios A1B, A2 et B1 pour la version CMIP3 (Meehl *et al.*, 2007), en plus de fournir dans certains cas des résultats issus de plusieurs membres. Le choix des simulations à produire et des scénarios de GES à utiliser pour le CMIP3 a été effectué par le WGCM (Working Group on Coupled Models) en consultation avec le Groupe de Travail I (sur l'évolution du climat) du quatrième rapport du GIEC. Par la suite, les données générées ont été rendues disponibles aux chercheurs par le PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) et ont servi de base aux analyses utilisées dans le quatrième rapport du GIEC. Cette banque de données représente un bond majeur dans ce domaine de recherche puisque, désormais, l'information provenant des principaux laboratoires mondiaux sera accessible pour l'ensemble des chercheurs. Il sera également beaucoup plus facile de comparer et d'évaluer entre eux les différents modèles, et ce, pour les trois types d'incertitudes (scénarios de GES, conditions initiales, choix du modèle). Dans le cadre de la présente étude, les données provenant de ce projet ont été utilisées. Plus de détails sur les modèles et les simulations disponibles seront donnés à la section 3.1.

2.2.8 Études utilisant des approches multimodèles

Au cours des dernières années, alors que de plus en plus de modèles sont disponibles pour la recherche grâce au CMIP, le nombre d'études utilisant plusieurs MCG pour effectuer des prévisions a également augmenté. Voici une revue, non exhaustive, d'articles récents faisant usage d'un ensemble de modèles climatiques.

2.2.8.1 Étude d'Allen et al. (2000)

Cette étude, en avance sur son époque, combine les efforts conjoints de trois centres de recherche (Hadley Center, NOAA, Max Planck Institute) et utilise les données de quatre MCG

(HadCM2, GFDL, ECHAM3 et ECHAM4) afin d'estimer les incertitudes sur les projections de température au cours de la période 1996-2046. Le fait d'utiliser plusieurs modèles, mais également plusieurs membres, a ainsi permis d'établir une fourchette des valeurs possibles de l'augmentation théorique de la température annuelle moyenne globale, estimée entre 1 et 2,5°C. Cette façon de faire constitue, si l'on peut s'exprimer ainsi, un précurseur de l'approche multimodèle employée dans le cadre de la présente étude.

2.2.8.2 Étude de Takle et al. (2005)

Avec l'avènement de la plus récente édition du CMIP (voir section 2.2.7), on a vu l'apparition de nombreuses études utilisant désormais un nombre important de MCG à la fois. L'étude de Takle *et al.* (2005) est l'une d'elles, où neuf MCG (pour un total de vingt simulations) sont utilisés afin d'évaluer leur capacité à reproduire le climat et l'hydrologie du bassin du fleuve Mississippi, USA, au cours du XXe siècle. Des débits sont d'abord simulés avec le modèle SWAT (Arnold et Fohrer, 2005) à partir des données climatiques des MCG, puis ces débits sont comparés aux données observées à une échelle annuelle. De façon générale, on observe une grande variabilité entre les différents modèles de climat (comme il en a été question à la section 2.2.6), mais l'ensemble a relativement bien performé à l'échelle annuelle avec une erreur relative d'environ 3 % pour les précipitations et de 11 % pour les écoulements (produits par le modèle hydrologique SWAT). Un autre résultat intéressant de cette étude est que le modèle le plus performant a été le modèle MIROC 3.2 HIRES, lequel a la résolution spatiale la plus fine. Cela supporte l'hypothèse qu'en théorie, un modèle ayant une meilleure résolution devrait mieux représenter les phénomènes. Il faut toutefois noter que l'étude de Takle *et al.* (2005) constitue pour l'instant une des rares études où ce fait se produit, ce qui signifie qu'il pourrait avoir été le fruit du hasard dans ce cas précis. Finalement, ce que l'on doit se rappeler de cette étude est qu'utiliser un ensemble de plusieurs modèles a permis de reproduire de façon satisfaisante les précipitations et les écoulements dans la région du Mississippi, permettant de penser que cette méthode peut être utilisée dans d'autres études d'impacts.

2.2.8.3 Étude de Tebaldi et al. (2006)

Tebaldi *et al.* (2006) s'intéressent à l'efficacité d'un ensemble de neuf MCG pour analyser les tendances futures sur l'ensemble du XXIe siècle à l'échelle mondiale, et ce, pour différents indices de température et de précipitations extrêmes. Concernant les indices de température,

de façon générale, les différents modèles s'entendent pour prédire un futur beaucoup plus chaud dans la majorité des régions du monde et semblent aussi en accord avec les données historiques. Au niveau des précipitations, des indices de sécheresse et de crue sont utilisés en raison des impacts relativement importants de ces phénomènes extrêmes sur la population humaine. Les résultats tendent à suggérer une augmentation des précipitations intenses, particulièrement pour les régions de latitudes élevées, mais aucun signal cohérent n'émerge au niveau des sécheresses. Une forte variabilité régionale est également observée au niveau des précipitations, ce qui concorde avec les résultats de Zhang *et al.* (2007) (voir section 2.2.8.6).

2.2.8.4 Étude de Merrit et al. (2006)

Dans le cadre de cette étude, Merritt *et al.* (2006) ont utilisé trois MCG et deux scénarios de GES pour analyser les tendances futures sur les précipitations et le ruissellement dans la région de l'Okanagan en Colombie-Britannique (Canada). Pour l'horizon 2050, ils ont prédit une augmentation des précipitations estivales de 5 à 20 % (variant selon le MCG et le scénario d'émission considérés), mais une diminution 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 être évalué sur la seule base des tendances anticipées pour les précipitations.

2.2.8.5 Étude de Graham et al. (2007)

Les travaux de Graham *et al.* (2007) constituent l'une des rares études d'impact où la variable d'écoulement extraite des modèles climatiques est directement utilisée. Plus précisément, les écoulements générés par onze MRC (Modèle régional de climat) à une résolution de 50 km sont utilisés comme données d'entrée de modèles hydrologiques, afin de simuler les débits pour trois bassins versants européens (Baie de Botnie, mer Baltique et fleuve Rhin) et de comparer les périodes 1961-1990 et 2071-2100. À titre de comparaison, deux MCG (HadCM3 et ECHAM4) ont été utilisés pour générer les conditions aux limites des MRC. Une des conclusions les plus importantes de cette étude est que le choix du MCG influence plus les résultats finaux que le choix du MRC. En effet, la différence entre les onze MRC alimentés par un seul MCG était plus petite que pour un seul MRC alimenté par deux MCG distincts.

Concernant les écarts présent-futur observés pour les trois bassins, des hausses sont à prévoir pour les débits hivernaux, comparativement à des diminutions pour les débits estivaux.

2.2.8.6 Étude de Zhang et al. (2007)

Zhang *et al.* (2007) ont tenté de détecter les effets des activités anthropiques sur les précipitations à l'aide de 14 MCG, pour la période 1925-1999, et ce, pour l'ensemble du globe. Dans ce but, ils ont comparé les résultats de MCG utilisant uniquement un forçage naturel avec ceux de MCG utilisant un forçage anthropique, de même qu'avec des données historiques provenant d'une banque mondiale. La principale conclusion se dégageant de leurs analyses est que le forçage naturel seul ne peut expliquer les tendances observées au cours du dernier siècle. De plus, ils avancent que le forçage anthropique aurait contribué pour 50 à 85 % des tendances observées pour la période 1925-1999 dans les précipitations annuelles totales entre le 40° de latitude Sud et le 70° de latitude Nord. Par ailleurs, un des points intéressants à considérer est qu'aucun signal cohérent à l'échelle mondiale n'est détectable actuellement. Toutefois, lorsque les régions sont regroupées spatialement par bandes de latitude, des tendances se dégagent. Ces dernières sont positives à certains endroits et négatives à d'autres, mais s'annulent au total, ce qui explique que le bilan à l'échelle planétaire est presque nul. Concernant les tendances entre 1925 et 1999 pour les régions qui nous intéressent plus particulièrement, Zhang *et al.* (2007) observent une hausse des précipitations annuelles pour la plage de latitudes située entre 50° N et 70° N, mais aucun changement n'est détecté pour celle située entre 40° N et 50° N.

2.2.8.7 Étude de Blenkinsop et Fowler (2007)

Le but de cette étude était d'analyser l'évolution des précipitations mensuelles, et par la même occasion, des indices de sécheresse pour la région des îles britanniques, en comparant les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Six modèles régionaux de climat (MRC) ont été utilisés, lesquels étaient alimentés aux frontières par quatre MCG utilisant le scénario de GES A2. Ces modèles prévoient une augmentation des précipitations hivernales moyennes, mais une diminution en été. Toutefois, Blenkinsop et Fowler (2007) ont observé des différences notables au niveau de la capacité des modèles à reproduire les distributions spatiales des 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. Cela illustre les problèmes que peuvent avoir les modèles climatiques à représenter les précipitations à des échelles spatiales et temporelles plus fines. Un autre point important que mentionnent Blenkinsop et Fowler (2007) concerne le regroupement des résultats de différents modèles en fonction d'une pondération représentative de leur efficacité à reproduire le climat actuel. Cette technique, que l'on appelle aussi approche multimodèle optimale (Hagedorn *et al.*, 2005), serait, selon eux, très difficile à appliquer. En effet, la performance de chaque modèle varie en fonction de la région et de la période considérées, mais aussi selon les indices utilisés. Par exemple, un modèle peut bien reproduire les moyennes des précipitations, mais avoir de la difficulté à reproduire la fréquence des sécheresses. Ce point est très important et justifiera l'usage d'une méthode inspirée de l'approche multimodèle simple (voir sections 2.2.6 et 3).

2.2.8.8 Étude de Sheffield et Wood (2007)

Sheffield et Wood (2007) s'intéressent aux impacts que peuvent avoir les changements climatiques sur les sécheresses à l'échelle mondiale. Ils utilisent les données provenant de huit MCG pilotés par les scénarios de GES A2, A1B et B1. La variable utilisée est l'humidité du sol, laquelle intègre à la fois l'influence des précipitations et de l'évapotranspiration. La capacité des modèles à reproduire les données historiques pour les sécheresses à grande échelle est satisfaisante, quoique la fréquence des sécheresses, à long terme (plus de 12 mois), semble surestimée. De façon générale, les modèles prédisent globalement une diminution de l'humidité des sols d'ici la fin du XXIe siècle, et ce, pour les trois scénarios de GES. De plus, les auteurs rapportent un possible doublement de la surface des régions souffrant de déficits hydriques sévères et une augmentation de la fréquence des sécheresses de courte durée (4 à 6 mois). Une comparaison des scénarios de GES montre que les scénarios A1B et A2 présentent les changements les plus marqués. Cette augmentation des sécheresses en climat futur s'explique par une diminution des précipitations, combinée à une croissance de l'évaporation. On observe même dans certaines régions une augmentation des précipitations, mais qui est surpassée par une augmentation importante de l'évaporation, causant ainsi globalement une diminution de l'humidité du sol. Enfin, un dernier point intéressant concerne le fait que, bien que des changements soient observables au niveau des sécheresses comme telles, aucune tendance n'est observée sur les moyennes annuelles de l'évaporation ni de l'humidité du sol. Cela illustre

bien le fait que les CC n'ont pas uniquement des effets sur la moyenne mais également au niveau de la variabilité.

2.2.8.9 Étude de Hayhoe et al. (2007)

Hayhoe *et al.* (2007) s'intéressent à l'évolution de plusieurs indices climatiques et hydrologiques pour la région du nord-est des États-Unis. Cela est très intéressant dans le cadre de la présente étude en raison de la proximité de cette région avec l'est du Canada. Les données utilisées sont les résultats de neuf MCG couvrant les périodes 1961-2000, 2035-2064 et 2070-2099, de même que les observations historiques pour le XXe siècle provenant de l'USHCN (*United States Historical Climatology Network*). Dans un premier temps, Hayhoe *et al.* (2007) s'affairent à vérifier si les MCG sont aptes à reproduire les tendances historiques sur la moyenne pour les différents indices à l'échelle saisonnière. Au niveau de la température, les modèles réussissent assez bien à reproduire les tendances observées. Même constat pour l'évaporation et les écoulements, alors que dans le cas des précipitations, des différences notables de signe et d'amplitude apparaissent. Concernant les projections futures, un signal fort vers une augmentation de la température moyenne, de l'ordre de 3 à 5° C sur l'ensemble du territoire, est rapporté pour le XXIe siècle. Des augmentations de l'ordre de 10 à 15 % sont également prévues pour les précipitations hivernales, mais aucune tendance ne se dégage pour ce qui est des précipitations estivales. Une augmentation de l'évaporation est également prévue, de même qu'un début plus précoce des crues printanières. Ce dernier point concernant les crues printanières plus précoces a également été observé par Hodgkins *et al.* (2005) et a pour inconvénient d'allonger la saison des étiages. Enfin, une dernière conclusion de l'étude concerne le fait que les tendances sont plus fortes lorsque l'on considère les scénarios de GES plus pessimistes A2 et A1FI, comparativement au scénario optimiste B1. Ce résultat suggère que ces changements sont bien liés à l'effet de serre, et abonde dans le sens des conclusions de Sheffield et Wood (2007).

2.2.8.10 Étude de Alexander et Arblaster (2008)

Certaines régions de l'Australie (notamment l'état de Victoria) sont durement touchées depuis une décennie par une diminution des précipitations. Un tel changement pourrait être attribuable à la variabilité naturelle du climat, mais pourrait être aussi une conséquence des changements climatiques. Alexander et Arblaster (2008) utilisent neuf MCG de même que les données

historiques pour la période 1957-1999 afin d'évaluer si les tendances observées sont attribuables aux CC et si celles-ci vont s'amplifier dans le futur. Concernant le XXe siècle, ils concluent que seul le forçage anthropique parvient à expliquer les tendances historiques observées et que, donc, les simulations réalisées en utilisant uniquement un forçage naturel ne parviennent pas à reproduire les changements observés. Les résultats pour l'ensemble du XXIe siècle montrent que des périodes de sécheresse plus longues et des crues plus importantes sont à prévoir. Les événements extrêmes de température (canicules, nuits chaudes) seront probablement plus marqués eux aussi. Par ailleurs, Alexander et Arblaster (2008) ont analysé la capacité des modèles à reproduire les tendances observées. Concernant les extrêmes de température, les MCG parviennent raisonnablement bien à générer des tendances qui sont cohérentes avec les tendances observées. Toutefois, une forte variabilité intermodèle des résultats est observée pour les précipitations (voir section 2.2.6), même si la majorité des modèles parvient à reproduire les tendances observées. De plus, l'ensemble multimodèle performe mieux en général que les modèles pris individuellement, car aucun de ces derniers ne parvient à reproduire systématiquement chaque indice de façon correcte.

2.2.8.11 Bourque et Simonet (2008)

Les résultats rapportés pour le sud du Québec dans Bourque et Simonet (2008) concernent les changements de précipitations projetés dans le futur, qui ont été évalués en utilisant huit modèles climatiques (7 MCG et 1 MRC). Bien que cette étude utilise beaucoup moins de modèles que la présente, il sera intéressant de comparer les résultats obtenus par ces derniers avec les résultats obtenus au chapitre 4 (voir le chapitre 5 pour la discussion à ce sujet). Au niveau de l'horizon 2080, Bourque et Simonet (2008) rapportent des changements de précipitations totales 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 % pour l'automne. Les fourchettes d'incertitude proposées englobent l'ensemble des résultats obtenus des différents modèles, mais sans égard aux scénarios de GES considérés ni à savoir si la tendance est statistiquement significative ou non.

2.2.8.12 Autres études utilisant plusieurs MCG

Bien entendu, la liste des études utilisant plusieurs MCG présentée ici n'est pas complète. Cela s'explique avant tout par un souci d'éviter la redondance, car plusieurs autres études reprennent les mêmes points, mais avec des régions ou des indices climatiques différents. On

peut citer, parmi les plus vieilles, celle de Rajagopalan *et al.* (2002), qui ont tenté d'évaluer l'efficacité de trois MCG à reproduire les variations de température et de précipitations à l'échelle mondiale. En 2007, Serrat-Capdevila *et al.* (2007) se sont servis des précipitations provenant d'un ensemble de 17 MCG pour évaluer l'hydrologie en climat futur du bassin de la San Pedro. Parmi les plus récentes études, Haugen et Iversen (2008) ont utilisé huit MCG afin d'analyser les tendances sur les extrêmes de précipitations en Scandinavie. Puis, Vidal et Wade (2008) se sont intéressés à reproduire les précipitations au Royaume-Uni à l'aide d'un ensemble de six MCG. De façon générale, ce que l'on constate dans ces études et dans toutes celles présentées à la section 2.2.8, est la place de plus en plus grande que prennent les ensembles de MCG dans les études d'impact des CC en climat futur.

3. Méthodologie

Le chapitre 3 fournit une description des données et des méthodes qui ont été utilisées dans le cadre de la présente étude. D'abord, les sections 3.1 à 3.6 présentent les résultats des MCG et la méthode d'analyse des tendances. Puis, la section 3.7 s'attarde à l'évaluation de la performance des MCG à reproduire les données observées. La section 3.8 traite de la méthode selon laquelle les GCM ont été analysés et combinés. Enfin, la section 3.9 décrit de quelle manière les différents scénarios de GES ont été comparés après l'analyse des tendances.

3.1 Résultats des MCG

Les données de base de cette étude sont les résultats de simulations de précipitations et d'écoulements mensuels extraits des MCG provenant du Coupled Model Intercomparison Project 3 (ou CMIP3, voir section 2.2.7), fournis par le consortium Ouranos. Vingt-trois modèles provenant de différents laboratoires dans le monde sont ainsi considérés, comprenant de un à trois scénarios de GES et de un à sept membres chacun. Au total, pour les précipitations, 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. Le tableau 3.1 présente la liste des modèles et certaines caractéristiques générales qui étaient disponibles via le site web du CMIP3 à l'automne 2007.

Tableau 3.1 : Liste des simulations utilisées pour l'élaboration des projections climatiques

Nom du modèle	Institution	Nombre de membres*		Résolution (lat × lon)	Période simulée
		Précipitations	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.

L'examen du tableau 3.1 montre que chaque modèle a une résolution spatiale et temporelle qui lui est propre. La résolution spatiale varie de 1,1° × 1,1° (environ 120 x 90 km à 45° de latitude) pour le modèle MIROC3.2 HIRES à 4° × 5° (environ 450 km x 380 km à 45° de latitude) pour les modèles INM-CM3.0, GISS-ER et GISS-EH. De plus, les découpages en « tuiles » ne se recoupent pas, rendant très difficile une comparaison entre les modèles. Une grille commune sera donc définie afin de rendre plus facile la mise en commun des modèles. Plus de détails sur cette technique seront donnés à la section 3.4. Pour ce qui est de la période d'analyse, les simulations débutent à différents moments au cours du XIXe siècle, mais se terminent toutes à la fin du XXIe siècle. Afin de pouvoir comparer les résultats de ces modèles, une période d'analyse commune s'étendant entre 1900 et 2100 a été définie. Les résultats en chaque tuile à chaque mois sont disponibles pour la période d'analyse commune pour tous les modèles. Enfin, la région couverte comprend le Canada et le nord des États-Unis (voir figure 3.1).

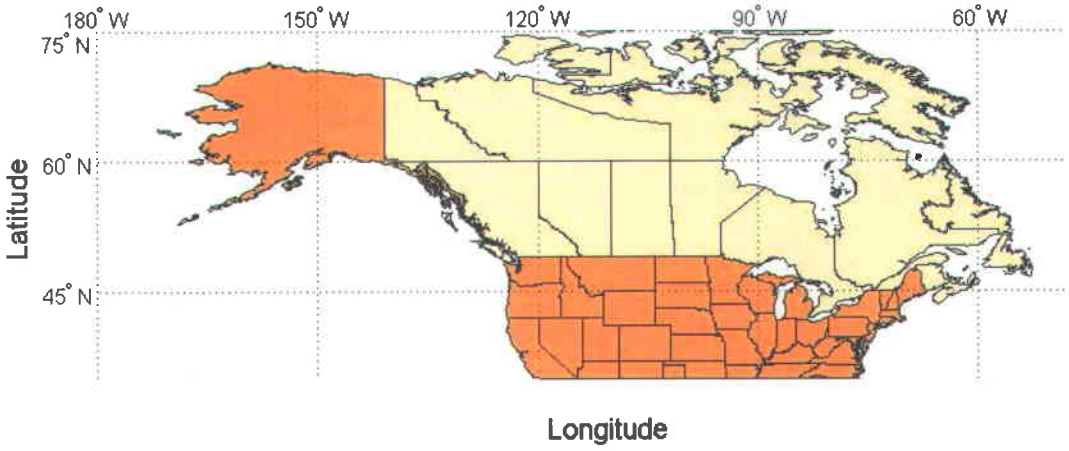

Figure 3.1 : Territoire couvert par la présente étude

3.2 Identifiants des simulations

Chaque série disponible se définit par le modèle, le scénario de GES et le membre utilisés, de même que par la position géographique de la tuile considérée et le choix du mois. Le schéma suivant illustre l'ensemble des différents niveaux relatifs aux données :

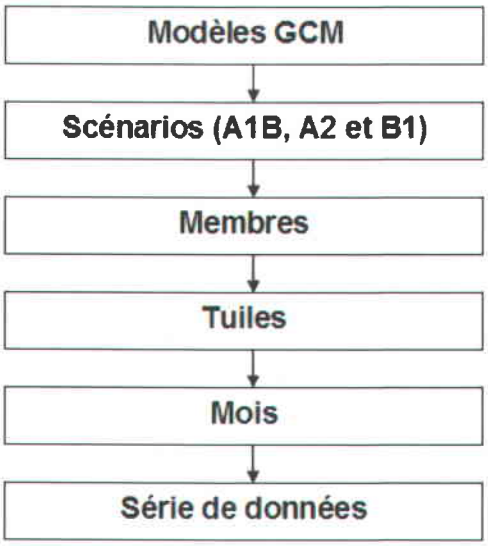

Figure 3.2 : Identifiant d'une série de données

Pour chaque modèle / scénario de GES / membre donné, une simulation informatique ayant permis de générer des données à l'échelle mondiale a été réalisée (le terme « simulation » sera dorénavant utilisé pour décrire un tel ensemble de données). À partir de chacune de ces simulations, on peut extraire la série de données s'étendant sur la période d'analyse commune, pour chaque tuile (position géographique) et chaque mois désirés. La figure 3.3 illustre un exemple d'une série de données ainsi obtenue :

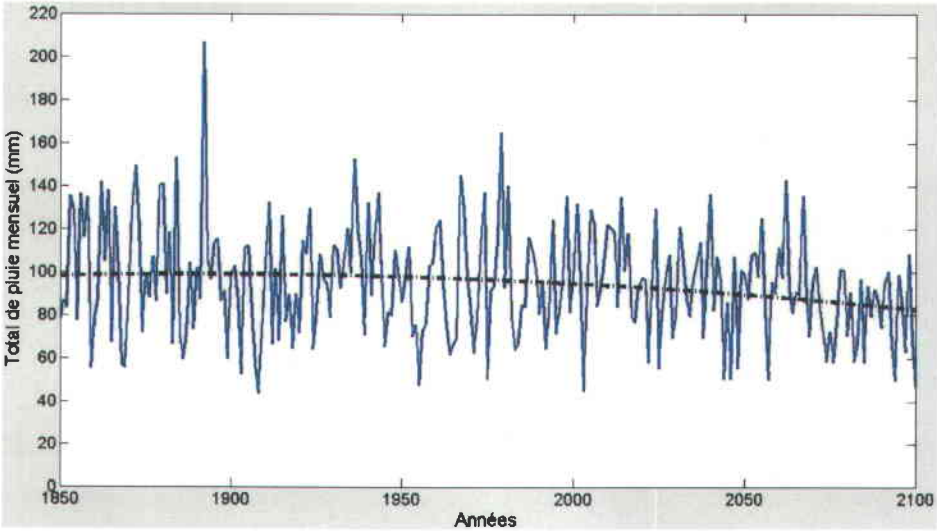

Figure 3.3 : Exemple d'une série de pluies mensuelles (modèle CGCM3, membre 3, mois de juillet, scénario de GES A2)

3.3 Analyse multimodèle

La méthode utilisée afin de mettre en commun l'information de tous les modèles et d'en extraire les tendances générales est inspirée de l'analyse multimodèle d'ensemble simple (voir section 2.2.6). Selon cette approche, les incertitudes sur les modèles et les conditions initiales seront prises en compte, tout en considérant les différents modèles et membres sur un pied d'égalité. De plus, l'impact du choix du scénario de GES sera analysé en comparant les scénarios A1B, A2 et B1. Toutefois, la méthode qui sera utilisée ici se démarque de l'analyse multimodèle d'ensemble simple par le fait qu'une grande importance sera accordée à la significativité statistique et aux types de tendance.

Les différentes étapes de la méthode d'analyse multimodèle utilisée sont décrites en détail dans les sections suivantes. La première partie consiste à créer une grille spatiale de référence, puis à projeter les résultats de chaque tuile originale de chaque modèle sur cette dernière, afin de pouvoir comparer les modèles sur des régions communes (voir section 3.4). Par la suite, à partir des séries de données ajustées spatialement, des analyses de tendances sont effectuées afin de vérifier si des changements peuvent être détectés (voir section 3.5). Enfin, les résultats de ces analyses de tendances sont regroupés par mois, par régions et par scénarios de GES, en accordant un poids égal à chaque modèle (voir section 3.8). Par ailleurs, comme les sections suivantes présentent une version simplifiée de la démarche employée, une version plus rigoureuse est présentée à l'annexe A.

3.4 Grille de référence et construction des séries

La conception de la grille de référence se base sur quelques critères qui permettent de faciliter l'analyse des données et d'éviter les interpolations floues. Tout d'abord, la résolution utilisée ne doit être ni trop fine, ni trop grossière par rapport aux grilles utilisées par les MCG. Ensuite, le découpage doit se superposer à celui d'autant de modèles que possible, afin d'éviter que l'interpolation ne déforme l'allure générale des données. Après une inspection visuelle et la comparaison des différentes grilles, il est apparu que la grille du modèle INM-CM3.0 remplissait raisonnablement ces conditions; elle a donc été retenue comme grille de référence. Sa résolution est de 4° x 5° (environ 450 km x 380 km à 45° de latitude), permettant de respecter les limites de résolution des modèles les plus grossiers tout en évitant qu'on ne puisse plus reconnaitre les

contours géographiques de la région étudiée. Une représentation de la grille commune est présentée à la figure 3.4 :

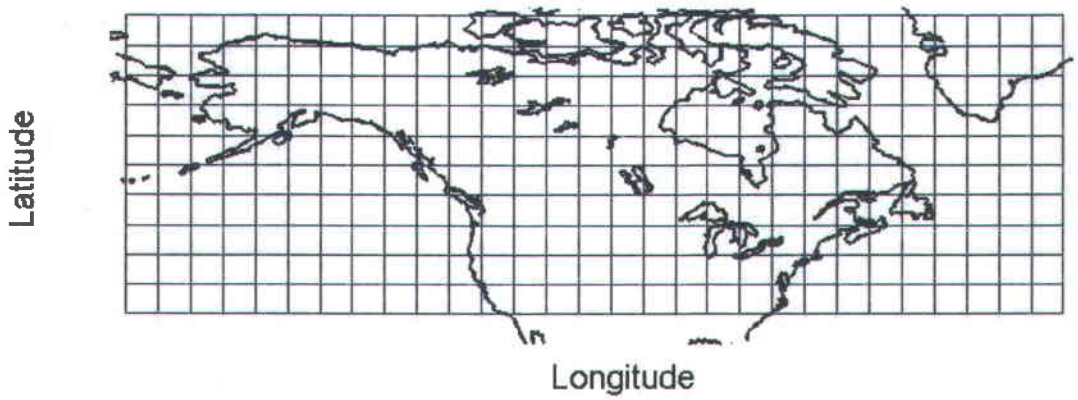

Figure 3.4 : Grille de référence (inspirée de la grille du modèle INM-CM3.0, dont la résolution est de 4° x 5°)

L'étape suivante consiste à effectuer la projection des séries en chaque tuile pour chaque modèle sur la grille de référence. Pour cela, les totaux mensuels de précipitations (ou d'écoulements) provenant de chaque tuile de chaque MCG sont redistribués sur les tuiles de la grille de référence. Plusieurs techniques de projection plus ou moins sophistiquées auraient pu être utilisées, mais une méthode plus complexe ne semble pas nécessaire dans le cas présent étant donné que les principales sources d'incertitude du projet ne se situent pas à ce niveau. Une méthode d'interpolation simple se basant sur les surfaces sera donc utilisée, et un exemple est proposé afin d'expliquer cette procédure :

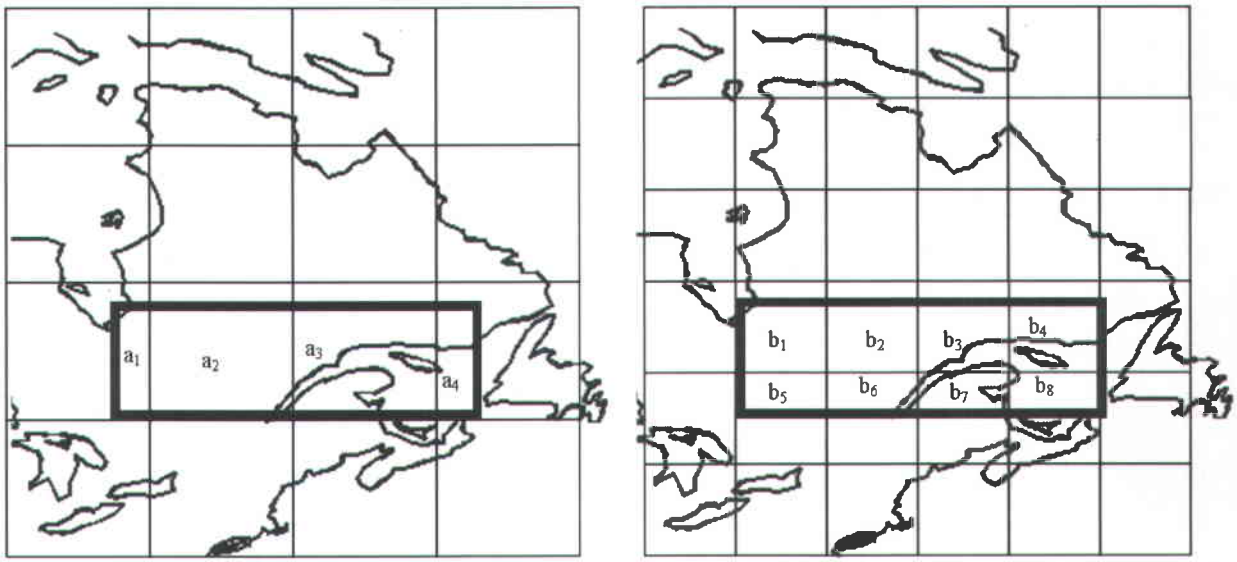

Figure 3.5 : Exemple d'application de la méthode d'agrégation des séries. Les tuiles carrées en trait mince représentent la grille des modèle A (à gauche) et B (à droite) alors que le rectangle en trait gras représente l'une des tuiles de la grille de référence

Soit deux modèles, dont les découpages sont présentés à la figure 3.5. Chacun des deux modèles a sa propre grille, où les tuiles sont représentées par les carrés en trait mince. Pour chacune de ces tuiles, une série de données telle que celle présentée à la figure 3.3 est disponible. Supposons maintenant que l'on veuille redistribuer les séries de ces tuiles sur une tuile correspondante de la grille de référence (en trait foncé), de surface totale S. Pour cela, utilisons dans le premier cas (modèle A) les tuiles couvrant la tuile de référence (4 tuiles de la troisième rangée), dont les séries de données sont notées par $\{x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)\}$ et où t représente l'année. Les surfaces communes aux deux grilles (modèle et référence) sont représentées par les valeurs a_1 à a_4 respectivement. On crée la série de la grille commune du modèle A, que l'on notera $y^A(t)$, à l'aide de :

$$y^A(t) = \frac{1}{S}\left[a_1\, x_1(t) + a_2\, x_2(t) + a_3\, x_3(t) + a_4\, x_4(t)\right] \qquad \textbf{(1)}$$

Pour le modèle B, la même démarche s'applique, mais en utilisant cette fois-ci les surfaces b_1 à b_8.

3.5 Analyse des tendances

Une fois la construction des séries de la grille de référence complétée, l'étape suivante consiste à détecter la présence ou non de tendances dans ces séries. Pour cela, un test de type Mann-Kendall a été considéré, en raison de sa fiabilité et du fait qu'il est non paramétrique (Yue *et al.*, 2002b, c). Par ailleurs, pour tenir compte de l'éventuelle présence d'autocorrélation entre les données, la démarche proposée dans Yue *et al.* (2002a) a été utilisée, c'est-à-dire : 1) calage d'une tendance à l'aide de la méthode des moindres carrés robustes (voir section 3.6), 2) on soustrait la tendance calculée en (1) des données afin de ne conserver que le bruit blanc, 3) calcul de l'autocorrélation sur le bruit blanc, puis retrait de celle-ci, 4) on rajoute la tendance calée en (1) sur les données décorrélées, et enfin 5) on applique le test de Mann-Kendall (95 %) sur la série, afin de vérifier si la tendance calée est statistiquement significative. Par la suite, on classe chaque série de chaque modèle selon qu'elle présente une tendance significativement positive, significativement négative, ou non significative.

3.6 Estimation des écarts présent-futur

La seconde étape dans l'analyse des tendances consiste à évaluer l'amplitude des tendances, et ce, pour chaque tuile de chaque simulation. Pour cela, nous avons supposé que la moyenne de la variable étudiée (précipitations ou écoulements) pouvait se représenter par une équation de type « loi de puissance », soit :

$$\langle y(t) \rangle = a + b\,(t - t_0)^c \qquad \textbf{(2)}$$

où $\langle y(t) \rangle$ 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. Deux raisons ont motivé ce choix. Tout d'abord, une inspection visuelle montre que les tendances dans les séries s'accélèrent vers la fin du XXe siècle et au courant du XXIe siècle, ce qu'une équation linéaire ne parvient pas à représenter correctement. Deuxièmement, dans les cas où la tendance serait mieux représentée par une équation linéaire, il suffit de poser dans l'équation (2) que $c = 1$.

La méthode des moindres carrés dite « robuste » (Holland et Welsch, 1977; Huber, 1981; Street *et al.*, 1988; DuMouchel et O'Brien, 1989) a été retenue afin de trouver les valeurs optimales des paramètres $\{a,b,c\}$. Cette méthode est facile, rapide et efficace d'utilisation, et permet également d'éviter les complications reliées au type de distribution statistique des séries de données (contrairement, par exemple, à la méthode des moindres carrés classique, qui n'est valide que pour les données obéissant à une distribution normale). Par ailleurs, une inspection visuelle a montré que le fait d'utiliser d'autres méthodes de calage, telles que le maximum de vraisemblance en supposant une distribution Gamma ou Log-normale, avait peu d'impact sur les résultats finaux.

Une fois le calage effectué, la dernière étape consiste à évaluer l'écart relatif sur la moyenne pour la période de temps désirée afin de quantifier l'amplitude des changements climatiques. Dans le cadre de la présente étude, les valeurs des années 1900 et 2100 sont utilisées; les écarts relatifs pour les cas où une tendance significative est détectée sont calculés ainsi :

$$\Delta = \frac{\left[\langle y(t=2100)\rangle - \langle y(t=1900)\rangle\right]}{\langle y(t=1900)\rangle} \tag{3}$$

où Δ représente l'écart relatif sur la moyenne et où $\langle y(t=1900)\rangle$ et $\langle y(t=2100)\rangle$ représentent la valeur de la moyenne de la série pour les années 1900 et 2100 respectivement, selon l'équation (2). Pour les cas où aucune tendance significative n'a été détectée par le test de Mann-Kendall, on pose $\Delta = 0$. Bien entendu, dans les cas où on observerait une augmentation pour le XXe siècle suivie d'une diminution équivalente au XXIe siècle causées par le forçage anthropique, cette méthode aurait l'inconvénient de ne rien détecter du tout (ce qui est vrai aussi pour le test de Mann-Kendall). Toutefois, vu le nombre trop important de simulations à traiter, les cycles climatiques d'une durée de quelques décennies et les autres cas particuliers se déroulant au cours de la période d'analyse seront négligés dans le cadre de la présente étude.

3.7 Comparaison avec les données historiques

L'étape suivante de la présente étude consiste à vérifier la capacité des modèles à reproduire les tendances historiques observées pour les précipitations, en comparant les tendances simulées par les MCG avec les tendances historiques observées. Comme le présent travail se concentre sur

l'analyse des tendances que projettent les modèles, la validation d'autres types de résultats des MCG, tels que les quantités moyennes actuelles, ne sera pas effectuée,. Les données observées proviennent de Mekis et Hogg (1999) qui ont utilisé les données de précipitations de 491 stations météorologiques au Canada, puis les ont ajustées afin de corriger certains biais induits par différents facteurs tels que le vent, l'évaporation, la densité de neige, etc. Les données, sur une échelle mensuelle, couvrent la période 1900-2007 pour les régions plus peuplées du Canada et la période 1950-2007 pour le nord du pays. On peut avoir accès à ces données à partir de l'*Adjusted Historical Canadian Climate Dataset* (http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/hccd/) d'Environnement Canada. Pour les besoins de l'étude, nous avons eu accès à des données préalablement agrégées par krigeage sur une grille ayant une résolution de 50 km et qui couvre l'ensemble du territoire canadien. Ces données nous ont été fournies par M. Xuebin Zhang, d'Environnement Canada, qui les avait préalablement utilisées dans une étude sur les tendances historiques au Canada (voir section 2.1.2, et Zhang *et al.,* 2000).

La comparaison des séries observées avec les séries simulées par les MCG s'est effectuée en trois étapes. Premièrement, les données historiques ont été projetées sur la grille de référence selon la méthode décrite à la section 3.4 pour les données simulées. Dans un second temps, l'analyse des tendances présentes dans ces séries à chacune des tuiles sur la période commune de 1900 à 2007 (section 3.5) a été réalisée. Enfin, on a comparé les résultats des MCG avec ceux des données historiques. Pour cela, une inspection visuelle consistant à superposer sur une carte les résultats des données historiques et des GCM a d'abord été effectuée. Il est à noter que pour la période couverte (1900-2007), l'influence du scénario de GES devrait être peu importante en raison du fait que les scénarios A1B, A2 et B1 ne se distinguent qu'à partir de 2000 (voir section 2.2.2). Par souci de rigueur, il sera d'abord vérifié lors de l'inspection visuelle si des différences apparaissent pour la période couverte entre les trois scénarios de GES, et si ce n'est pas le cas, les résultats de ces trois scénarios seront par la suite regroupés. L'efficacité à reproduire les tendances, pour une simulation donnée, a été quantifiée en comparant tuile par tuile les tendances simulées et observées. Une matrice de confusion (voir par exemple Bonn et Rochon, 1992) a été utilisée afin d'en résumer les résultats. Pour un modèle k, un membre l et un scénario de gaz à effet de serre m, on considère uniquement les tuiles terrestres communes aux MCG et aux données historiques, en considérant tous les mois, et on calcule la matrice de confusion (voir tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Matrice de confusion

		Résultats des données simulées			
		1	**0**	**-1**	**Total**
Résultat des données historiques	**1**	$N_{1,1}^{\{k,l,m\}}$	$N_{1,0}^{\{k,l,m\}}$	$N_{1,-1}^{\{k,l,m\}}$	$N_{1,obs}^{\{k,l,m\}}$
	0	$N_{0,1}^{\{k,l,m\}}$	$N_{0,0}^{\{k,l,m\}}$	$N_{0,-1}^{\{k,l,m\}}$	$N_{0,obs}^{\{k,l,m\}}$
	-1	$N_{-1,1}^{\{k,l,m\}}$	$N_{-1,0}^{\{k,l,m\}}$	$N_{-1,-1}^{\{k,l,m\}}$	$N_{-1,obs}^{\{k,l,m\}}$
	Total	$N_{1,MCG}^{\{k,l,m\}}$	$N_{0,MCG}^{\{k,l,m\}}$	$N_{-1,MCG}^{\{k,l,m\}}$	$N_{total}^{\{k,l,m\}}$

$N_{1,1}^{\{k,l,m\}}$ représente le nombre de tuiles où les données historiques et les données simulées présentent une tendance positive, $N_{0,1}^{\{k,l,m\}}$ le nombre de tuiles où les données historiques ne présentent pas de tendances et les données simulées présentent une tendance positive et ainsi de suite. $N_{1,obs}^{\{k,l,m\}}$, $N_{0,obs}^{\{k,l,m\}}$ et $N_{-1,obs}^{\{k,l,m\}}$ représentent le nombre total de tuiles pour les données historiques présentant des tendances respectivement positives, non significatives et négatives. Puis, $N_{1,MCG}^{\{k,l,m\}}$, $N_{0,MCG\ 0}^{\{k,l,m\}}$, et $N_{-1,MCG}^{\{k,l,m\}}$ représentent la même chose, mais pour les données simulées par les MCG. Enfin, $N_{total}^{\{k,l,m\}}$ représente le nombre total de tuiles terrestres communes aux MCG et aux données historiques, peu importe leur tendance.

Par la suite, on peut calculer la matrice de confusion individuellement pour chaque MCG en regroupant les différents membres ensemble, de même que les scénarios de GES. Pour cela, on additionne simplement les différents éléments de la matrice de confusion entre les simulations d'un même modèle. Par exemple, pour un modèle donné, le nombre de tuiles où les données historiques et les données simulées présentent une tendance positive, défini par $N_{1,1}^{\{k\}}$, se calcule par :

$$N_{1,1}^{\{k\}} = \sum_{m(k)} \sum_{l(m,k)} N_{1,1}^{\{k,l,m\}} \qquad \textbf{(4)}$$

où *m(k)* représente les scénarios de GES disponibles pour le modèle, *l(m,k)* les membres disponibles pour le modèle et le scénario de GES, et enfin $N_{1,1}^{\{k,l,m\}}$ le nombre de tuiles où les données historiques et les données simulées présentent une tendance positive, pour chacune des simulations du modèle *k*.

Une fois la matrice de confusion établie pour un modèle donné, il est possible d'établir différents indices permettant de quantifier la capacité des modèles à reproduire les données historiques. Dans un premier temps, on peut calculer l'efficacité totale d'un modèle, que l'on définit par :

$$\eta_{totale}^{\{k\}} = \frac{N_{1,1}^{\{k\}} + N_{0,0}^{\{k\}} + N_{-1,-1}^{\{k\}}}{N_{total}^{\{k\}}} \qquad \textbf{(5)}$$

Deuxièmement, on peut définir l'efficacité de chaque modèle pour les trois cas de tendances, selon qu'elles soient positives significatives ($\eta_{1}^{\{k\}}$), négatives significatives ($\eta_{-1}^{\{k\}}$) ou non significatives ($\eta_{0}^{\{k\}}$), par :

$$\eta_{1}^{\{k\}} = \frac{N_{1,1}^{\{k\}}}{N_{1,obs}^{\{k\}}}, \quad \eta_{0}^{\{k\}} = \frac{N_{0,0}^{\{k\}}}{N_{0,obs}^{\{k\}}}, \quad \eta_{-1}^{\{k\}} = \frac{N_{-1,-1}^{\{k\}}}{N_{-1,obs}^{\{k\}}} \qquad \textbf{(6)}$$

Enfin, on peut calculer la répartition des tuiles dans chacune des trois catégories de tendances pour les modèles puis pour les données historiques. Dans le cas de chaque modèle, les pourcentages de tuiles présentant une tendance positive significative ($P_{1,MCG}^{\{k\}}$), négative significative ($P_{-1,MCG}^{\{k\}}$) et non significative ($P_{0,MCG}^{\{k\}}$) se calculent à l'aide de :

$$P^{\{k\}}_{1,MCG} = \frac{N^{\{k\}}_{1,MCG}}{N^{\{k\}}_{total}}, \quad P^{\{k\}}_{0,MCG} = \frac{N^{\{k\}}_{0,MCG}}{N^{\{k\}}_{total}}, \quad P^{\{k\}}_{-1,MCG} = \frac{N^{\{k\}}_{-1,MCG}}{N^{\{k\}}_{total}} \tag{7}$$

Dans le cas des données historiques, on se sert de l'ensemble des tuiles utilisées pour chaque modèle en raison du fait que les tuiles des données observées utilisées varient d'un modèle à l'autre. Les pourcentages de tuiles présentant chacun des trois cas de tendances ($P^{obs}_{1,obs}$, $P^{\{k\}}_{0,obs}$ et $P^{\{k\}}_{-1,obs}$) se calculent donc par :

$$P^{k}_{1,obs} = \frac{\sum_k N^{\{k\}}_{1,obs}}{\sum_k N^{\{k\}}_{total}}, \quad P^{\{k\}}_{0,obs} = \frac{\sum_k N^{\{k\}}_{0,obs}}{\sum_k N^{\{k\}}_{total}}, \quad P^{\{k\}}_{-1,obs} = \frac{\sum_k N^{\{k\}}_{-1,obs}}{\sum_k N^{\{k\}}_{total}} \tag{8}$$

Par exemple, soit les résultats fictifs présentés à la figure 3.6 :

a) Simulation $\{k,l,m\}$

1	1	0	-1	1
1	0	1	-1	-1
0	1	0	0	-1
1	0	-1	0	0
1	-1	-1	0	0

b) Observations

1	1	1	0	1
1	1	-1	-1	-1
1	1	0	0	-1
1	0	0	-1	0
0	0	-1	-1	-1

Figure 3.6 : Exemple de résultats lors de la comparaison des MCG et des données historiques. Le chiffre 1 indique une tendance positive, -1 une tendance négative et 0 une absence de tendances

Dans ce cas-ci, on obtiendrait la matrice de confusion présentée au tableau 3.3.

Tableau 3.3 : Exemple de matrice de confusion

		Résultats des données simulées			
		1	**0**	**-1**	**Total**
Résultat des données historiques	**1**	6	1	1	8
	0	3	4	3	10
	-1	0	3	4	7
	Total	9	8	8	25

Une fois la matrice de confusion établie, on peut par exemple définir l'efficacité de ce modèle (en considérant qu'il n'y a qu'une seule simulation) à partir de l'équation (5) :

$$\eta_{totale}^{\{k\}} = \frac{N_{1,1}^{\{k\}} + N_{0,0}^{\{k\}} + N_{-1,-1}^{\{k\}}}{N_{total}^{\{k\}}} = \frac{6+4+4}{25} = 0,56$$

Les autres indices décrits à l'aide des équations (6), (7) et (8) se calculeraient de la même façon à l'aide des éléments de la matrice de substitution et ne seront donc pas illustrés ici.

3.8 Combinaison des résultats des différents modèles

La dernière étape consiste à mettre en commun les résultats calculés à partir des séries de données de chaque tuile de la grille de référence, pour chaque simulation. Dans un premier temps, nous désirons établir quelle part des simulations présente des tendances significativement positives, significativement négatives ou non significatives (que l'on notera respectivement « + », « - » et « 0 ») pour une tuile donnée de la grille de référence.

À titre d'exemple, définissons d'abord un modèle A, possédant un certain nombre de membres pour un scénario de GES donné. Puis, concentrons-nous sur une tuile quelconque de ce modèle, que nous appellerons j, et désignons par $\left\{f_j^{A,+}, f_j^{A,-}, f_j^{A,0}\right\}$ les fractions des membres du modèle A qui présentent respectivement des tendances positive, négative ou non significative pour cette tuile

(par exemple, si deux membres du modèle A prédisent une tendance positive et trois membres ne prédisent aucun changement, on aura $f_j^{A,+} = 2/5$, $f_j^{A,0} = 3/5$ et $f_j^{A,-} = 0/5$). De la même façon, on définit pour un second modèle, que l'on appellera B, les fractions des membres qui présentent des tendances +, - ou 0 : $\left\{f_j^{B,+}, f_j^{B,-}, f_j^{B,0}\right\}$. Considérant ces deux modèles équiprobables, la combinaison de ces modèles se fait simplement en effectuant la moyenne :

$$\left\{f_j^+, f_j^-, f_j^0\right\} = \left\{\frac{f_j^{A,+} + f_j^{B,+}}{2}, \frac{f_j^{A,-} + f_j^{B,-}}{2}, \frac{f_j^{A,0} + f_j^{B,0}}{2}\right\} \tag{9}$$

où $\left\{f_j^+, f_j^-, f_j^0\right\}$ désigne la « probabilité » d'obtenir une tendance $\{+,-,0\}$, sur la tuile *j* de la grille de référence. Cet exemple simple s'extrapole aisément au cas où plus de deux modèles sont considérés (voir Annexe A).

Dans un second temps, l'estimation des écarts sur la moyenne entre 1900 et 2100 s'effectue comme suit. D'abord, procédons comme précédemment et définissons pour les modèles A et B $\left\{\Delta_j^{A,+}, \Delta_j^{A,-}\right\}$ et $\left\{\Delta_j^{B,+}, \Delta_j^{B,-}\right\}$, les écarts moyens observés pour un indice quelconque (voir section 3.6), moyennés sur les membres qui présentent des tendances + ou – (pour le cas où aucune tendance significative n'est détectée, on considère que $\Delta = 0$). Suite à cela, calculons l'écart moyen pour les tendances positives et négatives en combinant les différents modèles et on obtient :

$$\left\{\Delta_j^+, \Delta_j^-\right\} = \left\{\frac{\left(\Delta_j^{A,+} + \Delta_j^{B,+}\right)}{2}, \frac{\left(\Delta_j^{A,-} + \Delta_j^{B,-}\right)}{2}\right\} \tag{10}$$

Bien entendu, pour les tuiles où f_j^+ et f_j^- sont nuls, on ne calcule pas les valeurs de Δ_j^+ et Δ_j^-. Il est à noter que l'annexe A présente une version plus formelle des calculs utilisés.

3.9 Analyse du forçage anthropique

Un des aspects intéressants à considérer dans le cadre de cette étude est l'influence du scénario de GES sur les résultats. Une inspection visuelle a d'abord été réalisée afin de comparer les trois

cas (A1B, A2 et B1) et d'en extraire les grandes lignes. Puis, les capacités de chacun à induire des tendances dans les précipitations et les écoulements ont été comparées (afin de quantifier l'influence des scénarios de GES).

L'indice utilisé pour la comparaison est la probabilité de ne pas détecter de tendances significatives pour chacune des tuiles de la grille de référence selon les différents scénarios de GES. Les deux rapports suivants ont été définis :

$$u_1 = \frac{p_{B1}}{p_{A2}}$$
$$u_2 = \frac{p_{A1B}}{p_{A2}} \qquad \textbf{(11)}$$

où p_X est la probabilité de **ne pas** observer de tendance à la tuile considérée pour le scénario de GES X ($X = \{A2, A1B, B1\}$). À partir des valeurs de (u_1, u_2), six cas différents peuvent être définis, représentés par les régions A à F du graphique de la figure 3.7:

Région A : $u_1 > 1; u_2 > 1; u_1 > u_2 \Rightarrow p_{B1} > p_{A1B} > p_{A2}$

Région B : $u_1 > 1; u_2 > 1; u_1 < u_2 \Rightarrow p_{A1B} > p_{B1} > p_{A2}$

Région C : $u_1 > 1; u_2 < 1 \Rightarrow p_{B1} > p_{A2} > p_{A1B}$

Région D : $u_1 < 1; u_2 > 1 \Rightarrow p_{A1B} > p_{A2} > p_{B1}$

Région E : $u_1 < 1; u_2 < 1; u_1 < u_2 \Rightarrow p_{A2} > p_{A1B} > p_{B1}$

Région F : $u_1 < 1; u_2 < 1; u_1 > u_2 \Rightarrow p_{A2} > p_{B1} > p_{A1B}$

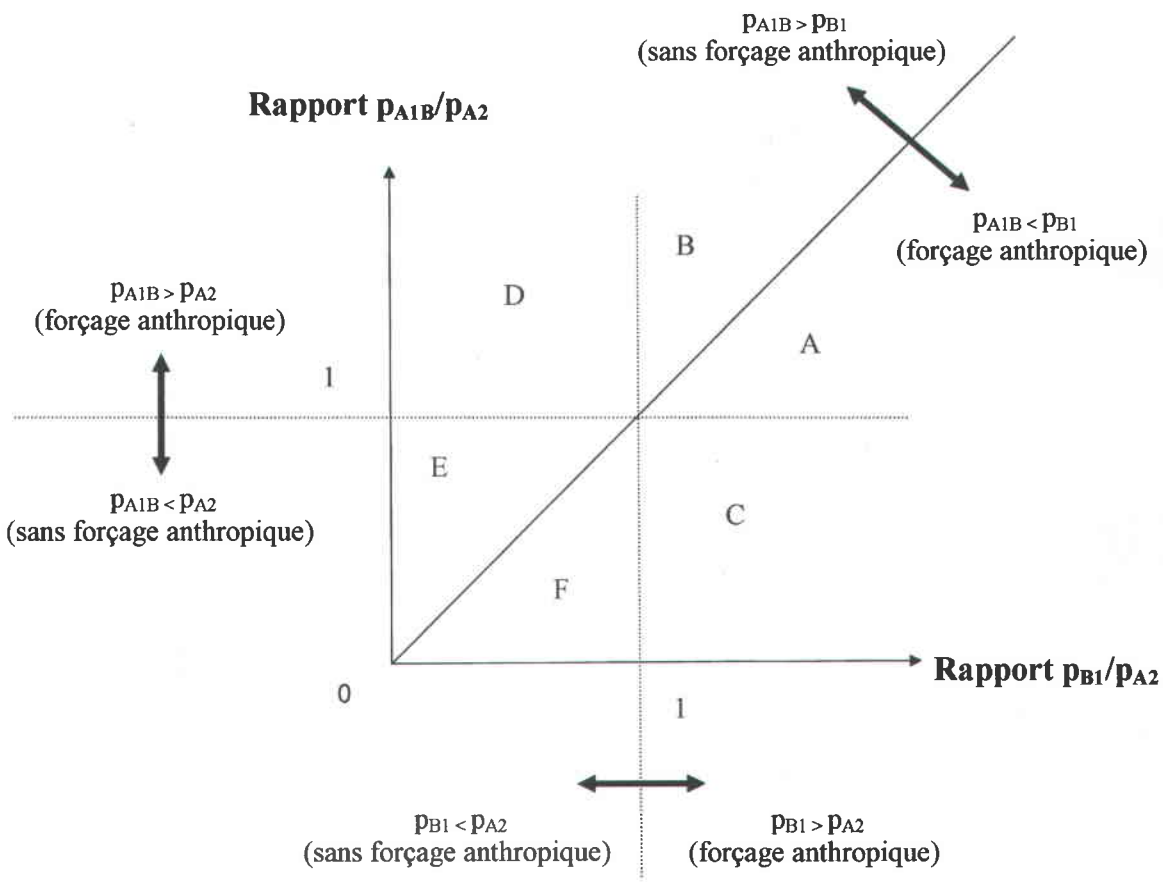

Figure 3.7 : Différentes régions du graphique des ratios $u_1 = p_{B1}/p_{A2}$ **et** $u_2 = p_{A1B}/p_{A2}$

En théorie, il serait vraisemblable de croire que plus le forçage anthropique sera élevé, plus la probabilité de ne pas avoir de tendances sera faible. Sachant que les émissions de GES sont plus élevées respectivement pour les scénarios A2, puis A1B et enfin B1, logiquement on pourrait s'attendre à ce que $p_{B1} > p_{A1B} > p_{A2}$, ce qui correspond à la région A du graphique de la figure 3.7. Dans cette optique, la majorité des tuiles devrait donc se retrouver dans la région A. De plus, si l'on compare le scénario le plus pessimiste (A2) et le plus optimiste (B1) (voir figure 2.3), on devrait s'attendre à une signature claire associée au fait que le forçage est prédominant pour A2. Cela devrait avoir pour conséquence que $p_{B1} > p_{A2}$, et donc que la majorité des tuiles devrait se situer dans la portion droite de la figure 3.7 (régions A, B ou C).

4. Résultats

Les différents résultats obtenus sont présentés dans ce chapitre. Dans un premiers temps, la section 4.1 présente la comparaison entre les résultats de tendance des MCG pour les précipitations avec les données historiques pour le Canada. Puis, la section 4.2 présente les résultats relatifs aux précipitations. Enfin, la section 4.3 fait de même, mais cette fois-ci pour les écoulements.

4.1 Comparaison entre les données historiques et les MCG

Cette première section couvre la comparaison effectuée entre les données historiques mensuelles de précipitations et les séries provenant des MCG (voir section 3.7). La période couverte s'étend de 1900 à 2007 et la région traitée est le sud du Canada (les États-Unis ne sont pas couverts par les données historiques disponibles et les données ne sont disponibles qu'à partir de 1950 dans le nord du Canada). Dans un premier temps, on a vérifié si des tendances significatives étaient présentes pour chaque tuile de la grille de référence pour les données historiques mensuelles. Les résultats obtenus reproduisent ceux publiés précédemment dans Zhang *et al.* (2000); le lecteur est invité à consulter cet article pour plus de détails sur ces résultats. Par la suite, on a répété les analyses de tendances de la section 3.5 sur les MCG, mais en utilisant la période commune aux données historiques, qui est de 1900 à 2007. Les cartes de la figure 4.1 présentent les résultats combinés des données historiques et des MCG, pour le scénario A2 (les scénarios B1 et A1B sont présentés à l'annexe F). L'examen de ces figures permet d'établir les constats suivants :

- Pour la période 1900-2007, les MCG reproduisent les mêmes structures régionales que pour 1900-2100 (par exemple, en été, les précipitations de la côte ouest ont une plus forte probabilité de tendance à la baisse que dans les autres régions). Par contre, les probabilités de détecter des tendances sont beaucoup plus faibles pour la période 1900-2007 (inférieures à 15 %) que pour la période 1900-2100.

- Il semble n'y avoir que peu ou pas de liens spatiaux entre les tuiles où des tendances ont été détectées sur les données historiques et les régions des MCG où la probabilité d'obtenir des tendances est élevée.

- Les données historiques ne suggèrent aucune tendance à la baisse significative, et ce, pour tous les mois.

- Aucun mois ne semble se démarquer par rapport aux autres et par rapport à la capacité des modèles à reproduire les tendances.

- Il existe peu de différences entre les scénarios A2, A1B et B1 sur la période 1900-2007 si on compare la figure 4.1 à celles de l'annexe F (voir section 3.7). Pour la suite de la comparaison entre les MCG et les données historiques, les différents scénarios seront donc mis en commun.

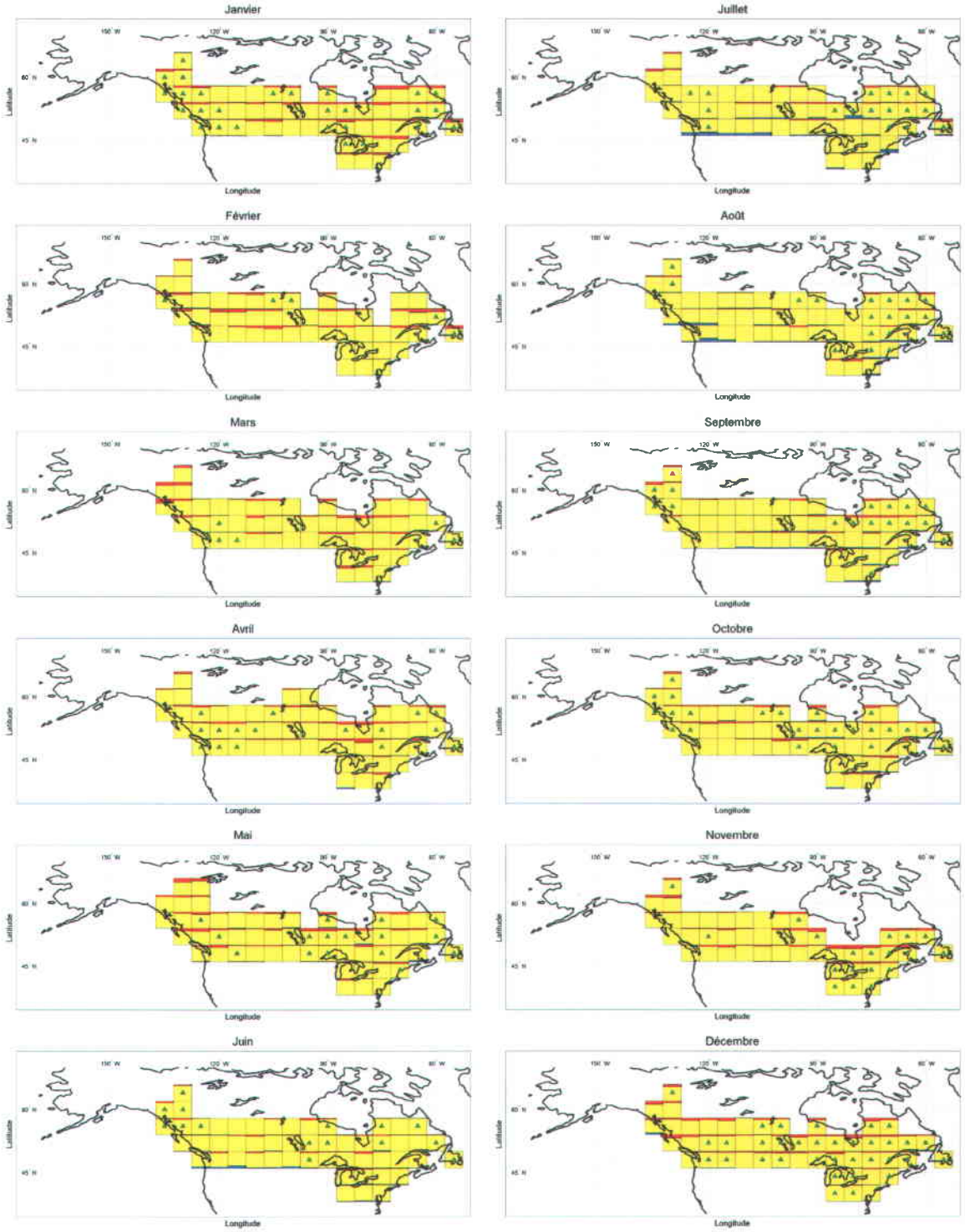

Figure 4.1 : Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2007 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante). Un triangle pointé vers le haut (tendance positive) ou le bas (négative) indique qu'une tendance significative a été détectée pour cette tuile avec les données historiques.

L'étape suivante consiste à établir les matrices de confusion pour chacun des modèles. Le tableau 4.1 présente ces dernières.

Tableau 4.1 : Matrice de confusion entre les données historiques et chacun des modèles pour les précipitations mensuelles, sur la période 1900-2007, tous mois et tous scénarios de GES confondus. L'absence de la ligne «-1 » pour les données historiques s'explique par le fait qu'aucune tuile ne montre de telles tendances pour les séries historiques.

Modèle BCCR-BCM2					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**38**	754	15	807
	0	58	**1120**	19	1197
	Total	96	1874	34	2004

Modèle CCSM3					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**334**	3763	34	4131
	0	410	**6595**	67	7072
	Total	744	10358	101	11203

Modèle CGCM3 T47					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**582**	2348	10	2940
	0	809	**5068**	78	5955
	Total	1391	7416	88	8895

Modèle CNRM CM3					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**45**	464	7	516
	0	69	**941**	22	1032
	Total	114	1405	29	1548

Modèle CSIRO Mk3.0					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**10**	379	3	392
	0	16	**727**	15	758
	Total	26	1106	18	1150

Modèle CSIRO Mk3.5					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**24**	560	4	588
	0	48	**1089**	0	1137
	Total	72	1649	4	1725

Modèle ECHAM5					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**84**	1905	11	2000
	0	156	**3674**	40	3870
	Total	240	5579	51	5870

Modèle ECHO_G					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**87**	1481	16	1584
	0	117	**3155**	49	3321
	Total	204	4636	65	4905

Modèle FGOALS-g1.0					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**65**	1387	18	1470
	0	114	**2332**	26	2472
	Total	179	3719	44	3942

Modèle GFDL-CM2.0					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**34**	647	9	690
	0	57	**1149**	27	1233
	Total	91	1796	36	1923

Modèle GFDL-CM2.1					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**66**	665	4	735
	0	59	**1152**	25	1236
	Total	125	1817	29	1971

Modèle GISS-AOM					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**45**	755	8	808
	0	78	**1502**	16	1596
	Total	123	2257	24	2404

Modèle GISS-EH					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**18**	519	12	549
	0	57	**1046**	28	1131
	Total	75	1565	40	1680

Modèle GISS-ER					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**24**	696	12	732
	0	55	**1414**	39	1508
	Total	79	2110	51	2240

Modèle INM-CM3.0					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**25**	557	0	582
	0	104	**992**	11	1107
	Total	129	1549	11	1689

Modèle IPSL-CM4					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**54**	688	14	756
	0	68	**1168**	15	1251
	Total	122	1856	29	2007

Modèle MIROC3.2 HIRES					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**19**	204	1	224
	0	31	**377**	3	411
	Total	50	581	4	635

Modèle MIROC3.2 MEDRES					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**104**	1151	5	1260
	0	85	**2235**	74	2394
	Total	189	3386	79	3654

Modèle MRI-CGCM2.3.2 a					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**165**	3966	39	4170
	0	240	**5483**	127	5850
	Total	405	9449	166	10020

Modèle PCM1					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**124**	2400	16	2540
	0	260	**3595**	45	3900
	Total	384	5995	61	6440

Modèle UKMO-HadCM3					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**32**	578	5	615
	0	73	**1072**	7	1152
	Total	105	1650	12	1767

Modèle UKMO-HadGEM1					
		Résultats des données simulées			
		1	0	-1	Total
Résultat des données historiques	1	**14**	201	4	219
	0	14	**374**	16	404
	Total	28	575	20	623

L'efficacité de chaque modèle a par la suite été quantifiée en utilisant la démarche décrite à la section 3.7. La figure 4.2 présente l'efficacité de chaque MCG à reproduire le signe des tendances des données historiques (équation 5).

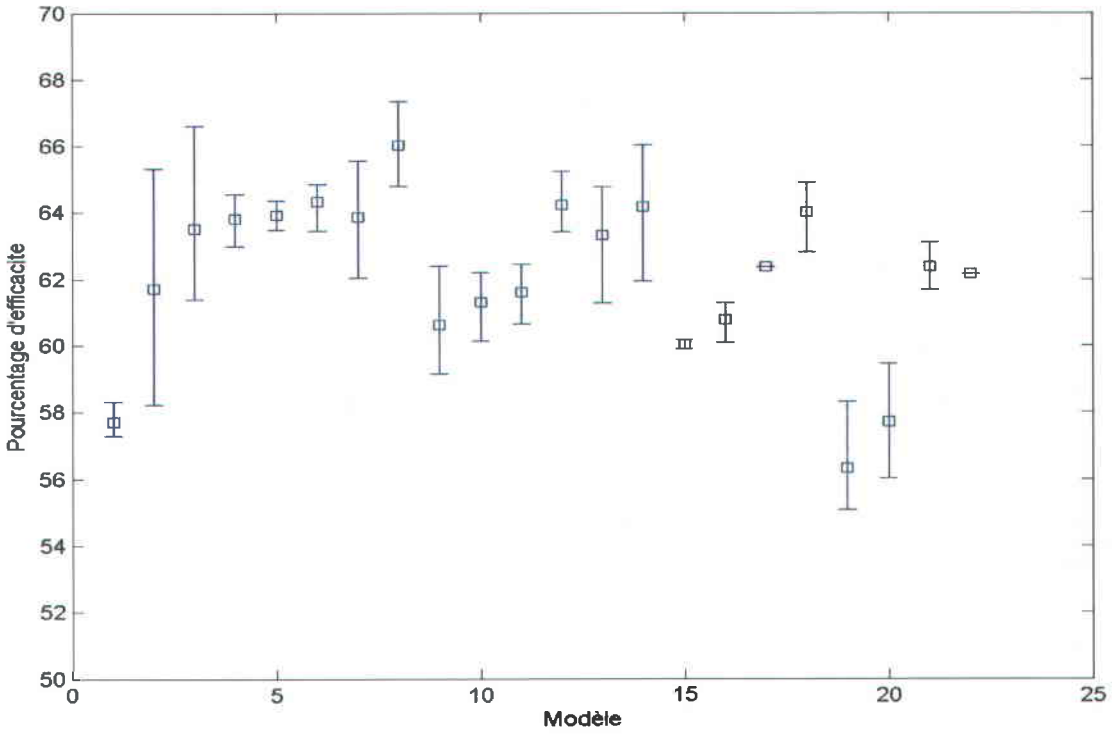

Figure 4.2 : Pourcentage d'efficacité de chaque MCG à reproduire les tendances des données historiques, tous mois et tous scénarios de GES confondus. Les numéros des modèles en abscisse correspondent à leur ordre numérique dans la liste du tableau 3.1. Les carrés représentent la moyenne d'efficacité des simulations du modèle, alors que les barres d'incertitudes représentent les simulations ayant respectivement les efficacités minimales et maximales pour ce modèle

L'efficacité de chaque modèle varie entre 55 et 68 % respectivement, ce qui pourrait, à première vue, être considéré comme relativement bon. Toutefois, un point important à considérer est l'apport des tuiles présentant une tendance significative sur ce pourcentage d'efficacité. Ainsi, le tableau 4.2 présente la capacité de chaque modèle à reproduire les tendances selon qu'elles soient positives, négatives ou sans tendance (équation 6). En d'autres termes, si une tuile des données historiques présente une certaine tendance $\{+,0,-\}$, on veut savoir quelle est la probabilité que la tuile équivalente du MCG reproduise la même tendance. Enfin, le tableau 4.3 présente la répartition des tuiles pour chaque modèle et pour les données historiques, selon qu'une tendance positive, négative où non significative soit observée (équations 7 et 8).

Tableau 4.2 : Pourcentage d'efficacité de chaque MCG à reproduire les tendances des données historiques de précipitations, tous mois et tous scénarios de GES confondus, en considérant séparément les tuiles des données historiques présentant des tendances positives, négatives ou non significatives. L'absence de la colonne « Tuiles avec tendance négative » s'explique par le fait qu'aucune tuile ne montre de telles tendances pour les séries historiques.

Modèle	$\eta_1^{\{k\}}$	$\eta_0^{\{k\}}$
BCCR-BCM2	4,7	93,6
CCSM3	8,1	93,3
CGCM3 T47	19,8	85,1
CNRM CM3	8,7	91,2
CSIRO Mk3.0	2,6	95,9
CSIRO Mk3.5	4,1	95,8
ECHAM5	4,2	94,9
ECHO_G	5,5	95,0
FGOALS-g1.0	4,4	94,3
GFDL-CM2.0	4,9	93,2
GFDL-CM2.1	9,0	93,2
GISS-AOM	5,6	94,1
GISS-EH	3,3	92,5
GISS-ER	3,3	93,8
INM-CM3.0	4,3	89,6
IPSL-CM4	7,1	93,4
MIROC3.2 HIRES	8,5	91,7
MIROC3.2 MEDRES	8,3	93,4
MRI-CGCM2.3.2 a	4,0	93,7
PCM1	4,9	92,2
UKMO-HadCM3	5,2	93,1
UKMO-HadGEM1	6,4	92,6

Tableau 4.3 : Répartition des tuiles pour chaque modèle selon qu'elles présentent une tendance positive, négative ou non significative sur les données de précipitations mensuelles, tous mois et tous scénarios de GES confondus. La dernière ligne présente les mêmes résultats, mais pour les données historiques.

	Pourcentage des tuiles présentant un type de tendance		
Modèle	**Tendance +**	**Tendance non significative**	**Tendance -**
BCCR-BCM2	4,8	93,5	1,7
CCSM3	6,7	92,4	0,9
CGCM3 T47	15,8	83,2	1,0
CNRM CM3	7,4	90,8	1,9
CSIRO Mk3.0	2,3	96,2	1,6
CSIRO Mk3.5	4,2	95,6	0,2
ECHAM5	4,1	95,1	0,9
ECHO_G	4,2	94,5	1,3
FGOALS-g1.0	4,6	94,3	1,1
GFDL-CM2.0	4,8	93,4	1,8
GFDL-CM2.1	6,4	92,2	1,4
GISS-AOM	5,2	93,8	1,0
GISS-EH	4,5	93,2	2,4
GISS-ER	3,5	94,2	2,3
INM-CM3.0	7,6	91,7	0,6
IPSL-CM4	6,2	92,3	1,4
MIROC3.2 HIRES	7,8	91,5	0,6
MIROC3.2 MEDRES	5,3	92,7	2,1
MRI-CGCM2.3.2 a	4,1	94,3	1,6
PCM1	5,9	93,2	0,9
UKMO-HadCM3	6,0	93,3	0,7
UKMO-HadGEM1	4,6	92,3	3,1
Données historiques	**36,1**	**63,8**	**0,0**

Sans équivoque, les résultats des tableaux précédents suggèrent que les modèles ont de la difficulté à reproduire les tendances positives. Cela va dans le sens de ce qui a été dit précédemment, soit que la probabilité d'observer des tendances sur la période 1900-2007 est très faible pour les MCG (moins de 15 %), tandis que près de 36 % des tuiles prédisent des tendances à la hausse pour les données historiques. Cela signifie que la « bonne » efficacité des modèles à reproduire les mêmes tendances $\{+,0,-\}$ que les données historiques provient du fait que les modèles ne prédisent presque systématiquement aucune tendance (plus de 90 % du temps) et donc que la majorité des tuiles des données historiques ne présentant pas de tendances sont reproduites correctement par les MCG. Comme environ 60 % des tuiles des données historiques ne présentent pas de tendance, on obtient alors une efficacité d'environ 60 % également, d'où l'apparente bonne performance des modèles sur la base de l'examen de la figure 4.2. Les implications de ces résultats seront discutées au chapitre suivant.

Par ailleurs, un des résultats se démarquant du lot est la performance du modèle CGCM3 T47, qui présente près du double de tuiles ayant une tendance positive (et par la même occasion, le double de pourcentage d'efficacité pour ce type de tendance) avec 15 %. Bien que cela représente une bonne performance dans cette catégorie, sa performance pour les tuiles sans tendance (86 %) constitue la quatrième dernière sur l'ensemble des modèles. Sa performance totale est donc bonne par rapport aux autres modèles, selon la figure 4.2, mais pas exceptionnelle. Ce dernier point constitue la raison pour laquelle ce modèle ne sera pas privilégié au détriment des autres. De la même façon, aucun modèle ne sera rejeté en raison du fait que tous les modèles ont des performances également discutables.

4.2 Tendances sur les précipitations

La section 4.2 porte sur les résultats relatifs aux précipitations. Premièrement, la probabilité d'obtenir des tendances significatives est abordée (section 4.2.1). Puis, les écarts relatifs sur la période 1900-2100 pour l'ensemble du territoire sont présentés (section 4.2.2). Enfin, l'impact des actions anthropiques sur les tendances sera analysé (section 4.2.3).

4.2.1 Probabilité d'obtenir des tendances

Dans un premier temps, la figure 4.3 présente les probabilités d'obtenir des tendances positives, négatives ou non significatives pour la période 1900-2100 avec le scénario de GES A2 (les résultats des scénarios A1B et B1 sont donnés à l'annexe B, mais globalement, les conclusions se dégageant de ces scénarios sont les mêmes que pour le scénario A2). Les résultats sont disponibles pour toutes les tuiles terrestres de la grille commune. On peut formuler certaines observations à partir des résultats obtenus. Tout d'abord, la grande majorité des modèles semble indiquer que des augmentations des précipitations hivernales sont à prévoir pour le nord-ouest du Canada, le Québec et l'Ontario. Une augmentation en hiver est également à envisager pour les Prairies canadiennes, mais dans une moindre mesure. Les mois particulièrement touchés dans tous ces cas sont les mois d'octobre à mai, bref les mois les plus froids. Par ailleurs, on distingue une forte probabilité, si l'on se base sur les modèles, que des diminutions de précipitations soient observées dans la région du nord-ouest des États-Unis et le sud de la Colombie-Britannique, pour les mois estivaux. Dans les autres cas, on observe plutôt un état stationnaire.

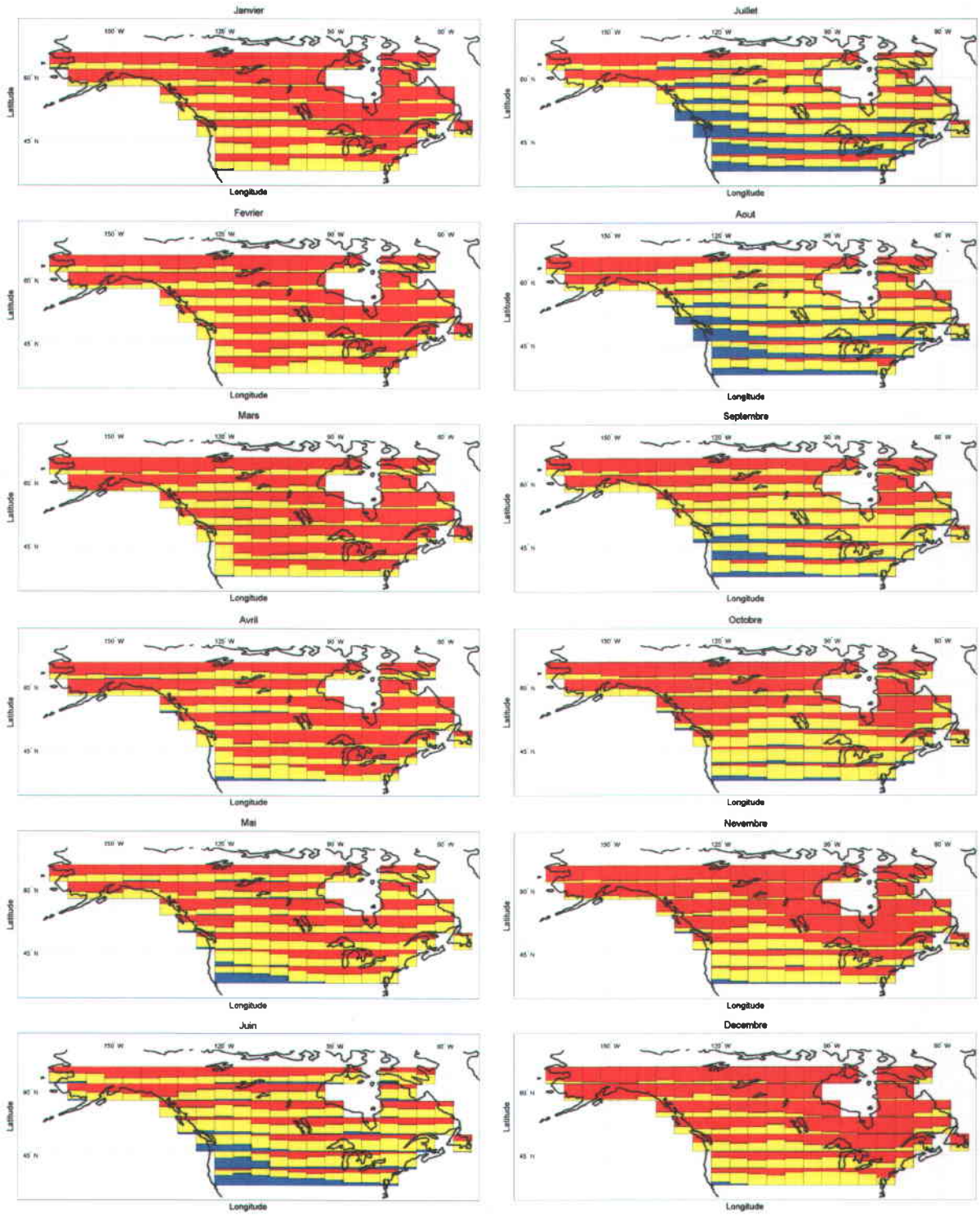

Figure 4.3 : Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

4.2.2 Écarts moyens pour la période 1900-2100

Cette section présente les cartes des écarts moyens sur la période 1900-2100, établis à partir de l'ensemble des simulations disponibles (voir section 3.6). Pour chaque tuile de la grille de référence, on peut observer à la figure 4.4, en pourcentage, l'écart moyen entre 1900 et 2100 pour les cas où une tendance significative constitue le scénario le plus probable; l'écart est alors calculé à partir des écarts prévus pour cette même tendance. Dans les cas où un état stationnaire est à prévoir, l'écart moyen n'est pas présenté (représenté par une case jaune entière). Enfin, le scénario de GES présenté ici est le A2 (les cartes correspondantes pour les scénarios A1B et B1 sont disponibles à l'annexe C, mais les conclusions qui s'en dégagent sont les mêmes que pour le scénario A2).

L'examen de la figure 4.4 permet d'observer différentes structures qui se dégagent des résultats, lesquelles s'apparentent beaucoup à celles de la section 4.2.1. Tout d'abord, la région entourant la baie d'Hudson et le nord-ouest du Canada devrait subir les augmentations de précipitations les plus importantes, de l'ordre de 10 à 20 %. Ces hausses devraient être particulièrement élevées pour les mois hivernaux. Dans les régions plus au sud, de faibles augmentations (moins de 15 %) pourraient également être observées en hiver, mais d'amplitude moindre qu'au nord. Durant les mois d'été, l'état stationnaire semble dominer partout, sauf pour l'Extrême Nord-Ouest canadien, où de faibles augmentations sont à prévoir, et pour le Nord-Ouest américain, où des diminutions allant de 10 à 20 % risquent de se produire.

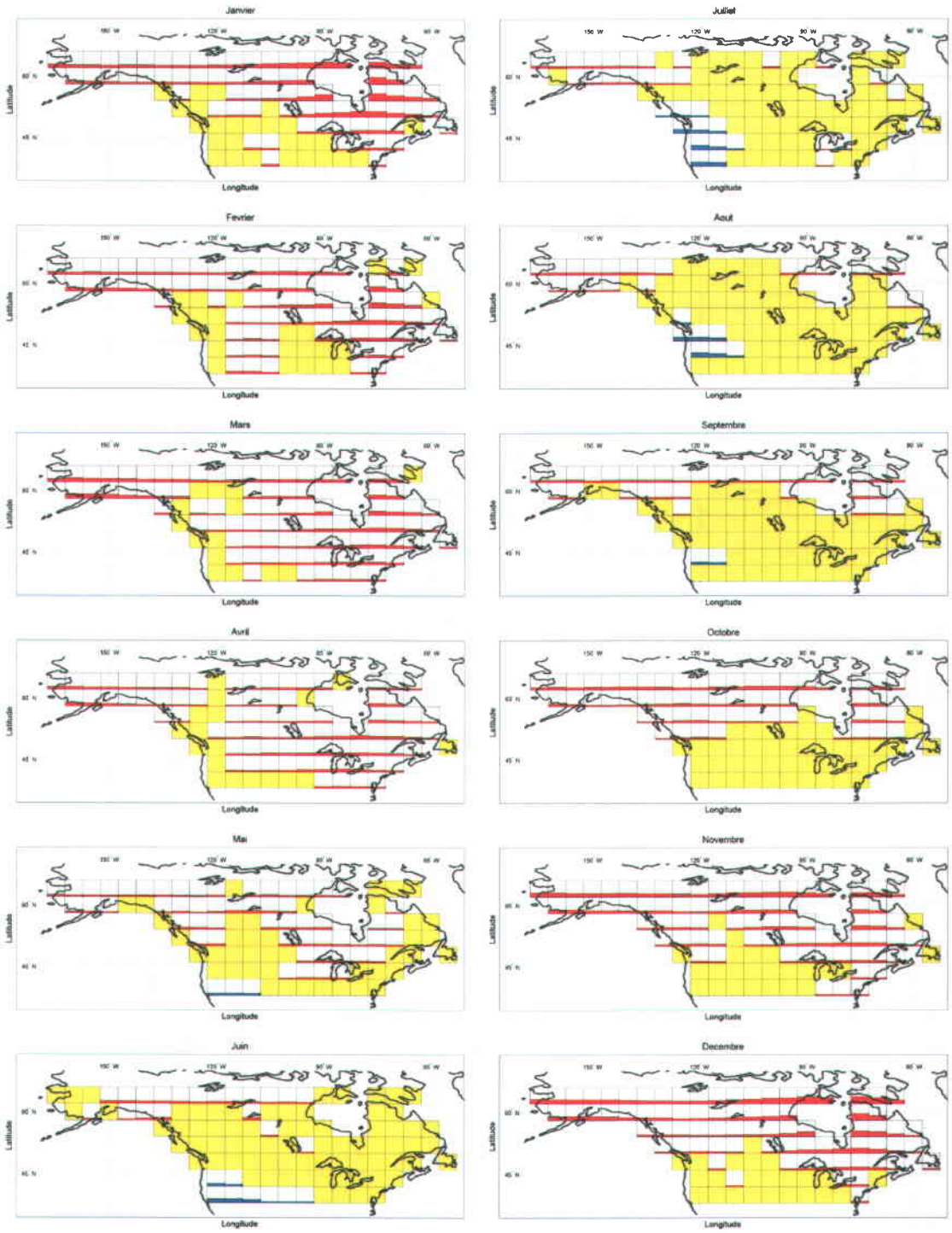

Figure 4.4 : Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en 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 un écart relatif de 100 %

4.2.3 Influence du forçage anthropique

Un dernier point à considérer pour les précipitations est l'influence du forçage anthropique, qui indiquerait jusqu'à quel point les tendances sur les précipitations sont influencées par les GES (voir section 3.9). Les résultats sont présentés aux figures 4.5 et 4.6, où chaque point représente les rapports B1/A2 et A1B/A2, pour une tuile de la grille de référence.

Comme il a été dit précédemment, dans le cas où les GES influencent les tendances sur les précipitations, on devrait s'attendre à une majorité de points dans la région A. De plus, on devrait également observer une différence nette entre les scénarios antagonistes A2 et B1, ce qui devrait s'illustrer par une majorité de tuiles dans les régions A, B et C.

À la lumière des résultats, il est intéressant de constater qu'une forte concentration de points se retrouve effectivement dans les régions A et C, ce qui semble confirmer l'impact du forçage anthropique sur les précipitations. En effet, cela indique que la probabilité de ne pas avoir de tendance est beaucoup plus élevée dans le scénario B1, ou scénario de faible émission de GES. Cela s'observe également quantitativement alors que, selon le tableau 4.4, plus de 80 % des tuiles indiquent que $p_{B1} > p_{A2}$ et que $p_{B1} > p_{A1B}$. Par contre, le fait qu'il y ait peu de différence entre les régions A et C suggère que la différence est moins marquée entre les scénarios A2 et A1B qu'entre les scénarios A2 et B1. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les scénarios A1B et A2 sont très apparentés jusqu'à 2050 environ, tel qu'il est montré à la figure 2.3. Enfin, au niveau mensuel, les résultats indiquent que les mois d'automne et d'hiver sont les plus influencés par l'action anthropique, ce qui est cohérent avec le fait que ces mois sont ceux où l'on observe les plus fortes probabilités de tendance. Il est à noter que l'échelle saisonnière aurait également pu être considérée, mais n'a pas été retenue par souci de concision.

Tableau 4.4 : Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A2}$, $p_{B1} > p_{A1B}$ ou $p_{A1B} > p_{A2}$ pour les séries des précipitations

Mois	Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A2}$ (régions A, B, C)	Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A1B}$ (régions A, C, F)	Fraction de tuiles avec $p_{A1B} > p_{A2}$ (régions A, B, D)
Janvier	0,90	0,82	0,53
Février	0,88	0,86	0,64
Mars	0,88	0,87	0,58
Avril	0,91	0,89	0,65
Mai	0,78	0,81	0,53
Juin	0,87	0,84	0,50
Juillet	0,85	0,88	0,49
Août	0,89	0,88	0,52
Septembre	0,92	0,95	0,49
Octobre	0,94	0,88	0,71
Novembre	0,95	0,83	0,65
Décembre	0,94	0,85	0,63

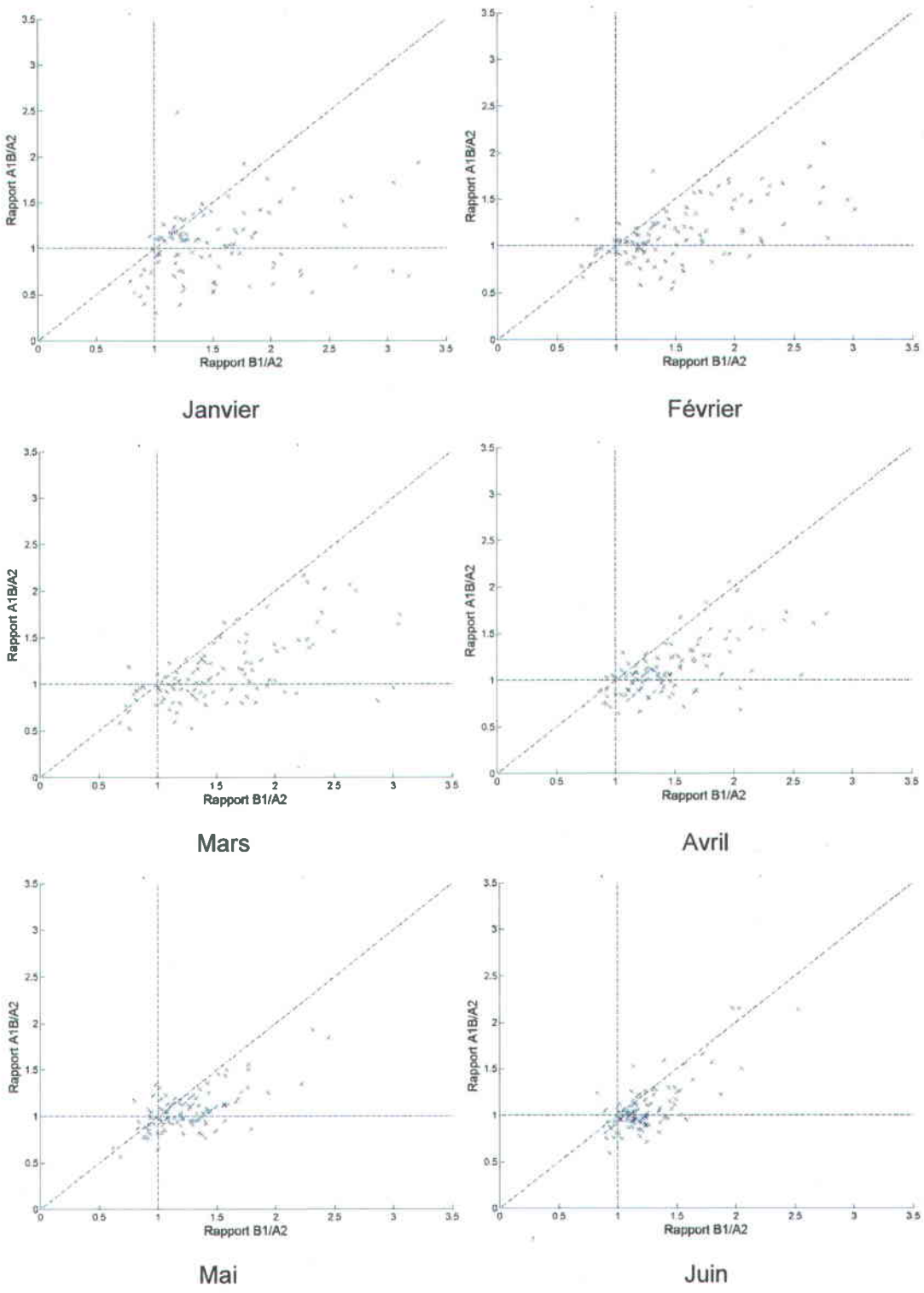

Figure 4.5 : Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les précipitations mensuelles pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de janvier à juin

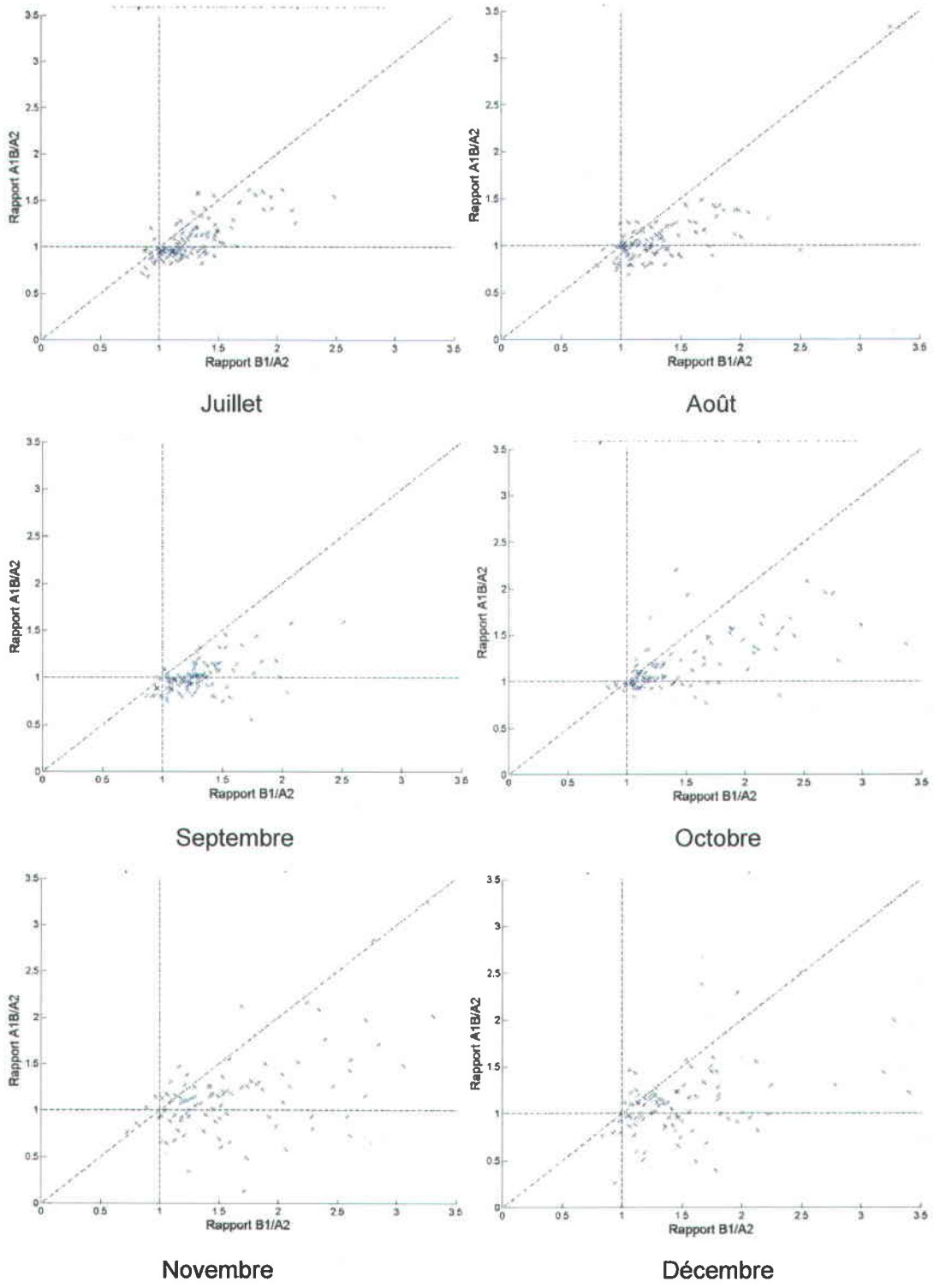

Figure 4.6 : Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les précipitations mensuelles pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de juillet à décembre

4.3 Tendances sur les écoulements

La section 4.3 porte sur les résultats relatifs aux écoulements, lesquels se calculent à partir d'un bilan fermé impliquant l'apport des précipitations, les pertes dues à l'évapotranspiration et enfin les changements dans les réserves d'eau dans le sol et dans le couvert nival. Premièrement, la probabilité d'obtenir des tendances significatives est abordée (section 4.3.1). Puis, les écarts relatifs sur la période 1900-2100 pour l'ensemble du territoire sont présentés (section 4.3.2). Enfin, l'impact des actions anthropiques sur les tendances sera analysé (section 4.3.3).

4.3.1 Probabilité d'apparition des tendances

La figure 4.7 présente les probabilités d'obtenir des tendances +, 0 ou - pour les écoulements. Comme pour les précipitations (section 4.2.1), la période traitée va de 1900 à 2100 et le scénario de GES présenté est le A2 (voir l'annexe D pour les résultats des scénarios B1 et A1B; les conclusions relatives au scénario A2 s'appliquent toutefois également pour ces derniers). Après inspection de ces résultats, différentes structures spatiales et temporelles semblent se dégager.

Tout d'abord, on observe que la majorité des modèles suggère une augmentation des écoulements pour les mois d'octobre à mars. Cette hausse semble être à son apogée aux mois de décembre et de janvier, pour se résorber au printemps. On observe également une zone de forte probabilité de diminution des écoulements se développant progressivement au cours du printemps et s'étendant pour atteindre son extension spatiale maximale (partout sauf la région du centre) durant l'été. Enfin, une des zones qui semble la moins influencée est le centre du Canada et des États-Unis, alors qu'aucune tendance ne se démarque entre les mois de mai et de septembre.

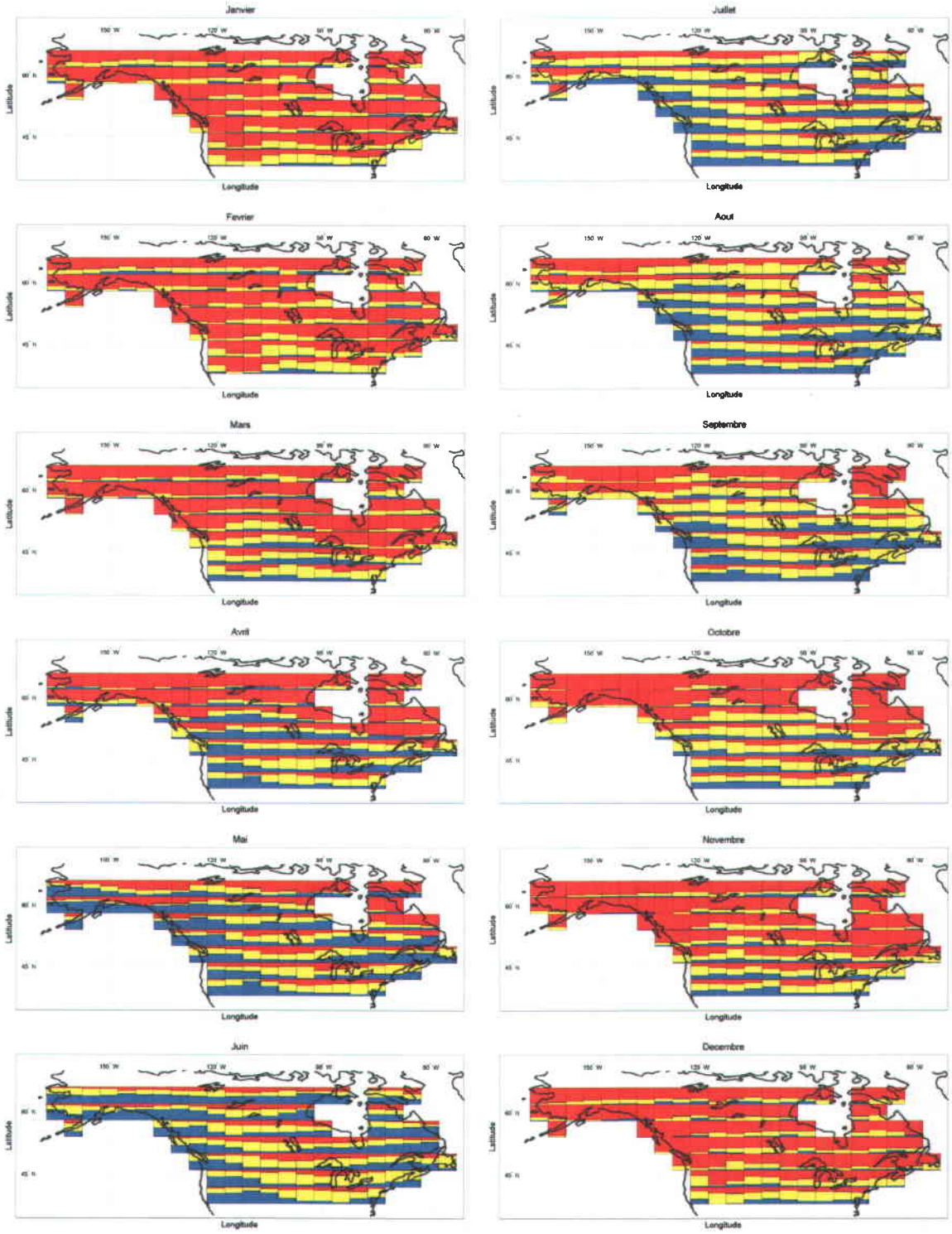

Figure 4.7 : Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A2 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

4.3.2 Écarts moyens pour la période 1900-2100

Si l'on s'attarde maintenant aux écarts moyens (voir section 3.6), la figure 4.8 présente les résultats pour chaque tuile de la grille de référence. Le scénario de GES retenu ici est le A2 (voir annexe E pour les scénarios A1B et B1). Pour chaque tuile de la grille de référence, on peut observer, en pourcentage, l'écart moyen entre 1900 et 2100 pour les cas où une tendance significative constitue le scénario le plus probable. Dans les cas où un état stationnaire est à prévoir, l'écart moyen est considéré nul et est représenté par une case jaune entière.

Une des premières remarques que l'on peut formuler à la vue de ces cartes est le fait qu'on observe dans plusieurs cas une augmentation des écoulements supérieure à 100 % (représentée par des tuiles marron). Cela s'explique par le fait que, pour ces tuiles (situées surtout au nord), les écoulements en climats passé et présent sont très faibles, voire nuls, particulièrement en hiver. Conséquemment, une hausse en valeur absolue des écoulements, même très modeste, se manifeste par une hausse importante en écart relatif. Cela pourrait également s'expliquer par l'atteinte de températures assez élevées pour permettre une fonte du couvert nival, ce que ces régions ne rencontraient pas nécessairement auparavant.

Parmi les grandes structures spatiales et temporelles qui se dégagent, la plus importante semble couvrir la période s'étendant d'octobre à avril, où de fortes augmentations des écoulements (supérieures à 100 %) sont prévues, particulièrement dans le nord. Au plus fort de cette période, soit au cours des mois de décembre et janvier, c'est presque la totalité du territoire (à l'exception du centre-sud) qui subit cette importante hausse. Par la suite, entre les mois d'avril et de septembre, on observe, à l'inverse, des diminutions d'écoulement variant autour de 10 à 20 %. Les régions touchées par ces diminutions sont principalement la côte ouest et le contour de la baie d'Hudson, et atteignent la quasi-totalité des régions côtières aux mois de mai et de juin.

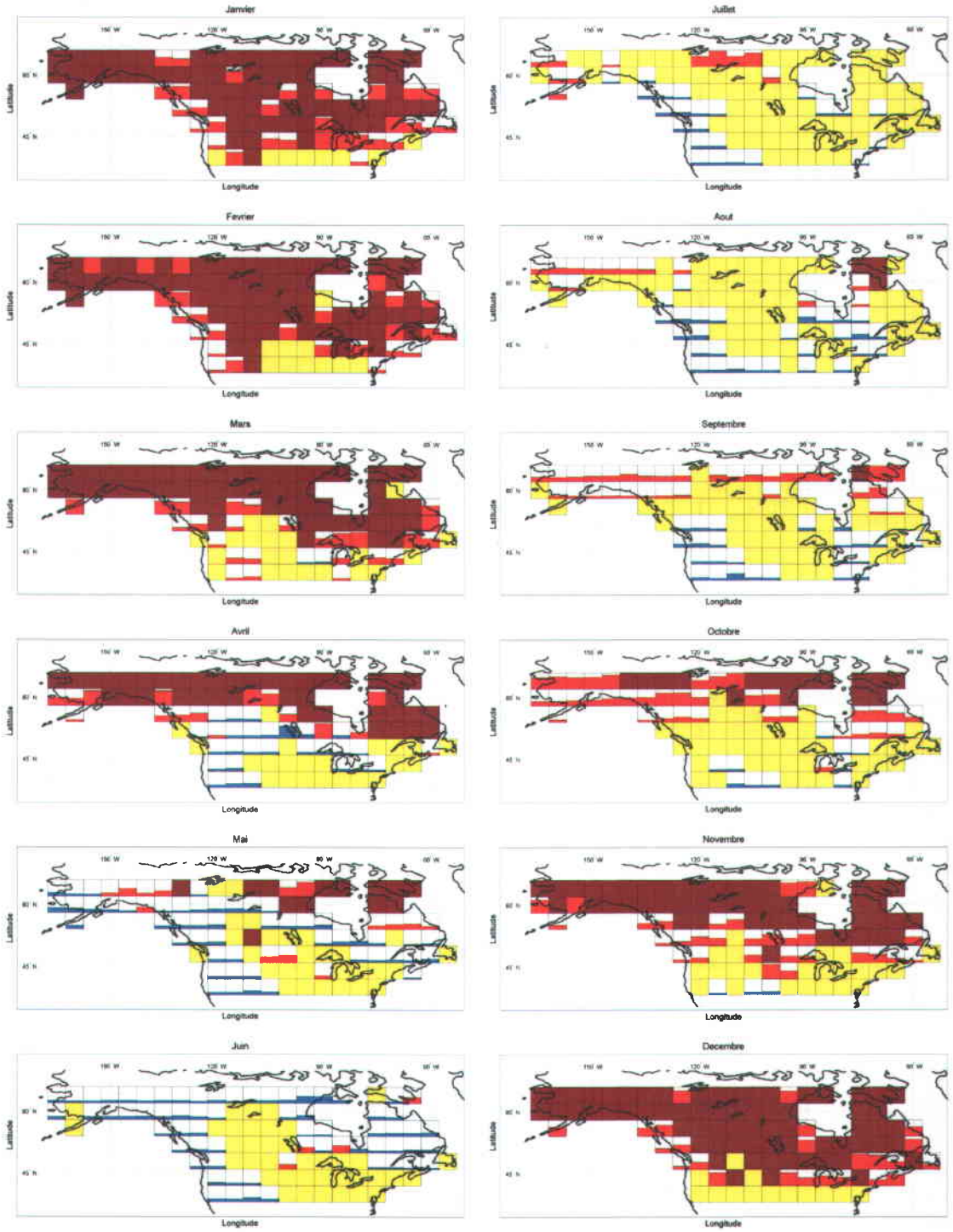

Figure 4.8 : Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (scénario de GES A2). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (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 un écart relatif de 100 %. Les tuiles marron présentent des accroissements de plus de 100 %.

4.3.3 Influence du forçage anthropique

Une comparaison des résultats obtenus pour les écoulements selon les différents scénarios de GES a été réalisée, tel qu'elle est décrite à la section 3.9. Les figures 4.9 et 4.10 présentent les résultats de cette analyse. On retrouve encore une majorité de tuiles situées dans les régions A et C ($p_{B1} > p_{A2}$ et $p_{B1} > p_{A1B}$), mais cette prépondérance n'est pas aussi nette que dans le cas des précipitations (voir section 4.2.3). En effet, alors que plus de 80 % des tuiles indiquaient que $p_{B1} > p_{A2}$ et $p_{B1} > p_{A1B}$ pour les précipitations, seulement de 60 à 80 % vont dans ce sens pour les écoulements. De plus, la différence entre les scénarios A2 et A1B semble pratiquement nulle. Cela semble indiquer que l'influence du forçage anthropique est moins importante dans le cas des écoulements, peut-être en raison de l'interaction entre les nombreux phénomènes impliqués (voir chapitre 5 pour la discussion sur ce sujet). Enfin, au niveau mensuel, les résultats indiquent que les mois d'été et d'hiver sont les moins influencés par l'action anthropique, ce qui ne concorde pas avec le fait que ces mois sont ceux où l'on observe les plus fortes probabilités de tendance.

Tableau 4.5 : 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 $p_{B1} > p_{A2}$ (régions A, B, C)	Fraction de tuiles avec $p_{B1} > p_{A1B}$ (régions A, C, F)	Fraction de tuiles avec $p_{A1B} > p_{A2}$ (régions A, B, D)
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

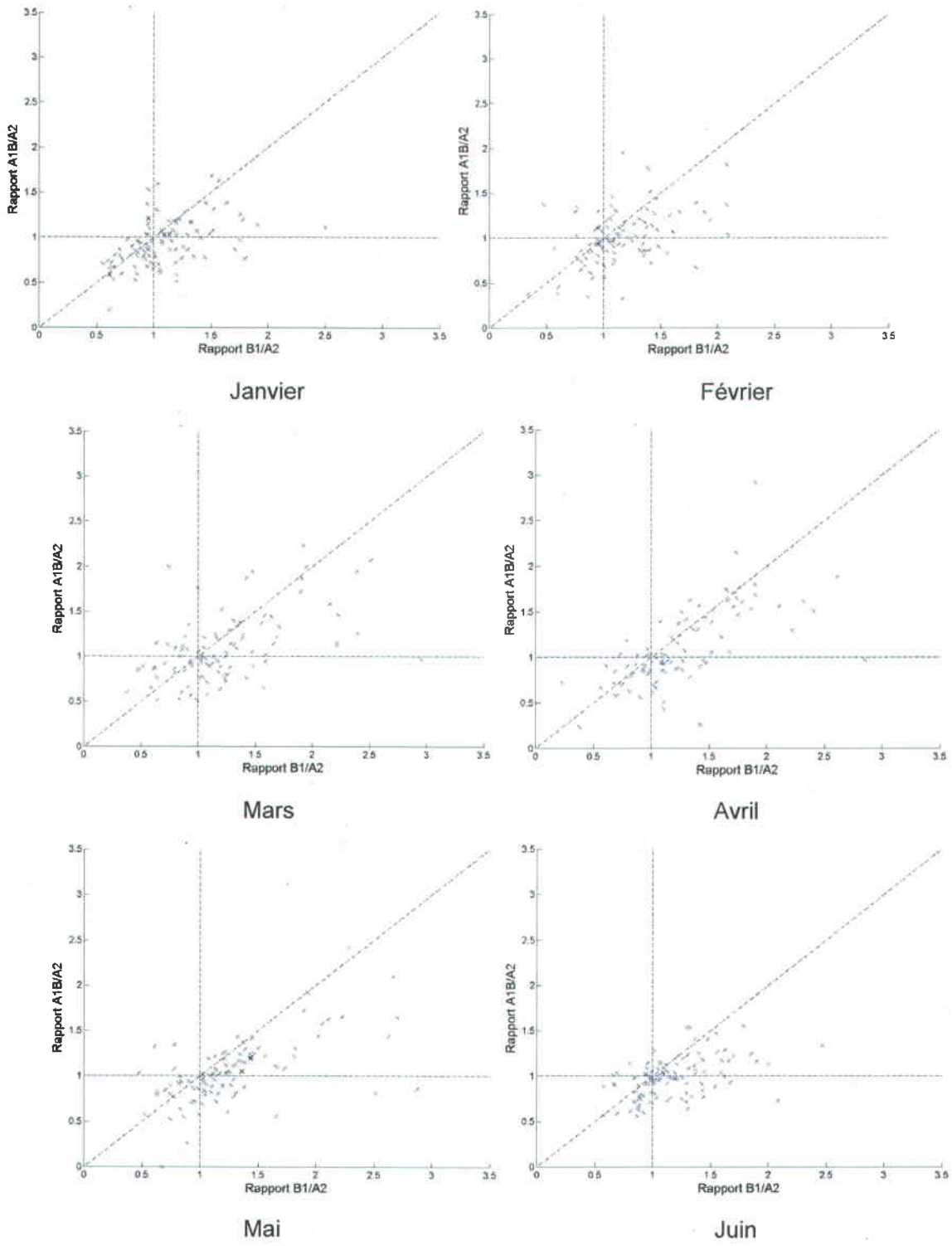

Figure 4.9 : Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les écoulements mensuels pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de janvier à juin

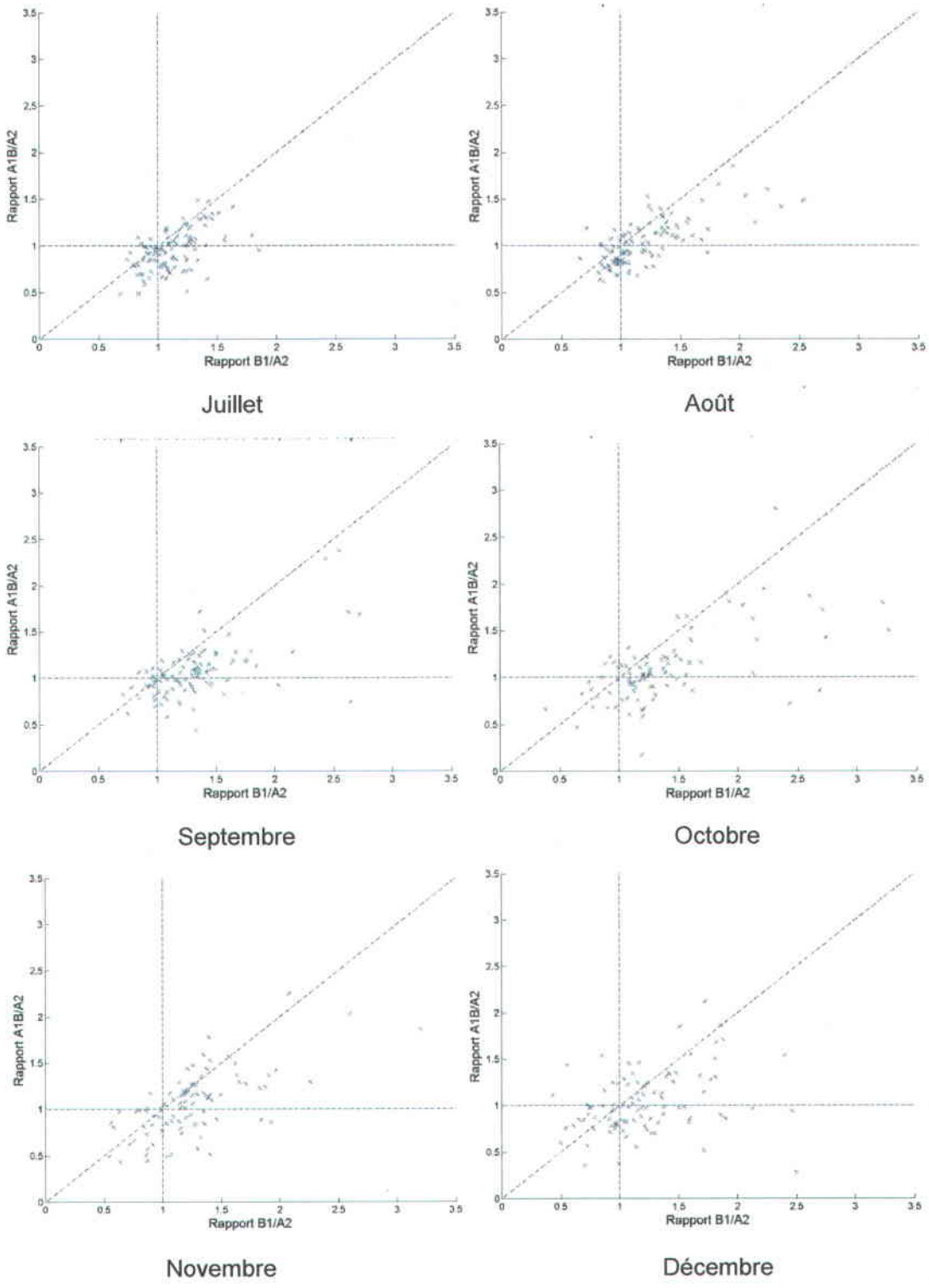

Figure 4.10 : Rapport des probabilités de ne pas avoir de tendance pour les écoulements mensuels pour les scénarios A1B et A2 (ordonnée) et les scénarios B1 et A2 (abscisse) pour les mois de juillet à décembre

5. Discussion et conclusion

Le présent travail n'a pas la prétention d'apporter des « projections exactes » sur les changements que subiront les ressources hydriques au Canada au cours du XXIe siècle. Malgré tout, l'objectif premier recherché ici est d'utiliser les modèles les plus performants disponibles aujourd'hui afin d'évaluer aussi justement que possible les tendances à prévoir au niveau de la disponibilité de la ressource en eau. Il a déjà été établi que les MCG possèdent certaines limites, que ce soit dans la capacité à reproduire certains phénomènes, dans la résolution spatiale et temporelle, dans la forte variabilité intermodèle ou encore dans les incertitudes sur les conditions initiales et les scénarios de GES; c'est pourquoi la démarche employée dans le cadre de ce travail tente autant que possible de tenir compte de ces limites. Pour cela, 23 modèles utilisant chacun plusieurs membres et scénarios de GES (pour un total d'environ 127 simulations) ont été combinés afin de bien baliser les différentes incertitudes. Deux variables pouvant être extraites des MCG ont été retenues comme étant particulièrement pertinentes au niveau des ressources hydriques, soit les précipitations et les écoulements mensuels, sur la période 1900-2100. La région à l'étude comprend le Canada et le nord des États-Unis.

Pour combiner l'information de tous ces modèles, il a d'abord été nécessaire de réorganiser les données sur une grille de référence afin de pouvoir les comparer sur une échelle spatiale commune. Par la suite, le test de Mann-Kendall a été appliqué sur chacune des séries temporelles afin de détecter d'éventuelles tendances positives significatives, négatives significatives, ou non significatives (au niveau 95 %). Si une tendance était observée, son amplitude était ensuite calculée en calant une équation de type loi de puissance sur la série, puis en comparant les années 1900 et 2100 en écart relatif.

Enfin, la dernière étape a consisté à mettre en commun les différents modèles en vérifiant pour chaque tuile quelle fraction des modèles prédit un des trois cas de tendances (positive significative, négative significative, ou non significative). Cette façon de faire (traiter indépendamment les tendances significatives et non significatives) constitue d'ailleurs un des

points innovateurs de la présente étude, alors que la majorité des études utilisant plusieurs MCG se contentent de mettre en commun les écarts prévus par les modèles sans tenir compte de la significativité des tendances. Par ailleurs, le principe permettant d'établir qu'une confiance plus élevée est accordée à certaines prédictions repose sur l'hypothèse que lorsqu'une fraction importante des MCG prédit le même événement, la probabilité que celui-ci se réalise est d'autant plus grande. Enfin, afin de mettre en commun les modèles, on a considéré chaque modèle équiprobable en raison de la difficulté de déterminer quel modèle est meilleur qu'un autre. D'ailleurs, la comparaison avec les données historiques pour les précipitations semble montrer qu'aucun modèle ne se démarque particulièrement par rapport aux autres (voir discussion plus loin à ce sujet).

De plus, les trois scénarios de GES disponibles (A2, B1 et A1B) ont été comparés séparément afin de voir si le choix de ces derniers avait une influence notable sur les tendances. Des tendances plus fortes pour les scénarios de GES où le forçage anthropique est plus élevé suggéreraient que les changements climatiques à prévoir seraient influencés par l'activité humaine. Finalement, une autre étape importante du projet a consisté à comparer les données des MCG avec les données historiques d'Environnement Canada afin de préalablement évaluer la performance des modèles à reproduire les tendances en climat présent (1900-2007).

Ainsi, la première étape de la présente étude a consisté à vérifier préalablement la capacité des modèles à générer des tendances semblables à celles observées historiquement pour les précipitations. Du côté des tendances historiques comme telles, les résultats analysés ici vont dans le même sens que ceux de l'étude de Zhang *et al.* (2000), soit une augmentation des précipitations moyennes sur l'ensemble du sud du territoire sur la période 1900 à 2007. En ce qui concerne la comparaison par tuile entre les MCG et les données historiques, le premier constat qui s'impose est le faible pourcentage de tendances significatives détectées par les MCG pour la période 1900-2007. Tandis qu'environ 36 % des tuiles pour les données historiques présentent des tendances à la hausse, ce pourcentage descend à 5 % à peine pour les MCG. Cela semble indiquer, même si cela peut sembler troublant, que les modèles sont incapables de reproduire adéquatement les tendances en climat présent et les sous-estiment considérablement. Un autre point à mentionner est que l'on n'observe aucune structure spatiale cohérente entre les tendances détectées sur les données historiques et sur celles des MCG. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de quelques études récentes. En effet, Allan et

Soden (2007), Wentz *et al.* (2007) de même que Zhang *et al.* (2007) ont observé que les tendances dans les précipitations moyennes pour les données historiques étaient plus importantes que celles simulées par les modèles (voir section 2.2.4). Quelques hypothèses ont été émises afin d'expliquer ce phénomène, dont : 1) des lacunes au niveau des données observées; 2) des lacunes en ce qui concerne la représentation des changements décennaux pour le forçage radiatif des aérosols et les changements du flux de surface associés; 3) une représentation et une paramétrisation inadéquate au niveau des modèles en ce qui concerne les distributions actuelles de précipitations (Allan et Soden, 2007). Cela pourrait signifier que les tendances projetées par les MCG dans le cadre de la présente étude pourraient être beaucoup plus importantes que prévues.

Concernant les données de précipitations des MCG, la conclusion la plus forte semblant se dégager des données (plus de 75 % des modèles) est une hausse des précipitations mensuelles hivernales de l'ordre de 10 à 20 %, pour tout le nord du Canada et le contour de la baie d'Hudson, de 1900 à 2100. Cela cadre bien avec les résultats de plusieurs études affirmant que les régions nordiques seraient probablement parmi les plus touchées par les changements climatiques (Arctic Climate Impact Assessment, 2004). Pour les mois de mai à septembre, peu de changements semblent prévisibles sur l'ensemble du territoire, sauf pour la région de la côte ouest, où des diminutions sont à prévoir, et pour l'Alaska et le nord du Québec, où subsiste la possibilité de légères hausses. Si l'on compare les tendances de la section 4.2 pour le sud du Québec avec celles présentées par Bourque et Simonet (2008), décrites à la section 2.2.8.11, il est rassurant de constater que les résultats sont cohérents. En effet, les profils hivernal et printanier des tendances que décrivent Bourque et Simonet (2008) sont similaires à nos résultats, 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. Du côté estival, Bourque et Simonet (2008) ne trouvent pas de tendance nette pour les précipitations, ce qui abonde dans la même direction que la présente étude puisque nos résultats suggèrent le scénario stationnaire. Cette cohérence entre les deux études n'est toutefois pas surprenante, si on tient compte du fait que sept des huit modèles utilisés dans Bourque et Simonet (2008) se retrouvent dans la liste du tableau 3.1.

Par ailleurs, un résultat intéressant concerne la comparaison entre les différents scénarios de GES. Cette dernière a montré que les mêmes profils apparaissent au niveau spatial, mais que les probabilités de changement sont beaucoup plus élevées pour les scénarios A2 et A1B que pour le B1, suggérant que les tendances observées sont liées au forçage anthropique. Ce résultat est toutefois beaucoup moins probant pour les écoulements qui semblent, à la lumière des modèles examinés, globalement moins sensibles au scénario de GES considéré. Cela pourrait s'expliquer par le fait que plusieurs phénomènes sont impliqués dans le processus d'écoulement et que chacun peut réagir différemment en fonction du forçage anthropique (par exemple, les précipitations et l'évaporation augmentent, s'annulant du même coup). Par ailleurs, un point à noter est le fait que ces résultats sont cohérents avec les résultats de Hayhoe *et al.* (2007) et de Sheffield *et Wood* (2007), qui ont, eux aussi, observé des tendances plus fortes pour les scénarios de GES plus pessimistes (voir section 2.2.8.9).

Du côté des écoulements simulés par les MCG, deux tendances fortes se dégagent alors que la majorité du territoire devrait subir une hausse des écoulements durant l'hiver, mais une diminution durant l'été. La région centre-sud devrait toutefois être moins touchée dans les deux cas. Comme il a été dit auparavant, ces résultats doivent être considérés avec précaution vu les nombreux doutes concernant la capacité des MCG à simuler le cycle hydrologique (voir section 2.2.5). Toutefois, les résultats obtenus semblent logiques. En effet, des hausses de précipitations (selon les MCG) sur une grande portion du territoire, combinées à des périodes de dégel plus fréquentes, dans l'hypothèse où les températures moyennes augmenteront, devraient provoquer en théorie une hausse des écoulements durant la période hivernale. Or, les résultats suggèrent qu'il en sera ainsi. Du côté estival, on prévoit pour les précipitations des diminutions pour la côte ouest, quelques hausses dans le nord, et un régime stationnaire pour le centre-sud. Si on tient compte du fait que les augmentations de température appréhendées risquent de provoquer une hausse des taux d'évapotranspiration, un régime stationnaire au niveau des précipitations pourrait conduire à un bilan hydrique négatif (voir Huntingdon, 2003; Arnell, 2003 et Gagnon et Gough, 2005). Justement, on constate sur l'ensemble du sud du territoire une diminution des écoulements pour la majorité des tuiles présentant un régime stationnaire (ou négatif) des précipitations. L'effet de l'évaporation dans le nord semble toutefois être annulé par les hausses de précipitations importantes.

Un point de comparaison possible pour les écoulements consiste à confronter les résultats des MCG aux tendances sur les débits historiques (1947-1997) observées par Zhang *et al.* (2001) sur des échelles mensuelles et journalières. Même s'il ne s'agit pas exactement de la même variable ni de la même période de contrôle, on serait en droit de s'attendre à ce que les tendances observées sur les débits abondent dans le même sens que les écoulements. Comme il a été mentionné à la section 2.1.2, les tendances sur les débits observés pour le sud du Canada indiquent des augmentations en mars et en avril, mais des diminutions de juin à octobre. De même, ces auteurs concluaient également en un début plus précoce de la crue printanière sur tout le territoire. Enfin, les tendances les plus fortes détectées se situaient dans le Yukon et le nord de la Colombie-Britannique. Les MCG abondent dans le même sens alors que ce sont généralement dans le nord que les tendances les plus marquées se trouvent. Concernant la crue printanière plus hâtive, il est difficile de l'observer directement sur les séries des MCG en raison du fait que l'échelle de temps est mensuelle et non journalière. Toutefois, les augmentations aux mois de février et de mars suivies de diminutions aux mois d'avril et de mai, se déplaçant progressivement du sud vers le nord, peuvent constituer des indices d'une crue plus précoce. En effet, pour les mois de février et de mars, la fonte des neiges prématurée, alors qu'il y avait peu ou pas de fonte pendant ces mois auparavant, pourrait constituer une hypothèse intéressante à l'augmentation de l'écoulement mensuel. Puis, on peut supposer que si la crue diminue progressivement pour les mois d'avril et mai, alors que dans le passé elle était à son plus fort à ce moment, cela expliquerait la diminution pour ces mois. Cela ne constitue évidemment pas une preuve d'une crue plus précoce, mais l'explication semble tout de même cohérente avec les conclusions de Zhang *et al.* (2001) ou de Hodgkins *et al.* (2005). Finalement, durant l'été et au début de l'automne, les données historiques semblent globalement cohérentes avec les résultats des MCG, alors que les deux ensembles présentent des diminutions.

Plusieurs pistes de recherche dans le domaine demeurent à explorer à la suite de la présente étude. Parmi les points les plus importants, on peut citer une estimation des impacts hydrologiques à une échelle plus fine, alors que des échelles relativement grossières ont été utilisées ici aux niveaux temporel et spatial. Ces dernières sont malheureusement mal adaptées pour décrire les processus hydrologiques à l'échelle des bassins versants (Bronstert *et al.*, 2007). Au niveau temporel, l'utilisation de données journalières constituerait l'option la plus envisageable et permettrait en plus d'étudier certains indices météorologiques et hydrologiques pertinents, en ce qui concerne la ressource hydrique, tels que le nombre de jours sans pluie, les

indices de crues, etc. Toutefois, cela repose sur l'hypothèse que les MCG sont capables de représenter adéquatement les interactions physiques à cette échelle de temps et leur résolution spatiale, ce qui reste à vérifier. Du côté spatial, deux options permettent d'obtenir la résolution nécessaire pour une utilisation dans des modèles hydrologiques : la mise à l'échelle statistique (en anglais *statistical downscaling,* voir Fowler *et al.*, 2007a, pour une revue des principales techniques disponibles) et les modèles régionaux de climat (MRC), qui constituent ce que l'on appelle une « mise à l'échelle dynamique ». Concernant ces derniers, le nombre limité de modèles disponibles pour une région donnée pourrait causer problème si on veut tenir compte de la variabilité intermodèle décrite précédemment. De plus, ils nécessitent l'usage d'un équipement informatique beaucoup plus performant que la mise à l'échelle statistique (Fowler *et al.*, 2007a). Pour ce qui est de la mise à l'échelle statistique, elle est fréquemment utilisée dans la littérature (voir par exemple Wilby et Harris, 2006; Cunderlik et Simonovic, 2005; Lehner *et al.*, 2006), mais présente également quelques désavantages tels que la nécessité d'obtenir de longues séries d'observation pour la calibration (Fowler *et al.*, 2007a). Par ailleurs, le fait d'utiliser une mise à l'échelle statistique ou dynamique complexifie sensiblement la démarche globale en plus de rendre difficile l'évaluation des incertitudes, car à l'erreur des MCG s'ajoutent celle inhérente aux modèles hydrologiques et celle reliée au processus de mise à l'échelle comme tel (voir Mareuil *et al.,* 2007 pour un exemple et Stainforth *et al.,* 2007a et b pour une discussion de ces questions). Toutefois, malgré toutes les difficultés reliées à une amélioration de la résolution spatiale, 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 s'y développer.

Parmi les autres points à explorer, la variabilité sur les indices utilisés devrait probablement être considérée. Dans le cadre de cette étude, l'accent a été mis sur l'évolution de la moyenne des précipitations et des écoulements, mais les événements extrêmes reliés à ces variables ne doivent pas être négligés vu leurs impacts importants (Katz et Brown, 1992). Pour compenser cela, deux méthodes pourraient être envisagées. La première consisterait à analyser l'évolution de la variance sur les séries de données en fonction du temps. La seconde porterait sur l'étude d'indices d'extrêmes, lesquels nécessitent souvent un pas de temps journalier. Par exemple, les indices utilisés par Fowler et Kilsby (2007) liés à l'occurrence de mois secs consécutifs constitueraient une possibilité intéressante.

Finalement, un point important à développer en lien avec les résultats de cette étude est tout ce qui a trait aux impacts et à l'adaptation. Les crues et les étiages ont déjà été fréquemment cités parmi les principales sources de problèmes, mais des baisses au niveau de la moyenne pourraient également avoir des impacts non négligeables. Par exemple, une diminution des précipitations moyennes telle que connaît le sud-est de l'Australie depuis une décennie amène également son lot de complications (voir Stemp-Morlock, 2007). Ainsi, il pourrait être intéressant d'étudier si des changements tels que ceux appréhendés dans les résultats de la présente étude nécessiteront des adaptations d'ici quelques années. Toutefois, vu les coûts importants de telles études et les incertitudes identifiées dans le présent projet, il serait naïf de commencer immédiatement à appliquer des mesures préventives. Par contre, cela n'empêche pas d'envisager des solutions afin d'être prêt à réagir lorsque l'état des connaissances permettra de prendre des décisions éclairées. Ces mesures devront toutefois tenir compte du fait que les recherches au niveau de la projection climatique sont en constante évolution et, donc, que nos projections seront peut-être très différentes dans le futur (Allen et Frame, 2007).

6. Bibliographie

Akinremi, O.O., McGinn, S.M. et Cutforth, H. (1999). Precipitation trends on the Canadian Prairies. *J. Climate* 12:2996-3003.

Alexander, L.V. et Arblaster, J.M. (2008). Assessing trends in observed and modelled climate extremes over Australia in relation to future projections, *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.1730.

Allan, R.P. et Soden, B.J. (2007). Large discrepancy between observed and simulated precipitation trends in the ascending and descending branches of the tropical circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L18705, doi:10.1029/2007GL031460.

Allen, M.R. et Frame, D.J. (2007). Call off the quest. *Science,* 318, 582-583.

Allen, M., Stott, P., Mitchell, J., Schnur R. et Delworth, T. (2000). Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change, *Nature*, 407, 617-620.

Arctic Climate Impact Assessment (2004). Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 144 p.

Arnell, N.W. (2003). 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.

Arnold, J.G. et Fohrer, N. (2005). Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling, *Hydrol. Proc.*, 19, 563– 572.

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.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992). Précis de télédétection Volume 1 : Principes et méthodes, Presses de l'Université du Québec, Canada, 485 p.

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.

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.

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.

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.

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.

Encyclopedia of Earth (2007). *Arctic climate change scenarios for the 21st century projected by the ACIA-designated models.* Disponible sur http://www.eoearth.org/article/Arctic_climate_change_scenarios_for_the_21st_century_projected_by_the_ACIA-designated_models#Emissions_scenarios (consultation le 8 septembre 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. 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.

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

GIEC (2007a). Climate Change 2007: Synthesis Report – Summary for policy makers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 22 p.

GIEC (2007b). 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.

GIEC (2000). Emissions scenarios. Summary for policymakers. Special report of Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group III. IPCC, Geneva, Switzerland, 21 p.

Graham, L.P., Hagemann, S., Jaun, S. et Bniston, M. (2007). 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.

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.

Haugen, J.E. et Iversen, T. (2008). Response in extremes of daily precipitation and wind from a downscaled multi-model ensemble of anthropogenic global climate change scenarios. *Tellus A*, 60(3), 411-426 (DOI: 10.1111/j.1600-0870.2008.00309.x).

Hayhoe, K., Wake C.P., Huntington, T.G., Luo L., Schwartz, M., Sheffield J., Wood E., Anderson B., Bradbury J., DeGaetano A., Troy T. et Wolfe D. (2007). Past and future

changes in climate and hydrological indicators in the U.S. Northeast. *Climate Dynamics,* 28:381-407.

Held, I. M. et Soden, B.J. (2000). Water vapor feedback and global warming, *Annu. Rev. Energy Environ.,* 25, 441–475.

Hodgkins, G.A., Dudley, R.W. et Huntington, T.G. (2005). Summer low flows in New England during the 20th Century, *J. Am. Water Resour. Ass.*, 41(2), 403-411.

Holland, P. W. et Welsch, R.E. (1977). 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, New-York, USA, 320 p.

Huntington, T.G. (2003). Climate warming could reduce runoff significantly in New England, USA, *Agric. Forest Meteor.*, 117, 193-201.

Katz R.W. et Brown, B.G. (1992). Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages, *Clim. Change*, 21(3), 289-302.

Kharin, V.V. et Zwiers, F.W. (2002). Climate predictions with multi-model ensembles. *J. Clim.*, 15, 793-799.

Lehner, B., Döll, P., Alcamo, J., Henrichs, H. et Kaspar, F. (2006). Estimating the impact of global change on flood and drought risks in Europe: a continental, integrated analysis. *Clim. Change,* 75(3), 273–279.

Lucas-Picher, P., Caya, D., de Elía, R. et Laprise, R. (2008). Investigation of regional climate models' internal variability with a ten-member ensemble of ten years over a large domain. *Clim.Dynamics*, 31, 927-940, doi:10.1007/s00382-008-0384-8

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.

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.

Mekis, E. et Hogg, W.D. (1999). Rehabilitation and analysis of Canadian daily precipitation time series. *Atmosphere-Ocean*, 37, 53–85.

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.

NOAA (2008). *The first climate model*, National Ocean and Atmospheric Administration, USA. Disponible sur http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate model/welcome.html (consultation le 1er août 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.

Rajagopalan, B., Lall, U. et Zebiak, S. (2002). Optimal categorical climate forecasts through multiple GCM ensemble combination and regularization , *Monthly Weather Rev,*, 130, 1792-1811, 2002.

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.

Serrat-Capdevila, A., Valdés, J.B., Pérez, J.G., Baird, K., Mata, L.J. et Maddock III T. (2007). Modeling climate change impacts – and uncertainty – on the hydrology of a riparian system: The San Pedro Basin (Arizona/Sonora), *J. Hydrol.*, 347(1-2), 48-66.

Sheffield, J. et Wood, E.F. (2007). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations, *Clim. Dyn.* (2008), 31, 79-105.

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.

Stemp-Morlock, G. (2007). Australia's war on drought. *Environ. Health Persp.*, 115(7), A348-A348.

Street, J.O., Carroll, R.J. et Ruppert, D. (1988). A note on computing robust regression estimates via iteratively reweighted least squares, *Am. Stat.*, 42,152-154.

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.

Takle, E.S., Jha, M. et Anderson, C.J., (2005). Hydrological cycle in the Upper Mississippi River Basin: 20th century simulations by multiple GCMs. *Geophys. Res. Lett.,* 32, L18407 10.1029/2005GL023630.

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.

Tebaldi, C., Smith, R.W., Nychka, D. et Mearns, L.O. (2005). Quantifying uncertainty in projections of regional climate change: A Bayesian approach to the analysis of multi-model ensembles, *J. Clim.*, 18(10), 1524-1540.

Thomas, G. et Henderson-Sellers, A. (1990). An evaluation of proposed representation of subgrid hydrologic processes in climate models. *J. Clim.*, 4, 898-910.

Vidal, J.-P. et Wade, S. (2008). A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK, *Int. J. Clim.*, 28(7), 843-858.

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.

Vincent, L.A. et Gullet, D.W. (1999). Canadian historical and homogeneous temperature datasets for climate change analyses. *Int. J. Clim.,* 19, 1375–1388.

Wentz, F.J., Ricciardelli, L., Hilburn, K. et Mears, C. (2007). How much more rain will global warming bring? *Science*, 317233-235. 10.1126/science.1140746.

Wilby, R.L. et Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resour. Res.*, 42, W02419, doi:10.1029/2005WR004065.

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, 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 de combinaison des séries et 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 $\left\{x_j^{k,l,m}(t)\right\}$ 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 :

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

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 $S_j^{(k)}$ 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 tendances portera donc sur chacune de ces séries de la grille de référence $\left\{y_i^{(k,l,m)}(t)\right\}$. De même, l'on définit par $\alpha_i^{k,l,m}(y)$ la tendance associée à la série $\left\{y_i^{(k,l,m)}(t)\right\}$. 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 :

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

où $f_{j,m}^{\alpha}$ est la probabilité d'occurrence des tendances α = {+, -, 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 :

$$N = \sum_{k} l_k^{(m)} \tag{A.3}$$

où $l_k^{(m)}$ 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 :

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

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 de cette variation sur les simulations pour chaque classe de tendances par :

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

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 :

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

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 la présente étude, 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 :

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

où $l_k^{(m)}$ 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 :

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

où $l_{i,k}^{(m,\alpha)}$ 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

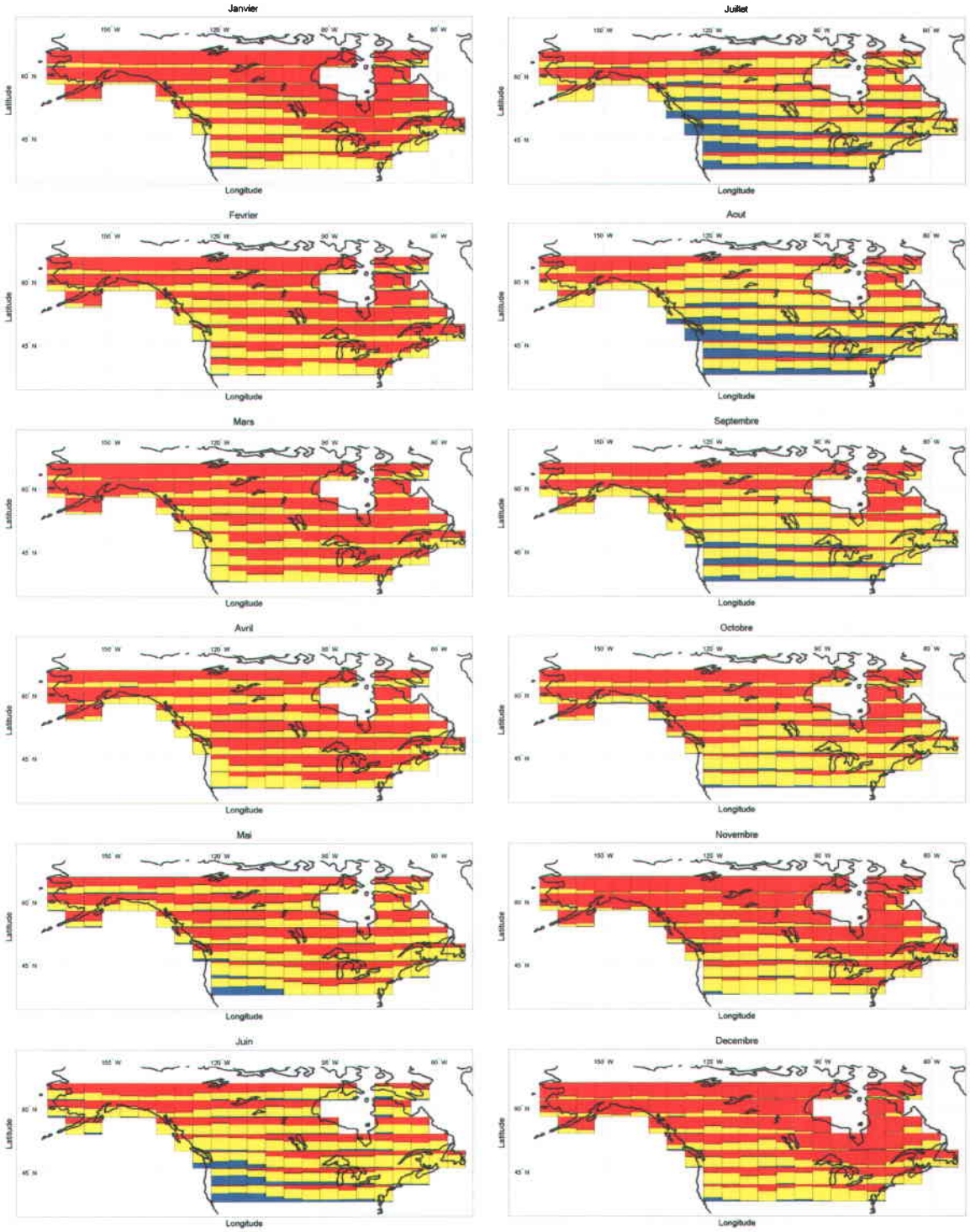

Figure B-1 : Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

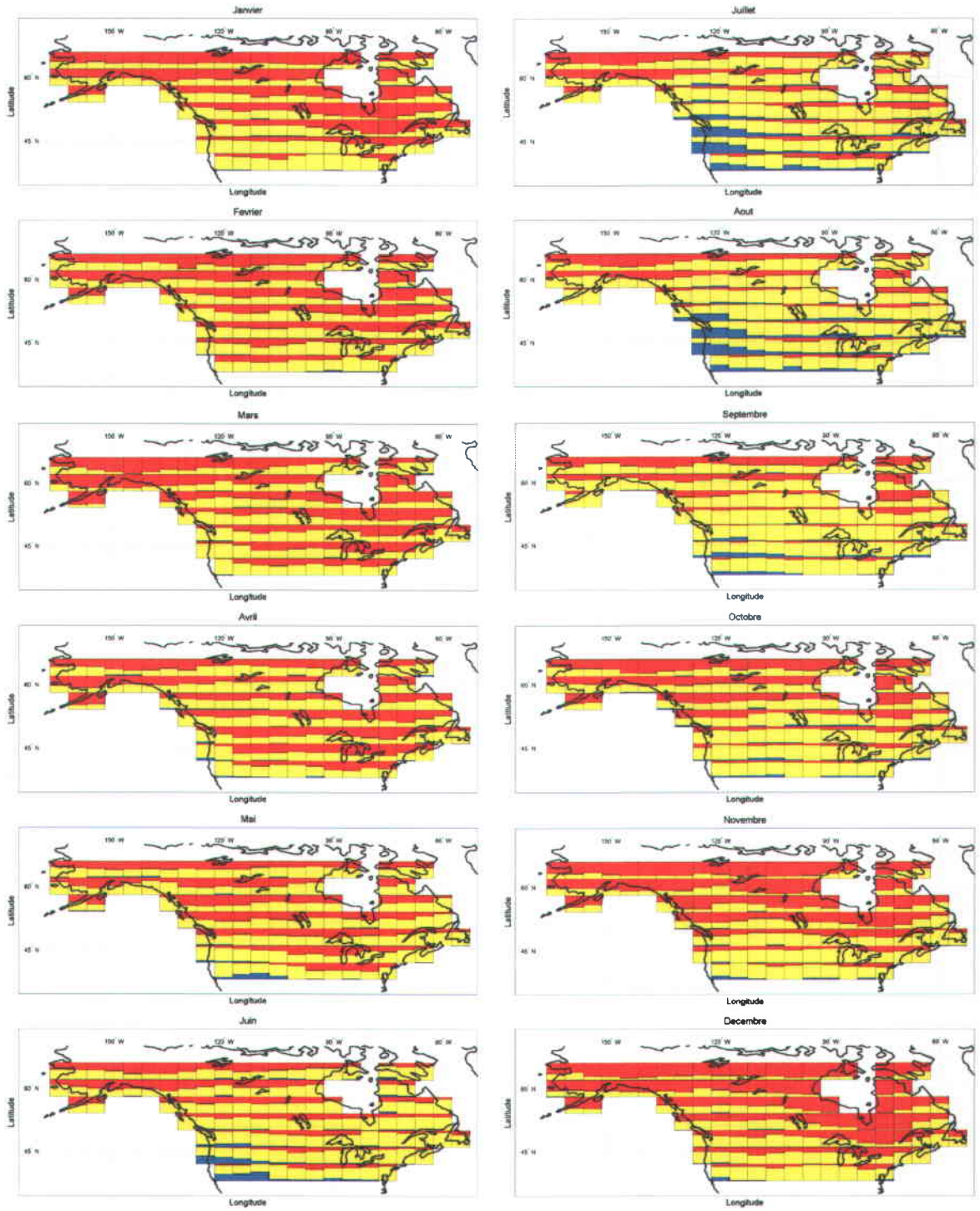

Figure B-2 : Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

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

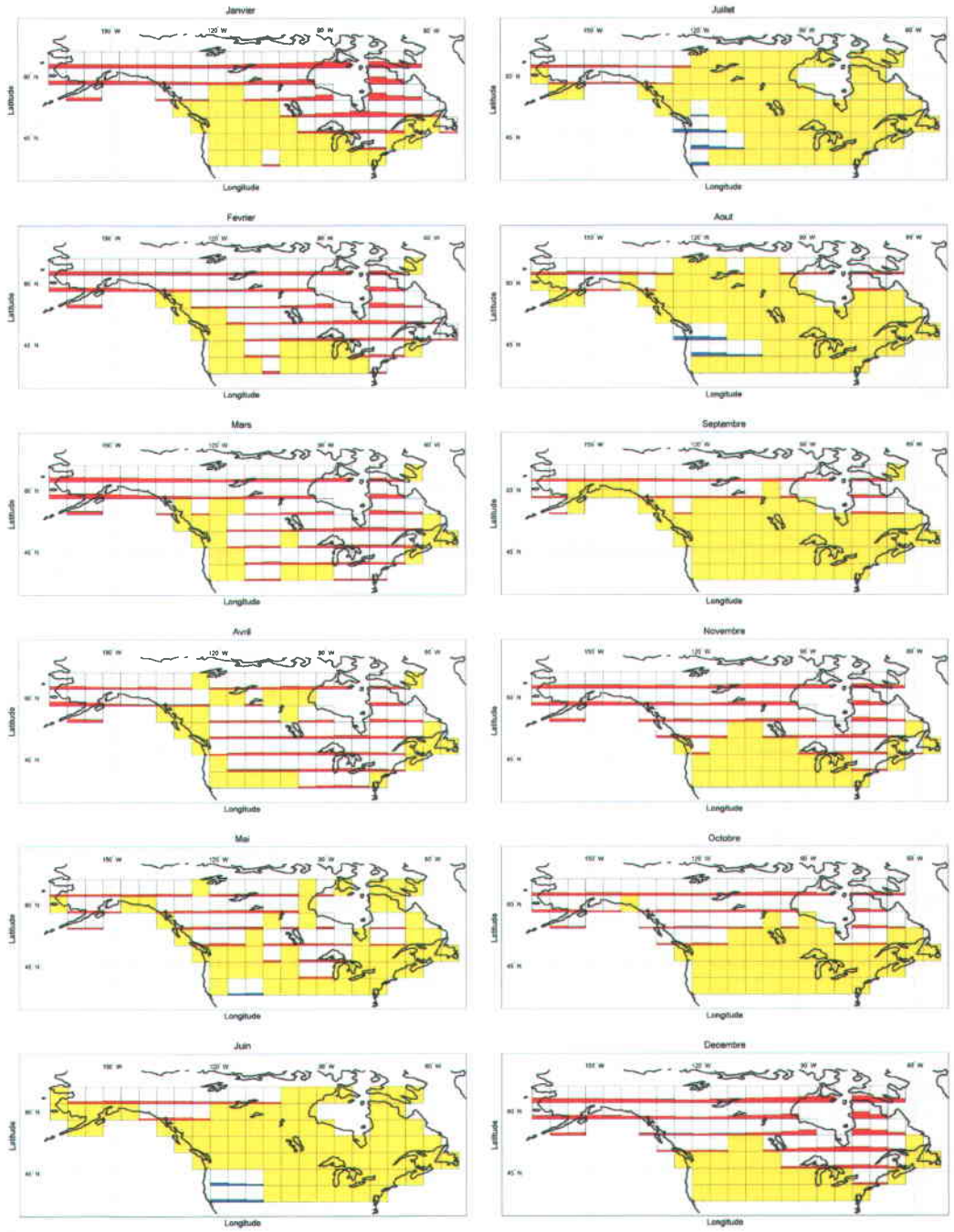

Figure C-1 : Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (scénario de GES A1B). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en 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 un écart relatif de 100 %

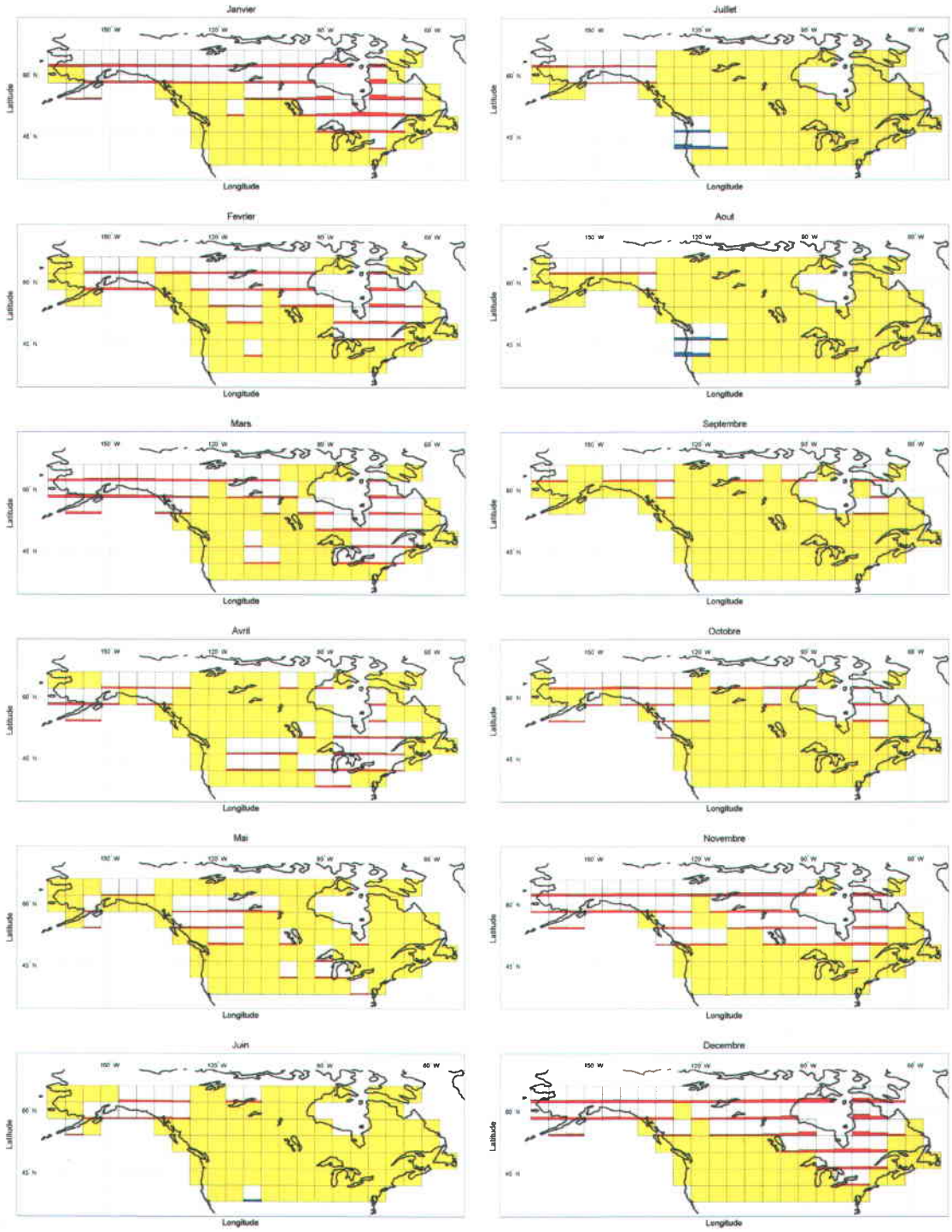

Figure C-2 : Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des précipitations mensuelles sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (scénario de GES B1). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en 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 un écart relatif de 100 %

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

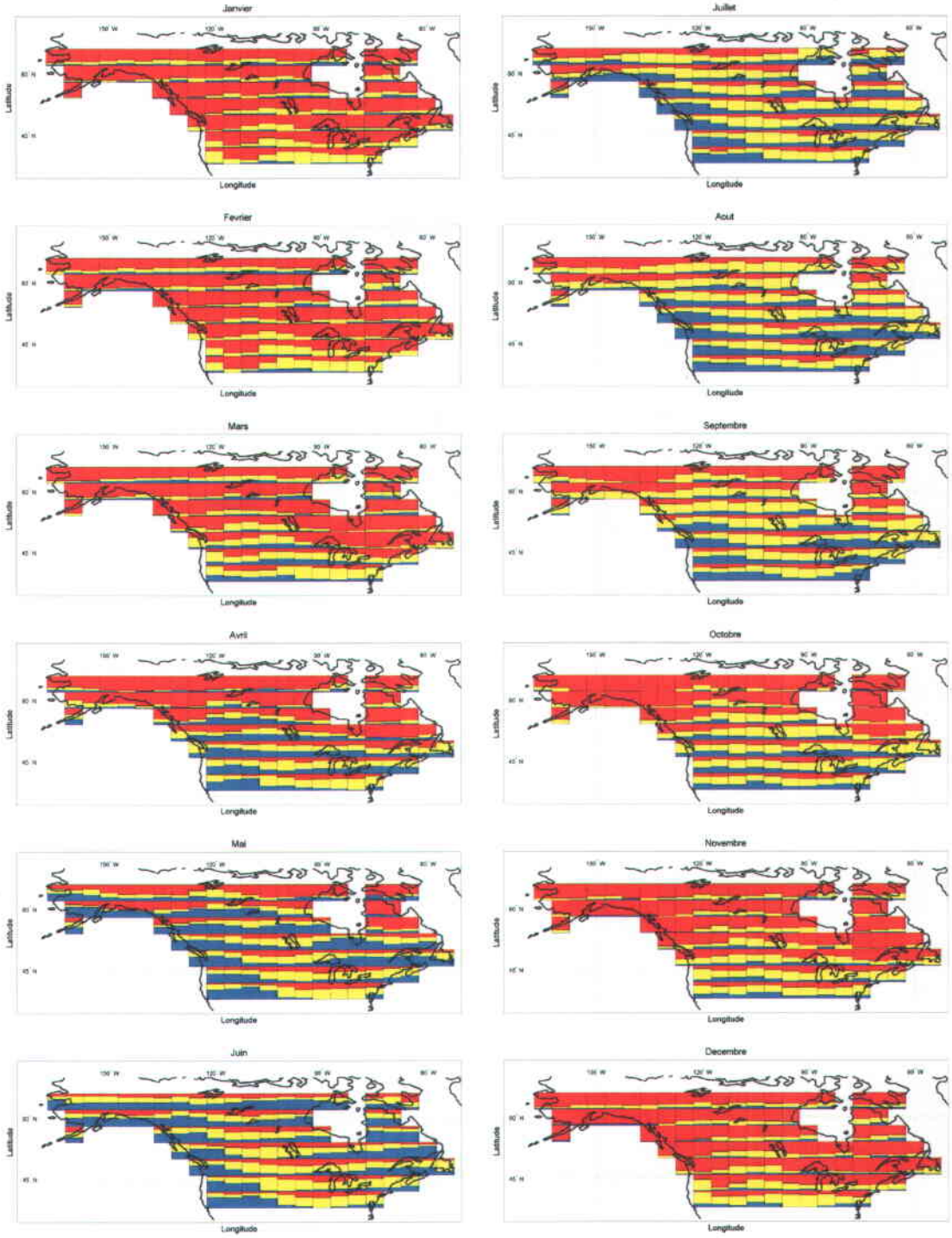

Figure D-1: Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

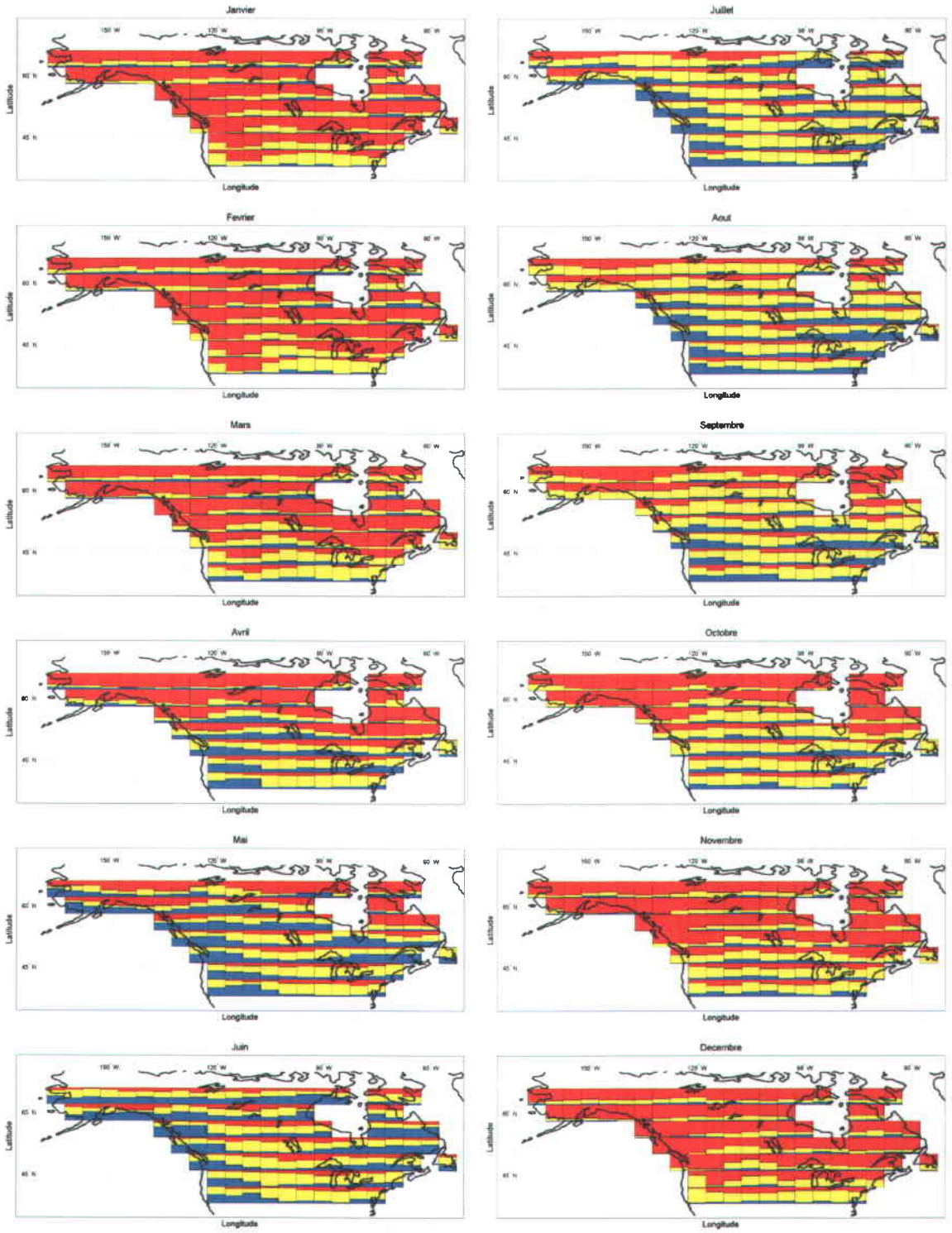

Figure D-2 : Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante)

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

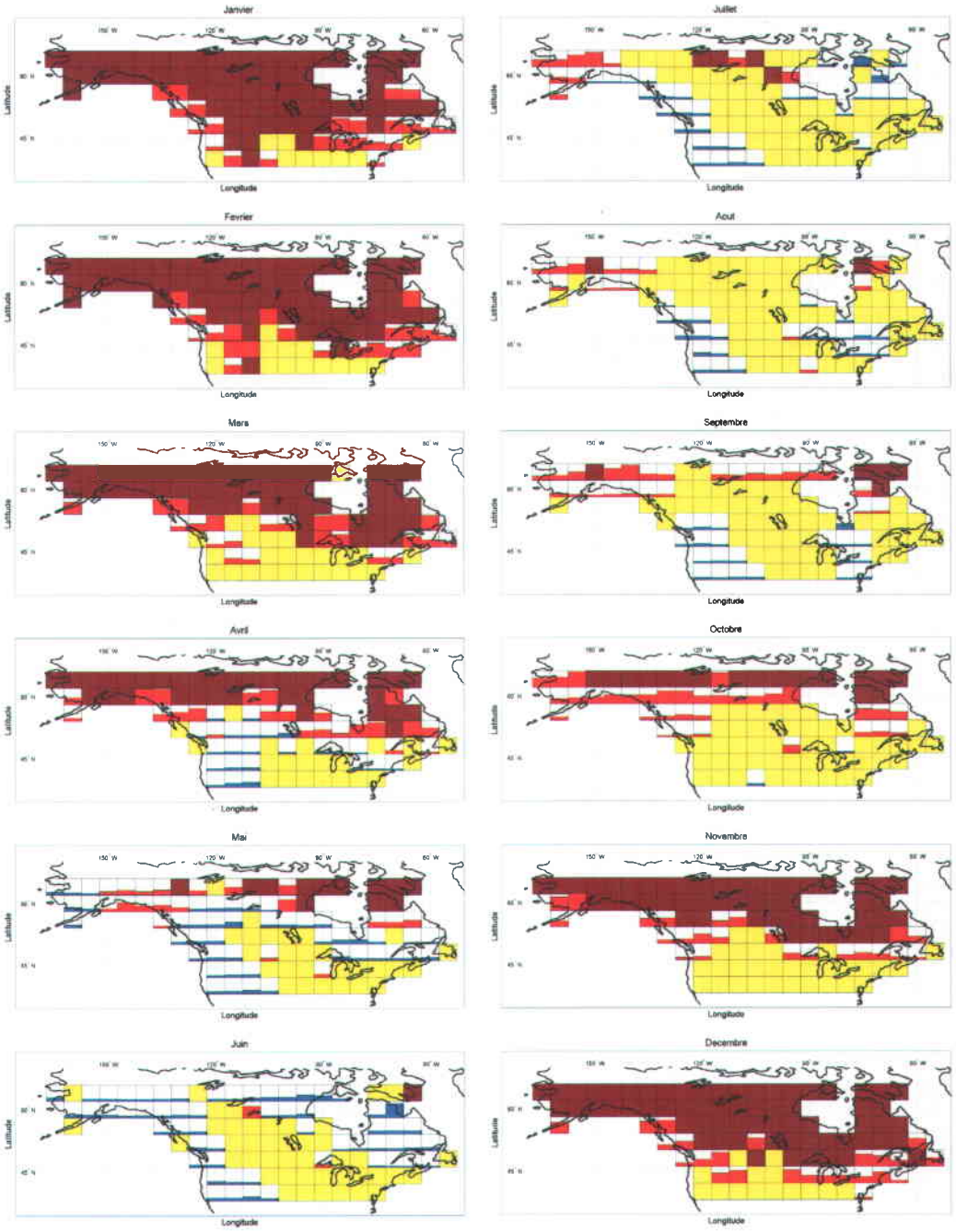

Figure E-1 : Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (scénario de GES A1B). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (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 un écart relatif de 100 %. Les tuiles marron présentent des accroissements de plus de 100 %.

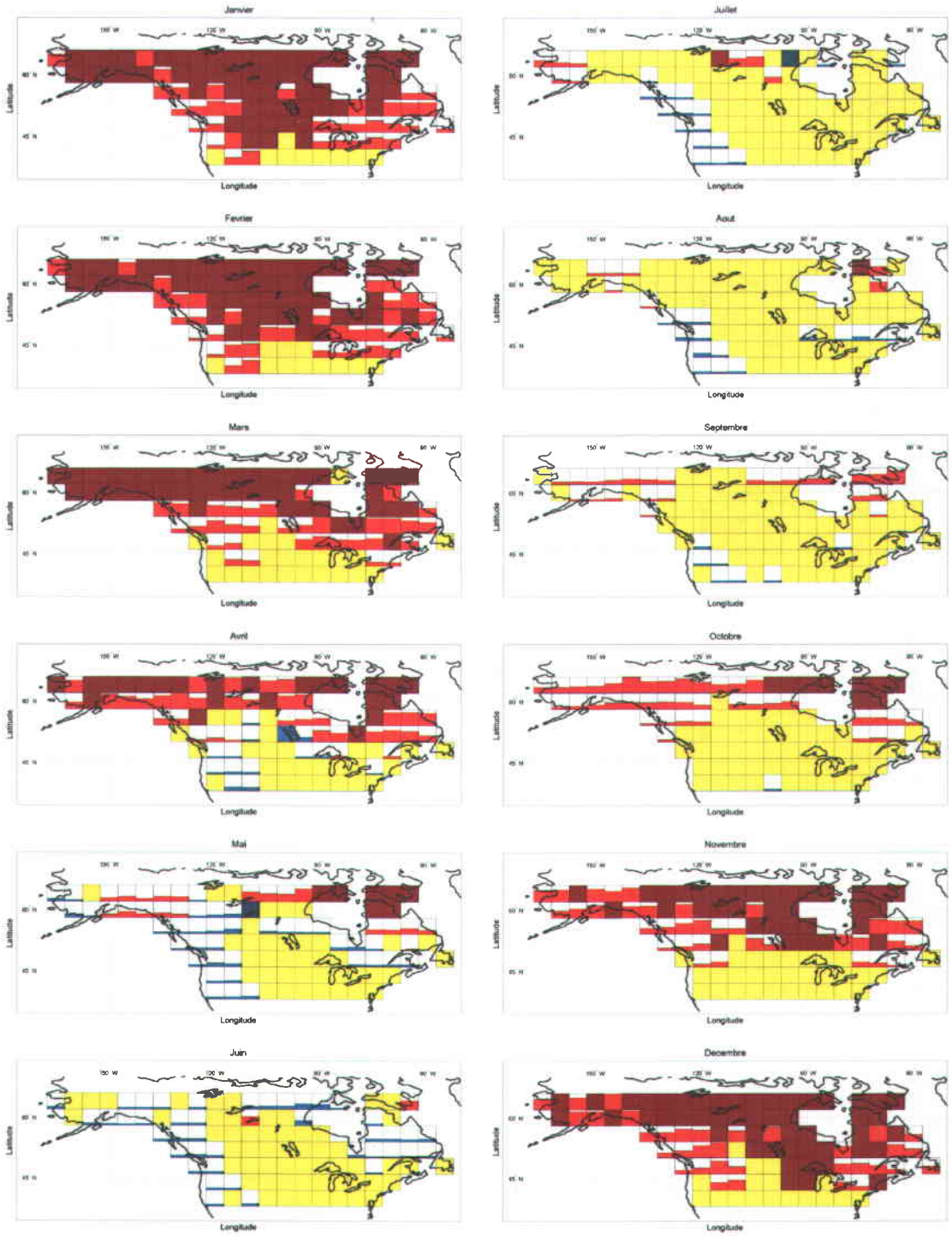

Figure E-2 : Moyenne multimodèle des variations moyennes relatives des écoulements mensuels sur la période 1900-2100 pour les simulations composant le sous-ensemble dont la tendance domine en chaque tuile (scénario de GES B1). Les variations positives sont indiquées en rouge et les négatives en bleu (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 un écart relatif de 100 %. Les tuiles marron présentent des accroissements de plus de 100 %.

Annexe F : Comparaison des résultats entre les tendances historiques et les tendances simulées par les MCG sur la période 1900-2007 - scénarios A1B et B1

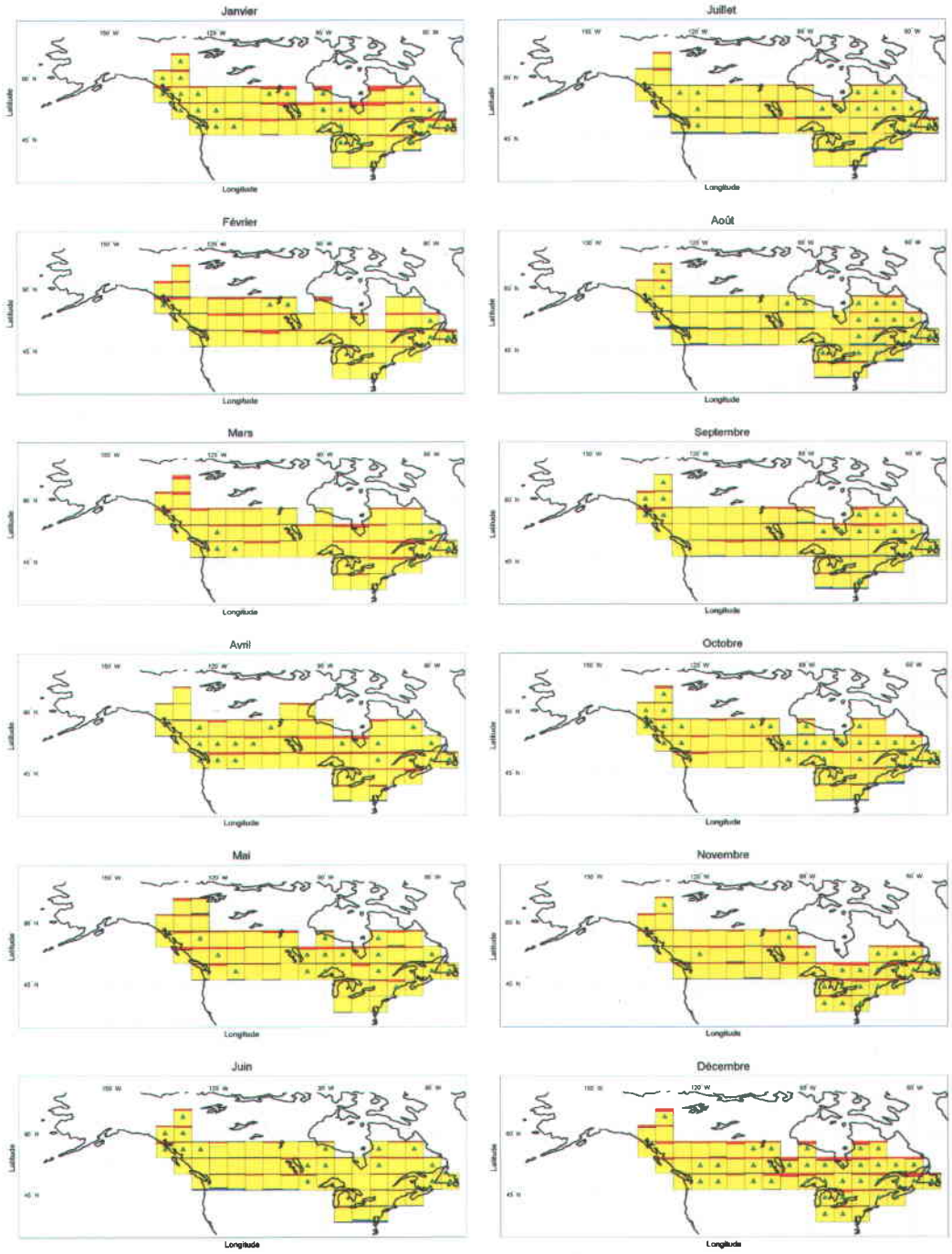

Figure F-1 : Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2007 pour le scénario de GES A1B (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante). Un triangle vert pointé vers le haut (tendance positive) ou le bas (négative) indique qu'une tendance significative a été détectée pour cette tuile avec les données historiques

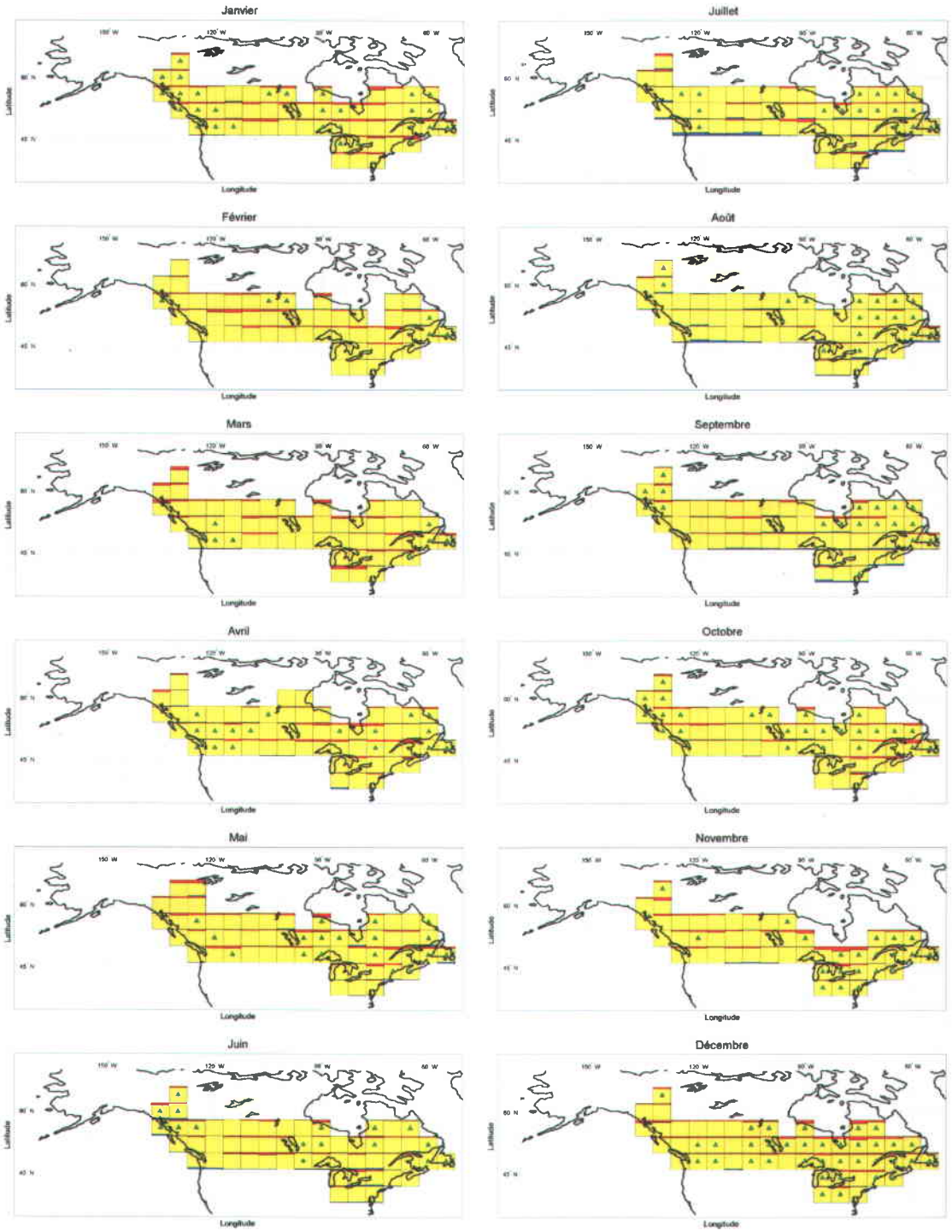

Figure F-2 : Probabilité de tendances positive (rouge), négative (bleu) ou d'une absence de tendance (jaune) pour les précipitations mensuelles sur la période 1900-2007 pour le scénario de GES B1 (la fraction de la tuile d'une couleur donnée correspond à la probabilité d'avoir la tendance correspondante). Un triangle vert pointé vers le haut (tendance positive) ou le bas (négative) indique qu'une tendance significative a été détectée pour cette tuile avec les données historiques