

Atlas hydroclimatique du Québec méridional

Impact des changements climatiques
sur les régimes de crue, d'étiage et
d'hydraulicité à l'horizon 2050



2013

UN
QUÉBEC
POUR TOUS

Québec 

Équipe de réalisation

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) :

Jean-François Cyr, ing., M. Sc.
Simon Lachance-Cloutier, ing. jr, M. Sc.
Simon Ricard, ing., M. Sc.
Richard Turcotte, ing., Ph. D.
Martin Beaulieu, conseiller aux affaires corporatives
Stéphanie Beauregard, technicienne en géomatique
Frédéric Côté, géographe
Dominic Roussel, ing., M. Sc.

Collaboration Ouranos :

Marco Braun, Ph. D.
Diane Chaumont, M. Sc.
Blaise Gauvin St-Denis, M. Sc.
Ramón de Elía, Ph. D.
Anne Frigon, M. Sc.

Conseillère en communication :

Sophie-Anne Tremblay

Conception graphique :

Marie-Andrée Garceau, B.A.V.

Révision linguistique :

Colette Proulx

Notice bibliographique recommandée

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), 2013. Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 2013, 51 p.

Pour information

Service de l'hydrologie et de l'hydraulique, Direction de l'expertise hydrique
Centre d'expertise hydrique du Québec
675, boulevard René-Lévesque Est, Québec (Québec) G1R 5V7
Aile Louis-Alexandre-Taschereau, 4^e étage, boîte 28
Téléphone : 418 521-3993
Télécopieur : 418 643-6900
Courriel : cehq@mddefp.gouv.qc.ca
Site Internet : www.cehq.gouv.qc.ca

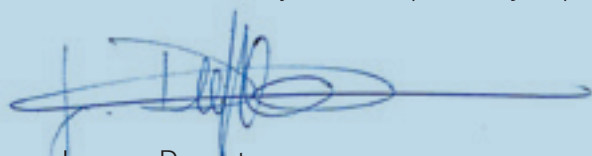
Avant-propos

Au Québec, comme ailleurs dans le monde, les changements climatiques perturberont les processus régissant le cycle de l'eau, ce qui soulève des préoccupations quant à notre capacité à faire face à une éventuelle amplification des situations problématiques liées aux crues et aux étiages. Afin de limiter la vulnérabilité de la société québécoise aux aléas du climat, il devient profitable de mettre en place aujourd'hui des mécanismes d'adaptation garantissant à long terme une gestion durable des ressources hydriques. Pour planifier et mettre en œuvre cette adaptation, les acteurs de l'eau doivent cependant pouvoir compter sur des projections crédibles décrivant la disponibilité future de la ressource.

Dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec (PACC), le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) a produit l'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. Cet atlas présente un portrait clair et accessible de l'impact potentiel des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050 sur une grande portion du Québec méridional. Il marque un premier pas notable dans la production et la diffusion d'information soutenant l'adaptation aux changements climatiques. Le CEHQ poursuivra cet exercice dans le cadre du PACC 2013-2020. Il en étendra notamment la portée à l'ensemble des bassins versants du Québec méridional, mettra à profit de nouvelles générations de simulations climatiques et explorera des pratiques innovantes en matière de modélisation, un domaine en constante évolution.

Je souhaite saluer le travail et l'expertise de tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la mise en place de l'imposant dispositif de modélisation sur lequel repose l'essentiel de l'information présentée dans l'*Atlas*. À l'heure où le Québec souhaite mettre en œuvre des projets de société d'envergure, c'est avec enthousiasme que j'invite tous les acteurs de l'eau à se référer à cet atlas pour enrichir leur gouvernance et affirmer le caractère durable de la gestion des ressources en eau sur le territoire québécois.

Le sous-ministre adjoint de l'expertise hydrique, de l'analyse et des évaluations environnementales,

A blue ink signature of Jacques Dupont, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Jacques Dupont

Mars 2013

Mise en garde

L'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional* présente une synthèse pragmatique de l'état des connaissances décrivant l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique du Québec méridional. Ce document s'adresse d'abord aux professionnels du domaine des ressources hydriques et vise à soutenir l'adaptation aux changements climatiques. L'information présentée a été produite selon des pratiques de modélisation hydroclimatique largement reconnues par la communauté scientifique. L'utilisation d'un vaste ensemble de scénarios climatiques permet notamment une estimation adéquate de l'incertitude associée au signal de changement climatique. Considérant qu'aucune avancée majeure n'est anticipée dans le domaine de la modélisation hydroclimatique au cours des cinq prochaines années, les conclusions formulées à la section 1 ne devraient pas être bouleversées dans un avenir rapproché, mais plutôt raffinées ou précisées.

Le niveau de confiance accordé à l'information présentée dans l'*Atlas* est suffisamment élevé pour que soit entreprise une démarche d'adaptation dans plusieurs champs d'activité liés aux ressources hydriques. Cette confiance varie cependant selon le phénomène hydrologique et les régions du territoire. Elle est de plus conditionnelle à une interprétation adéquate des limites de l'information présentée :

- Les projections hydroclimatiques sont exclusivement disponibles pour les bassins versants dont les tributaires sont localisés sur la portion québécoise du fleuve Saint-Laurent en amont de Tadoussac et de Trois-Pistoles (voir [annexe 4](#));
- Les projections hydroclimatiques se limitent au régime naturel d'écoulement en surface des cours d'eau drainant une superficie supérieure à 500 km² (voir [annexe 4](#));
- Les projections hydroclimatiques excluent les scénarios climatiques marginaux et « surprises » (voir [annexe 2](#)).

Le lecteur est invité à prendre connaissance de l'information présentée en annexe décrivant les principaux éléments méthodologiques liés à la production de l'*Atlas*. En guise d'approfondissement, le rapport *Production de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional* (CEHQ, 2013) décrit plus largement les pratiques de modélisation hydroclimatique mises en œuvre. En cas de doute, le lecteur est invité à faire appel à des ressources interprétatives.

L'information présentée dans ce document est de nature générale et globale et est mise à votre disposition à titre informatif seulement. Le CEHQ et les auteurs ne garantissent pas la qualité, l'exactitude, l'exhaustivité, l'actualité des renseignements ou des données présentés dans le document ou leur utilité aux fins d'un usage particulier. La personne faisant usage du document assume l'entière responsabilité de cet usage. Sans limiter la généralité de ce qui précède, ce document ne devrait pas servir à des fins de conception, de construction, de fabrication ou d'installation et ne devrait pas être utilisé dans ce sens. Toute personne utilisant les données et l'information contenues dans ce document à des fins de conception, de construction, fabrication ou installation le fait à ses risques et périls. Pour toute question spécifique ou pour une adaptation de ce document à une situation précise, il est recommandé de faire appel à un spécialiste. Le CEHQ, les auteurs, ses employés, fonctionnaires ou agents n'assument aucune responsabilité pour toute action, erreur ou omission, utilisation, mauvaise utilisation et résultats découlant de l'utilisation totale ou partielle de ce document. En conséquence, le CEHQ n'est pas responsable de toute perte ou de tout dommage quel qu'il soit, y compris notamment des dommages directs ou indirects attribuables à l'utilisation de ce document.

Le gouvernement du Québec est titulaire des droits d'auteur sur tout document qu'il réalise. Dans l'éventualité où vous souhaitez reproduire ce document, veuillez adresser une demande écrite à l'adresse suivante : droit.auteur@cspq.gouv.qc.ca.

Table des matières

Avant propos	i
Mise en garde	ii
Section 1	
Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étéage et d'hydraulicité à l'horizon 2050.....	1
Section 2	
Atlas hydroclimatique du Québec méridional	7
Annexe 1 – La modélisation hydroclimatique	38
Annexe 2 – Les modèles climatiques.....	40
Annexe 3 – Le post-traitement des simulations climatiques.....	43
Annexe 4 – La plateforme de modélisation hydrologique	45
Annexe 5 – Les scénarios hydrologiques	47
Annexe 6 – L'analyse du signal de changement.....	48
Annexe 7 – Bibliographie	50
Remerciements	51

Atlas hydroclimatique du Québec méridional



Section 1

Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050

Le système climatique représente l'ensemble des interactions et rétroactions qui se produisent entre l'atmosphère, les océans et les eaux douces, la cryosphère, les terres émergées et la biosphère. La climatologie étudie les propriétés statistiques (ex. : moyenne, variabilité, extrêmes, distribution) des variables météorologiques (ex. : température, précipitation, pression atmosphérique, humidité, ensoleillement) sur de longues périodes, en général 30 ans. La climatologie se distingue de la météorologie, une science dont l'objectif consiste à prédire les conditions de l'atmosphère sur un court horizon de temps (quelques heures à environ dix jours). La climatologie ne s'attarde donc pas aux événements ponctuels (ex. : *La température maximale observée le 7 janvier 2013 est de -6 degrés Celsius*), mais plutôt à l'analyse statistique du comportement global du climat (ex. : *Depuis les 30 dernières années, la température observée le 7 janvier est en moyenne de -10 degrés Celsius*). Les changements climatiques se rapportent ainsi à l'évolution des tendances statistiques décrivant le comportement du climat (ex. : *À l'horizon 2050, la température moyenne pour un 7 janvier augmenterait de 2 degrés Celsius par rapport à la moyenne des 30 dernières années*).

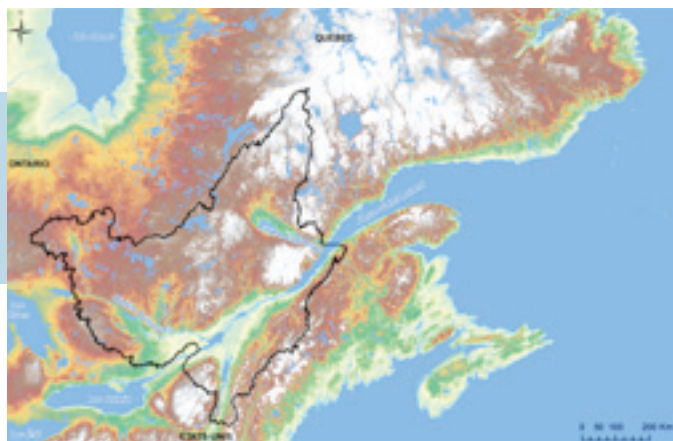
Il est anticipé que les changements climatiques provoqueront un changement du régime d'écoulement des eaux de surface. Cet impact peut être évalué en modélisant les processus de l'atmosphère et du cycle de l'eau à l'aide de simulateurs numériques (voir [annexes 1 à 4](#)). Pour différentes conditions climatiques projetées dans le futur, un ensemble de scénarios hydrologiques sont simulés puis analysés (voir [annexe 5](#)). Cette analyse implique le passage d'une vision déterministe (un seul changement possible) à une vision probabiliste impliquant un ensemble de changements possibles. Dans l'*Atlas*, le changement est présenté sous la forme de trois composantes principales : le consensus sur la direction du changement (la proportion des scénarios hydrologiques indiquant une augmentation ou bien une diminution), l'ampleur du changement (la médiane de l'ensemble des valeurs de changement) et la dispersion (la largeur de l'enveloppe comprenant les valeurs probables autour de la médiane). Le lecteur est invité à consulter l'[annexe 6](#) pour une description détaillée de ces composantes. Le tableau 1 propose une synthèse décrivant l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique du Québec méridional. Pour différents phénomènes hydrologiques d'intérêt (ex. : crue printanière, étiage estival, hydraulicité¹), 10 conclusions sont formulées puis associées à des questions types d'utilisateurs potentiels. Cette synthèse s'appuie sur une interprétation des auteurs de l'*Atlas*.

¹ Les notions de crue et d'étiage font respectivement référence aux forts et faibles débits. La notion d'hydraulicité fait référence aux débits moyens sur de longues périodes (mois ou année).

Tableau 1 : Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050 sur le Québec méridional²

Phénomène hydrologique	Question	Conclusions
Crues printanières	1. La pointe des crues printanières sera-t-elle plus ou moins élevée?	<p>À l'horizon 2050, il est difficile de se prononcer sur le changement de la pointe de crue printanière.</p> <p>La pointe des crues printanières communes (récurrence de 2 ans) pourrait augmenter légèrement (+5 %) au nord du Québec méridional et diminuer au sud du territoire (-5 à -10 %). Le consensus des projections sur la direction du changement est cependant faible en raison d'une dispersion élevée (+/-10 %). Pour les crues printanières rares (récurrence de 20 ans), le signal de changement est faible, c'est-à-dire que la dispersion est forte et centrée sur zéro.</p> <p>Voir figure 1 et figure 2.</p>
	2. Le volume des crues printanières sera-t-il plus ou moins élevé?	<p>À l'horizon 2050, les crues printanières seront vraisemblablement moins volumineuses au sud du territoire.</p> <p>Le volume des crues printanières (évalué sur 14 jours) diminuerait au sud du territoire (-10 %). Le consensus des projections sur la direction du changement est modéré (de 66 % à 90 % des projections indiquent une diminution), la dispersion demeure relativement forte (+/-10 %). Au nord du Québec méridional, le volume des crues printanières pourrait augmenter légèrement (moins de +5 %). Le consensus des projections sur la direction du changement (augmentation) est cependant très faible et la dispersion, forte (+/-10 %). Le signal de changement des crues communes (récurrence de 2 ans) et rares (récurrence de 20 ans) est similaire.</p> <p>Voir figure 3 et figure 4.</p>
	3. Les crues printanières se produiront-elles plus tôt ou plus tard?	<p>À l'horizon 2050, les crues printanières seront fort probablement plus hâtives sur l'ensemble du Québec méridional.</p> <p>Le jour d'occurrence de la pointe de crue printanière serait devancé de une à deux semaines. Le consensus sur la direction du changement (devancement) est très fort sur l'ensemble du Québec méridional (plus de 90 % des projections indiquent un devancement).</p> <p>Voir figure 5.</p>

² Le Québec méridional fait ici référence aux bassins versants dont les tributaires sont localisés dans la portion québécoise du fleuve Saint-Laurent en amont de Tadoussac et de Trois-Pistoles (voir annexe 4). À des fins de simplification, « sud du territoire » fait référence à la zone inférieure du bassin versant de la rivière Outaouais ainsi qu'à la vallée du Saint-Laurent et « nord du Québec méridional » fait référence à la zone supérieure du bassin versant de la rivière Outaouais ainsi qu'au bassin versant du Saguenay.



Phénomène hydrologique	Question	Conclusions
Crues d'été et d'automne	4. La pointe des crues d'été et d'automne sera-t-elle plus ou moins élevée?	<p>À l'horizon 2050, la pointe des crues observées à l'été et à l'automne pourrait augmenter au nord du Québec méridional.</p> <p>La pointe des crues communes (récurrence de 2 ans) observées à l'été et à l'automne pourrait augmenter (+10 %) au nord du Québec méridional. Le consensus des projections sur la direction du changement est faible à modéré, la dispersion demeurant relativement forte (+/-10 %). Au sud du territoire, le signal de changement est faible, la dispersion étant forte (+/-20 %) et centrée sur zéro. La pointe des crues rares (récurrence de 20 ans) observées à l'été et à l'automne devrait augmenter sur l'ensemble du Québec méridional. L'ampleur du changement serait de l'ordre de +15 % au nord du Québec méridional et de +5 % au sud du territoire.</p> <p>Voir figure 6 et figure 7.</p>
Étiages d'été et d'automne	5. Les étiages d'été et d'automne seront-ils plus ou moins sévères?	<p>À l'horizon 2050, le débit des étiages d'été et d'automne sera fort probablement plus faible sur le Québec méridional.</p> <p>Le débit des étiages communs (récurrence de 2 ans, évalué sur 7 jours) d'été et d'automne diminuerait de -15 % sur l'ensemble du Québec méridional. Le consensus des projections sur la direction du changement est très fort (plus de 90 % des projections indiquent une diminution). La dispersion est relativement faible (+/-5 %).</p> <p>Voir figure 8.</p>
	6. Les étiages d'été et d'automne seront-ils plus ou moins longs?	<p>À l'horizon 2050, les étiages d'été et d'automne seront fort probablement plus longs.</p> <p>Le nombre de jours sous les débits d'étiage commun (récurrence de 2 ans, évalué sur 7 jours) estimé pour la période été-automne de référence augmenterait en moyenne de 15 à 30 jours sur le sud du territoire et de 0 à 15 jours au nord du Québec méridional. Le consensus des projections sur la direction du changement (augmentation) est très fort sur le sud du territoire (plus de 90 % des projections indiquent une diminution) et modéré au nord du Québec méridional (de 66 % à 90 %).</p> <p>Voir figure 9.</p>

Phénomène hydrologique	Question	Conclusions
Hydraullicité	7. L'hydraullicité annuelle sera-t-elle plus ou moins forte?	<p>À l'horizon 2050, l'hydraullicité annuelle sera vraisemblablement plus forte au nord du Québec méridional.</p> <p>L'augmentation du débit moyen annuel serait de l'ordre de +5 % au nord du Québec méridional. La dispersion associée au signal y demeure relativement forte (+/- 5 %). Au sud du territoire, le signal de changement est faible. L'ampleur est inférieure à +5 % et la dispersion supérieure à +/-5 %.</p> <p>Voir figure 10.</p>
	8. L'hydraullicité de la période hiver-printemps sera-t-elle plus ou moins forte?	<p>À l'horizon 2050, l'hydraullicité de la période hiver-printemps sera fort probablement plus forte sur l'ensemble du Québec méridional.</p> <p>L'augmentation du débit moyen pour la période hiver-printemps serait de l'ordre de +10 %. La dispersion est légèrement supérieure à +/-5 %. Le consensus sur la direction du changement est très fort au nord du Québec méridional (plus de 90 % des scénarios indiquent une augmentation) et modéré au sud du territoire (de 66 à 90 % des scénarios pointent vers une augmentation).</p> <p>Voir figure 11.</p>
	9. À l'horizon 2050, l'hydraullicité de la période été-automne sera-t-elle plus ou moins forte?	<p>À l'horizon 2050, l'hydraullicité de la période été-automne sera vraisemblablement plus faible au sud du territoire et vraisemblablement stable au nord du Québec méridional.</p> <p>La diminution du débit moyen pour la période été-automne serait de l'ordre de -10 % au sud du territoire, la dispersion demeurant cependant forte (+/-10 %). Au nord du Québec méridional, le débit moyen pour la période été-automne demeurerait relativement stable car la dispersion est modérée (+/-5 %) et centrée sur zéro.</p> <p>Voir figure 12.</p>
	10. À l'horizon 2050, le régime saisonnier d'hydraullicité sera-t-il modifié?	<p>À l'horizon 2050, l'hydraullicité sera fort probablement plus forte de décembre à mars et vraisemblablement moins forte de mai à octobre.</p> <p>L'augmentation des débits moyens mensuels serait de l'ordre de 50 % pour les mois de décembre à mars. La diminution des débits moyens mensuels de mai à octobre serait de l'ordre de 25 %.</p> <p>Voir figures 13 à 24.</p>



Photo : Gilles Gaudette

Atlas hydroclimatique du Québec méridional



Section 2

Atlas hydroclimatique du Québec méridional

Cette section constitue l'*Atlas hydroclimatique du Québec méridional* proprement dit. Elle présente un ensemble de projections hydroclimatiques à l'horizon 2050 pour le Québec méridional, classées selon différents indicateurs hydrologiques. Un indicateur hydrologique est une expression mathématique quantifiant une caractéristique statistique d'un phénomène hydrologique d'intérêt. Pour chaque indicateur, quatre cartes présentent les trois composantes du signal de changement (direction, ampleur et dispersion, voir [annexe 6](#)) ainsi qu'une estimation de l'état actuel de l'indicateur basée sur les observations hydrométriques à la station. Les valeurs affichées correspondent à l'exutoire de 40 bassins versants jaugés dont le régime d'écoulement n'est pas influencé par la présence de barrages. Afin de naviguer efficacement à travers les cartes de l'*Atlas*, le lecteur est invité à consulter le [tableau 2](#). Ce tableau associe les indicateurs hydrologiques aux phénomènes hydrologiques d'intérêt et indique à quelle figure se trouvent les projections hydroclimatiques correspondantes. La version électronique du document propose des liens cliquables.

Tableau 2 : Atlas hydroclimatique du Québec méridional

Phénomène hydrologique	Caractéristique	Type	Indicateur hydrologique	
Crues printanières	Amplitude	Crues communes	$Q_{\max 2_p}$	
		Crues rares	$Q_{\max 20_p}$	
	Volume	Crues communes	$Q_{1,4_{\max 2_p}}$	
		Crues rares	$Q_{1,4_{\max 20_p}}$	
Synchronisme		$J_{Q_{\max P}}$		
Crues d'été et d'automne	Amplitude	Crues communes	$Q_{\max 2_{EA}}$	
		Crues rares	$Q_{\max 20_{EA}}$	
Étiages d'été et d'automne	Sévérité	Étiages communs	$Q_{7_{\min 2_{EA}}}$	
	Durée		$NJ_{Q_{7_{\min 2_{EA}}}}$	
Hydraulicité	Annuelle	Annuelle	Q_{moy}	
		Printemps	$Q_{\text{moy}_{HP}}$	
		Été-automne	$Q_{\text{moy}_{EA}}$	
	Mensuelle	Volume		Q_{moy_1}
				Q_{moy_2}
				Q_{moy_3}
				Q_{moy_4}
				Q_{moy_5}
				Q_{moy_6}
				Q_{moy_7}
				Q_{moy_8}
				Q_{moy_9}
	$Q_{\text{moy}_{10}}$			
	$Q_{\text{moy}_{11}}$			
	$Q_{\text{moy}_{12}}$			

	Description	Figure	Page
	Débit journalier [Q] – valeur maximale [max] – récurrence de 2 ans [2] – évalué au printemps [p]	1	10
	Débit journalier [Q] – valeur maximale [max] – récurrence de 20 ans [20] – évalué au printemps [p]	2	11
	Débit moyen sur 14 jours [Q ₁₄] – valeur maximale [max] – récurrence de 2 ans [2] – évalué au printemps [p]	3	12
	Débit moyen sur 14 jours [Q ₁₄] – valeur maximale [max] – récurrence de 20 ans [20] – évalué au printemps [p]	4	13
	Jour d'occurrence [J] du débit maximal [Q _{max}] – évalué au printemps [p] – valeur moyenne	5	15
	Débit journalier [Q] – valeur maximale [max] – récurrence de 2 ans [2] – évalué sur la période été-automne [E _A]	6	16
	Débit journalier [Q] – valeur maximale [max] – récurrence de 20 ans [20] – évalué sur la période été-automne [E _A]	7	17
	Débit moyen sur 7 jours [Q ₇] – valeur minimale [min] – récurrence de 2 ans [2] – évalué sur la période été-automne [E _A]	8	18
	Nombre de jours par année [NJ] sous le Q ₇ min2 _{E_A} – valeur médiane	9	19
	Débit moyen [Qmoy] annuel	10	21
	Débit moyen [Qmoy] – évalué sur la période hiver-printemps [H _P]	11	22
	Débit moyen [Qmoy] – évalué sur la période été-automne [E _A]	12	23
	Débit moyen [Qmoy] – janvier [1]	13	24
	Débit moyen [Qmoy] – février [2]	14	25
	Débit moyen [Qmoy] – mars [3]	15	26
	Débit moyen [Qmoy] – avril [4]	16	27
	Débit moyen [Qmoy] – mai [5]	17	28
	Débit moyen [Qmoy] – juin [6]	18	29
	Débit moyen [Qmoy] – juillet [7]	19	30
	Débit moyen [Qmoy] – août [8]	20	31
	Débit moyen [Qmoy] – septembre [9]	21	32
	Débit moyen [Qmoy] – octobre [10]	22	33
	Débit moyen [Qmoy] – novembre [11]	23	34
	Débit moyen [Qmoy] – décembre [12]	24	35

Figure 1 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit journalier maximal de récurrence 2 ans évalué au printemps ■ Q_{max2p}

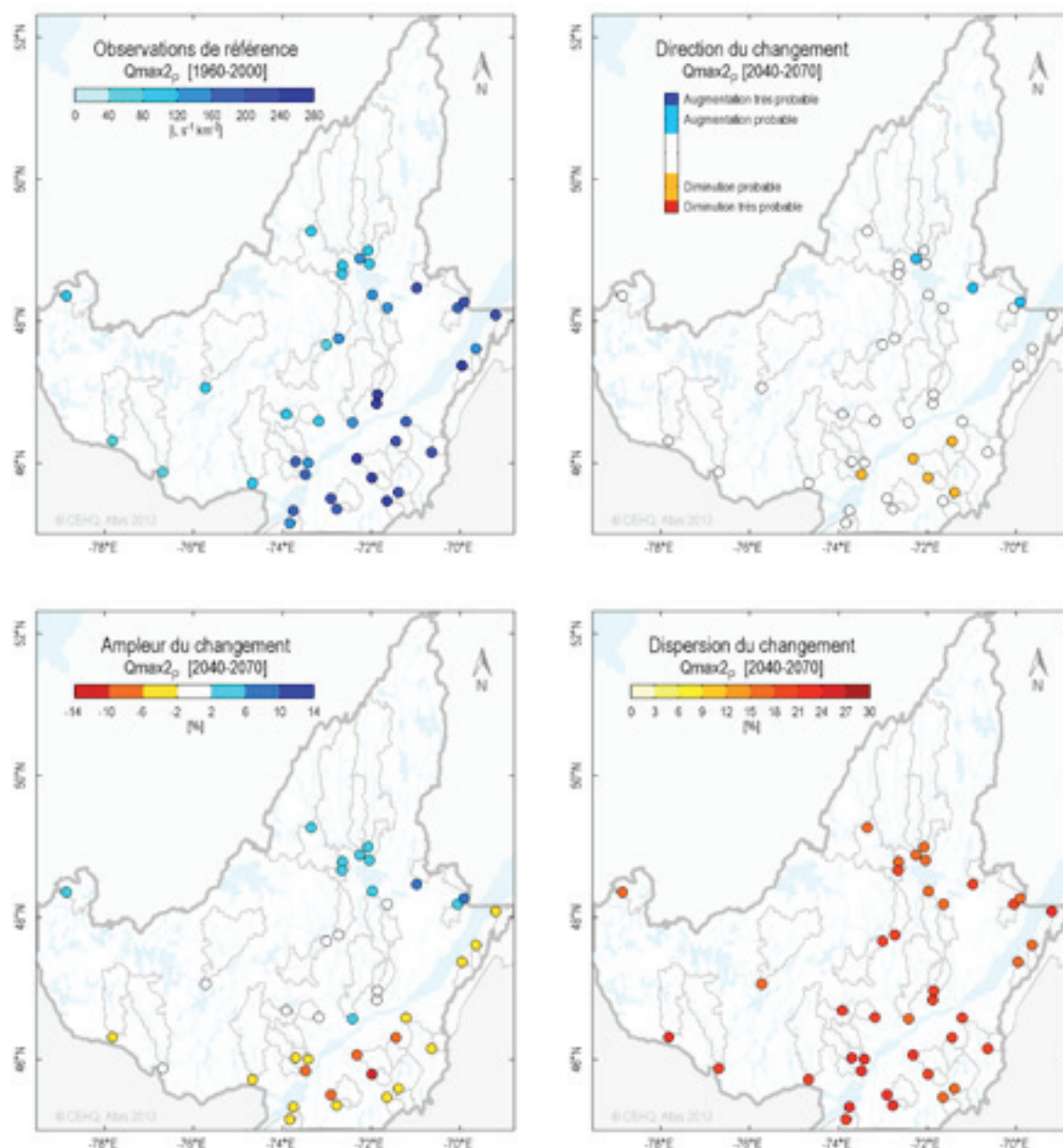


Figure 2 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit journalier maximal de récurrence 20 ans évalué au printemps ■ Q_{max20_p}

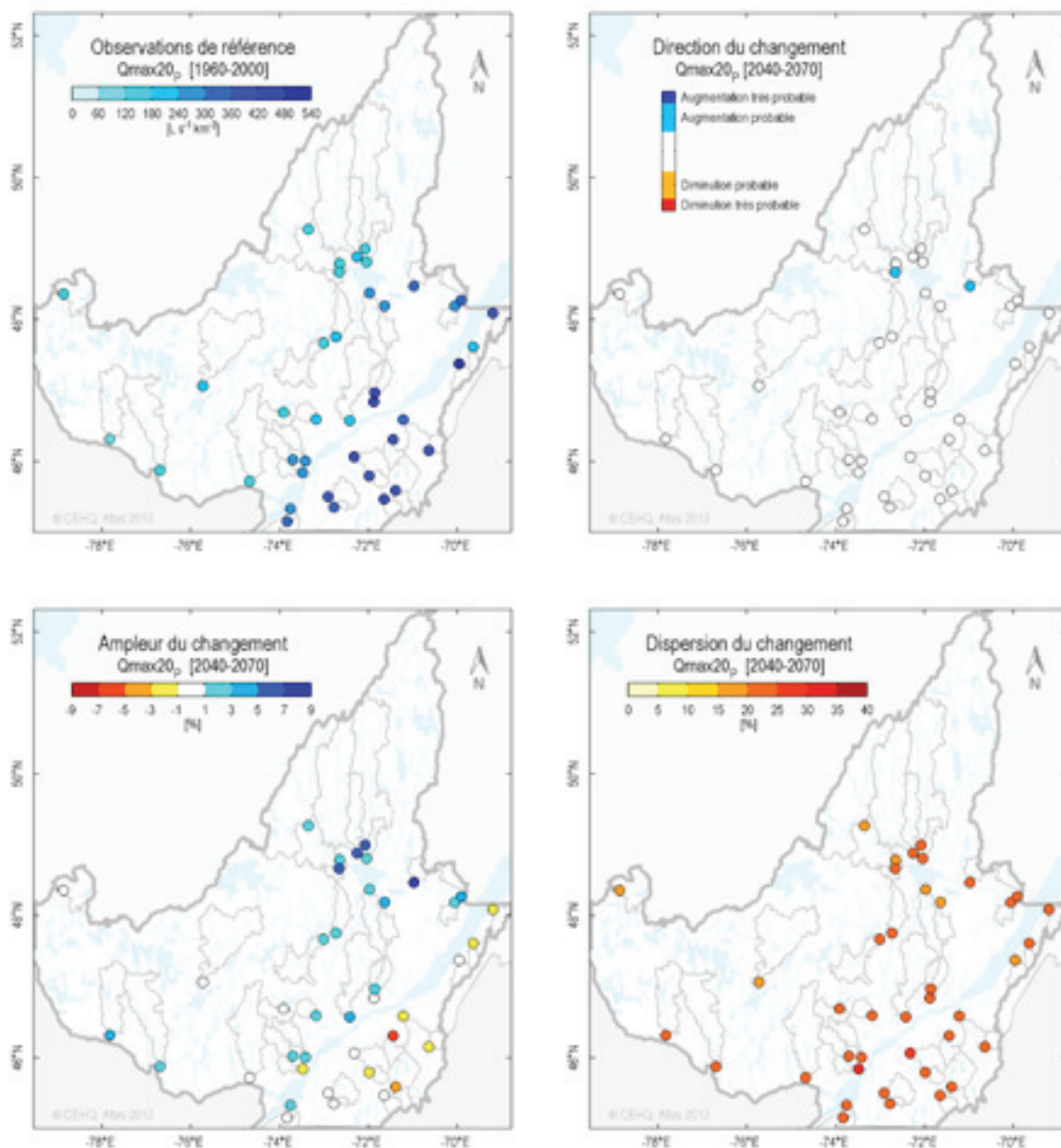


Figure 3 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen sur 14 jours maximal de récurrence 2 ans évalué au printemps ■ $Q_{14,max2_p}$

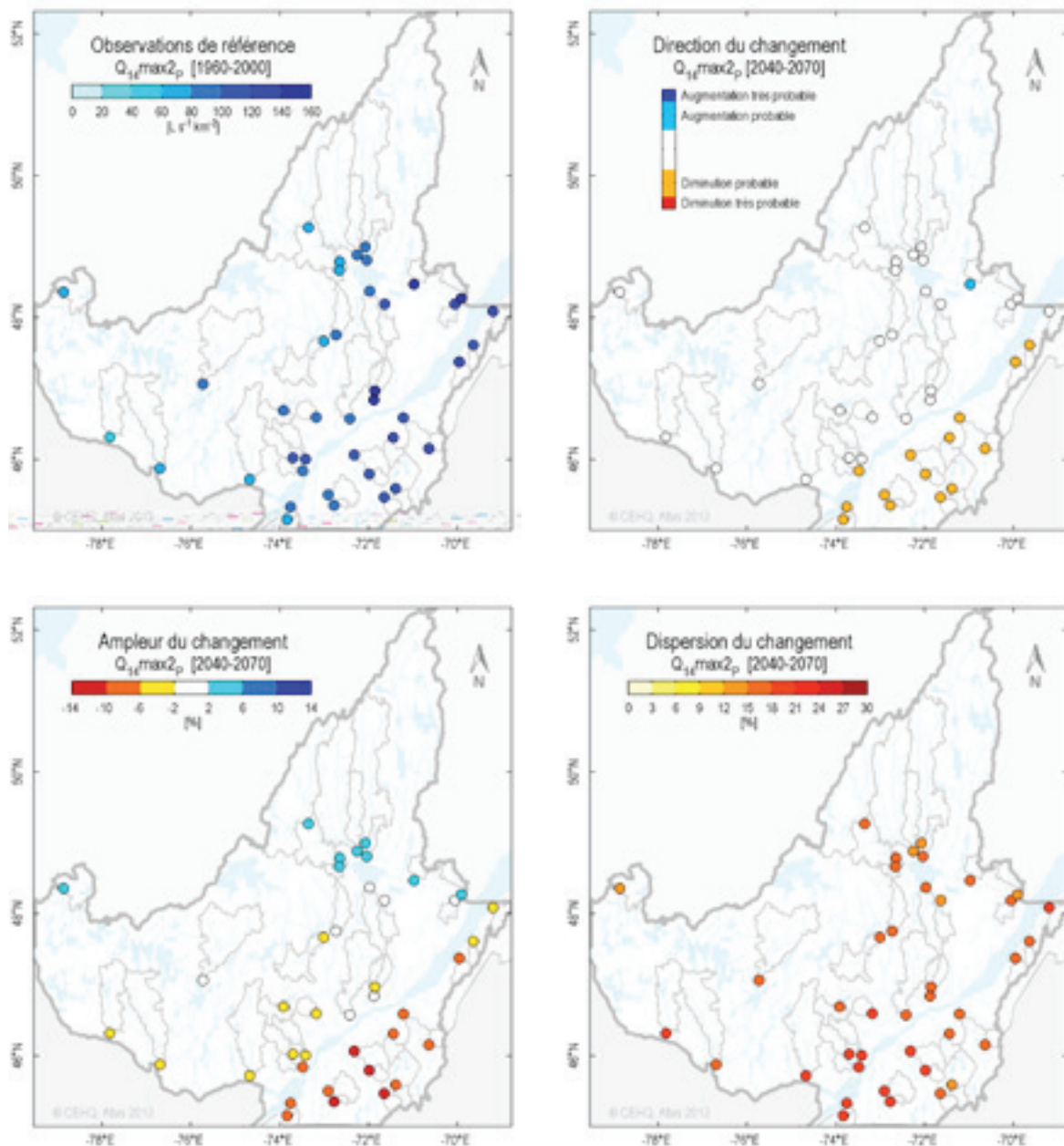


Figure 4 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen sur 14 jours maximal de récurrence 20 ans évalué au printemps ■ $Q_{14,max20_p}$

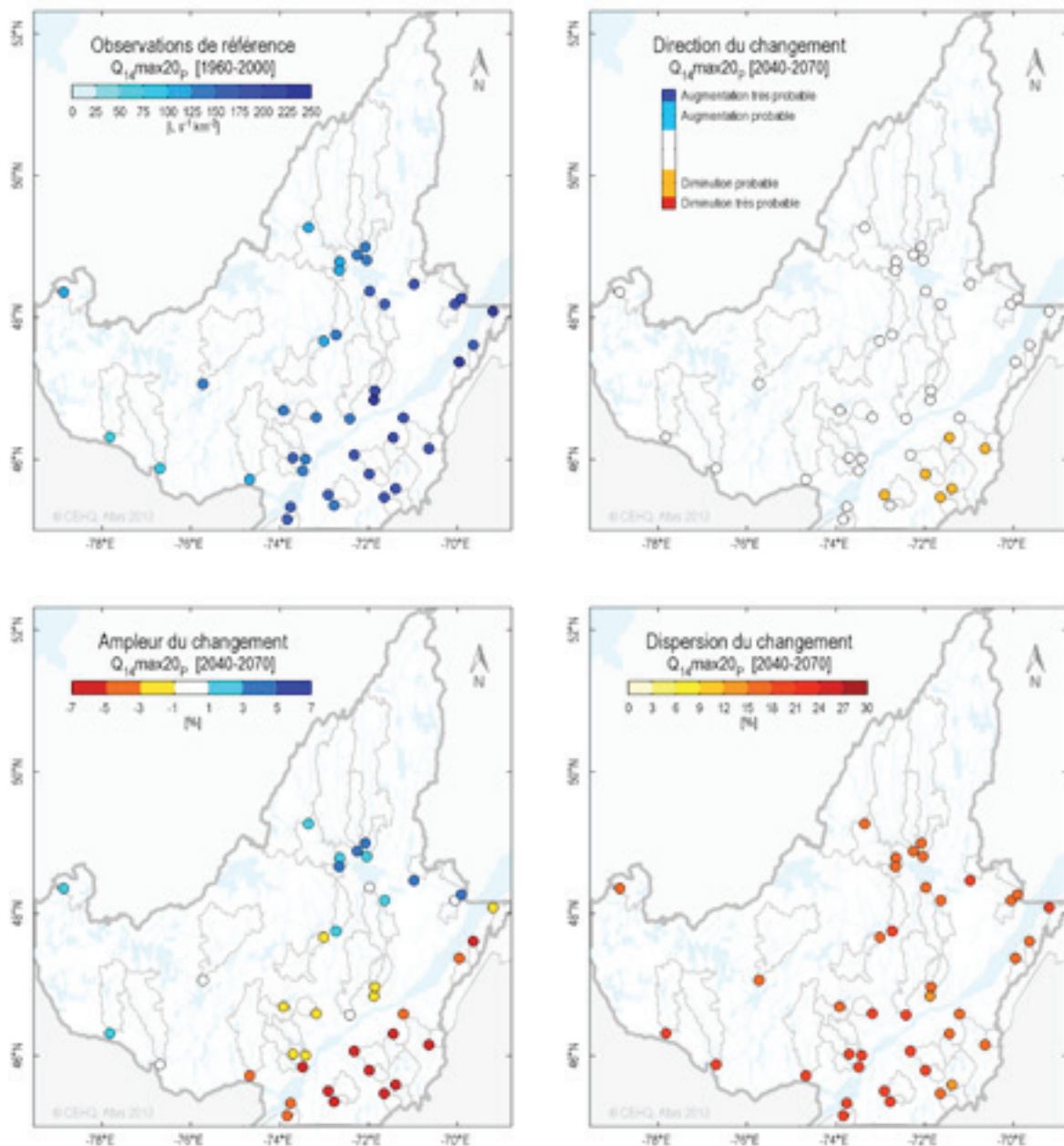




Figure 5 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Jour d’occurrence du débit maximal évalué au printemps (valeur moyenne) ■ $J_{Q_{maxP}}$

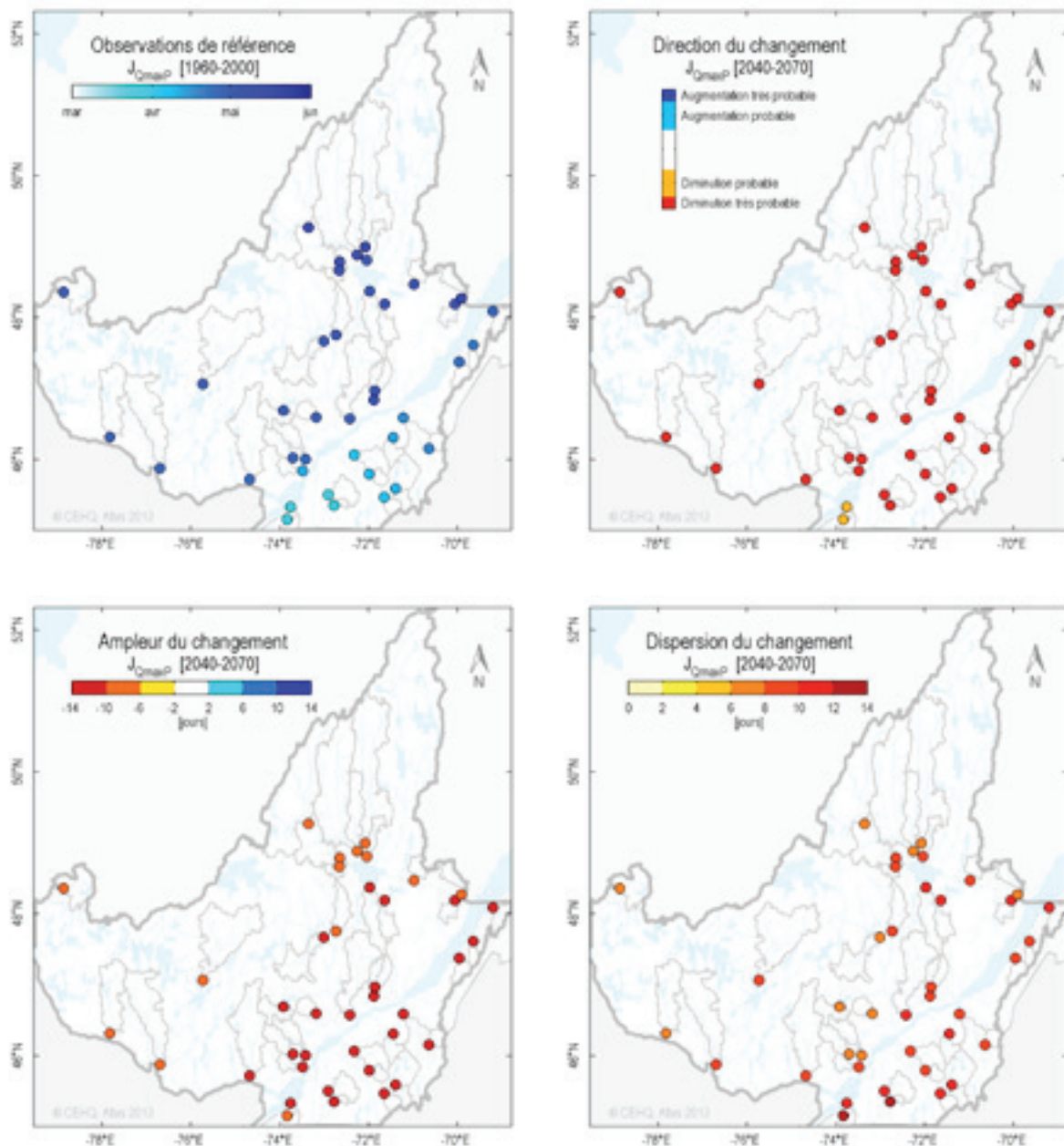


Figure 6 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit journalier maximal de récurrence 2 ans évalué à l’été et à l’automne ■ $Q_{max2_{EA}}$

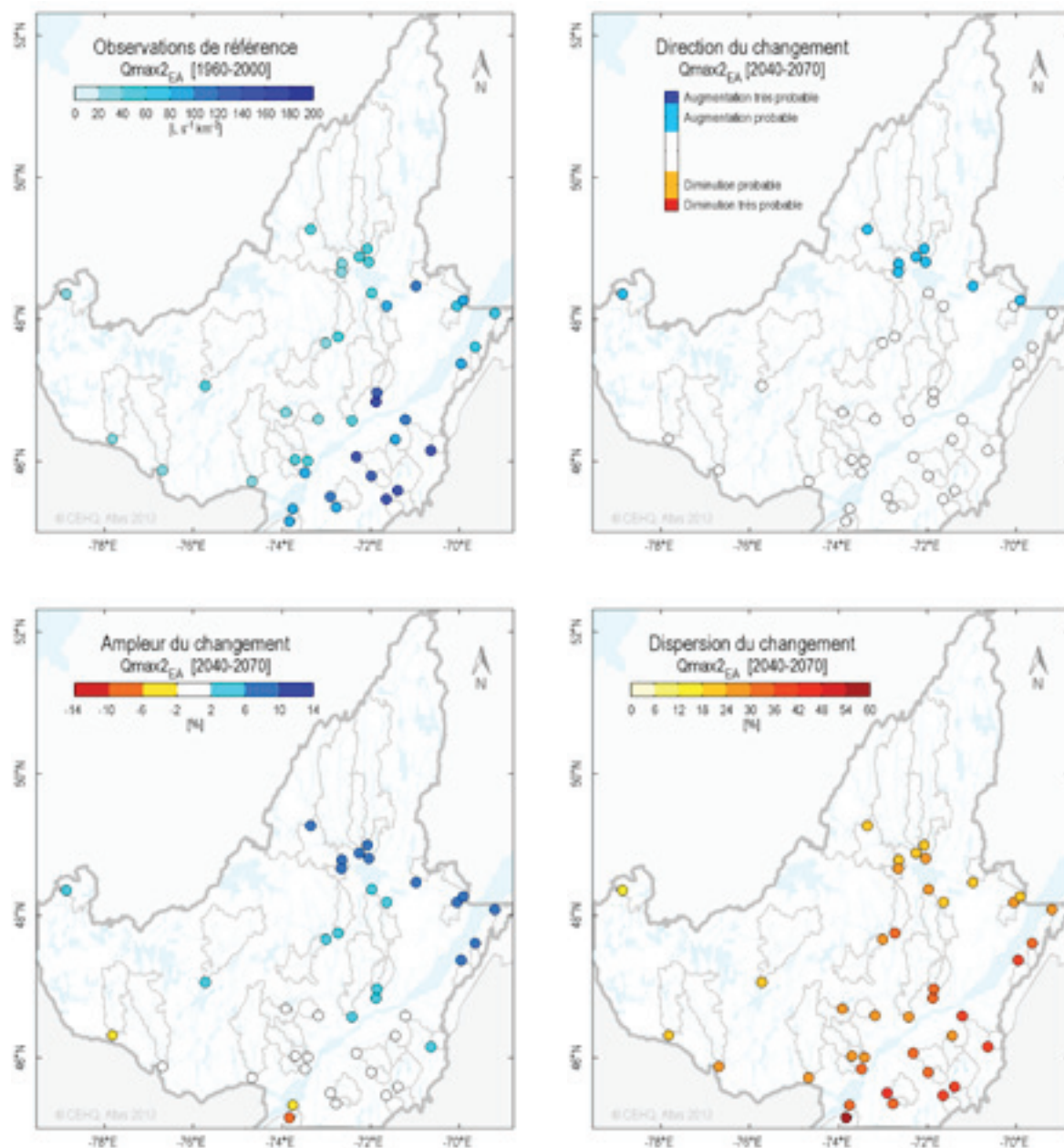


Figure 7 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit journalier maximal de récurrence 20 ans évalué à l’été et à l’automne ■ $Q_{max20_{EA}}$

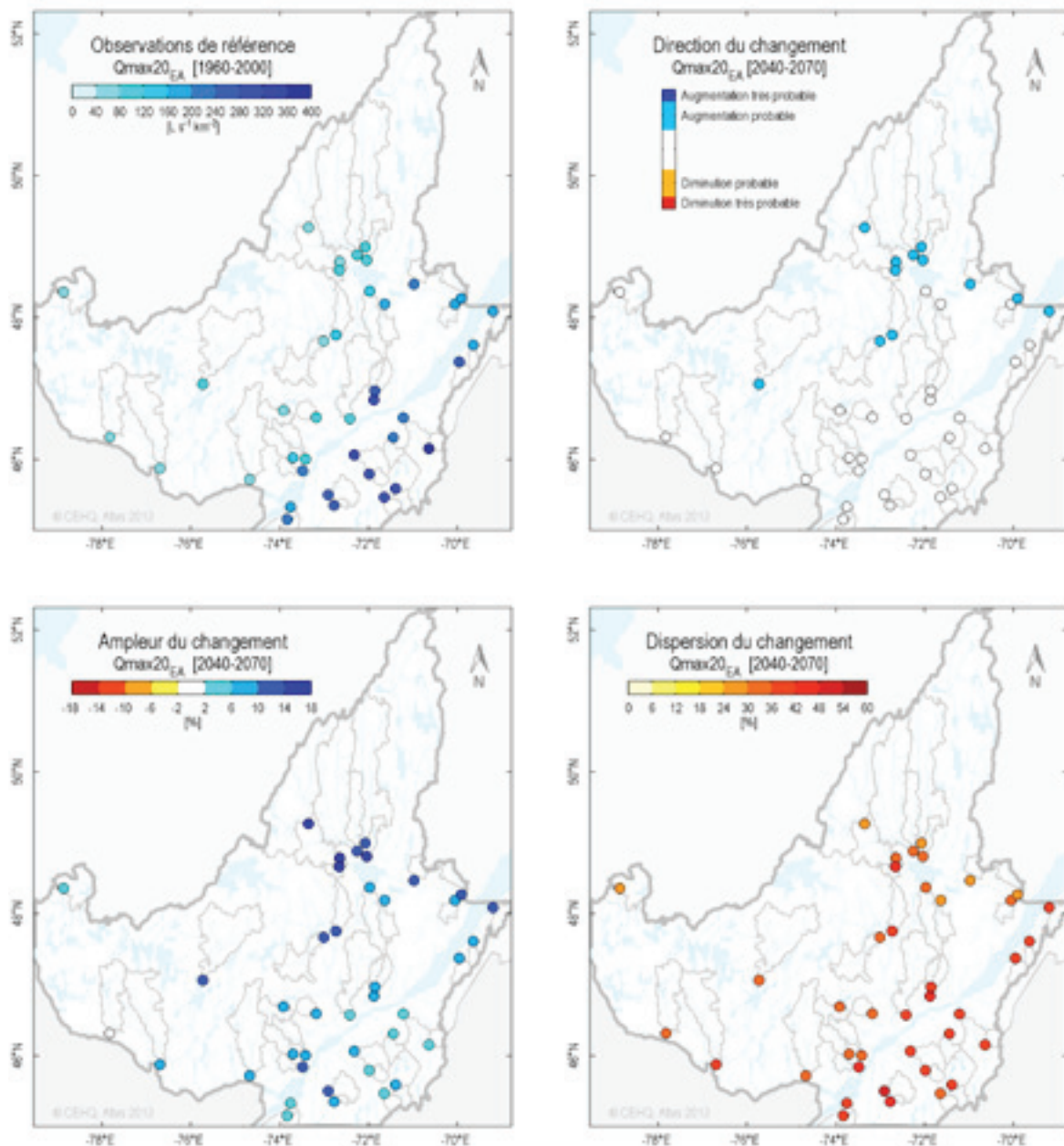


Figure 8 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen sur 7 jours minimal de récurrence 2 ans évalué à l’été et à l’automne ■ $Q_{7,min2_{EA}}$

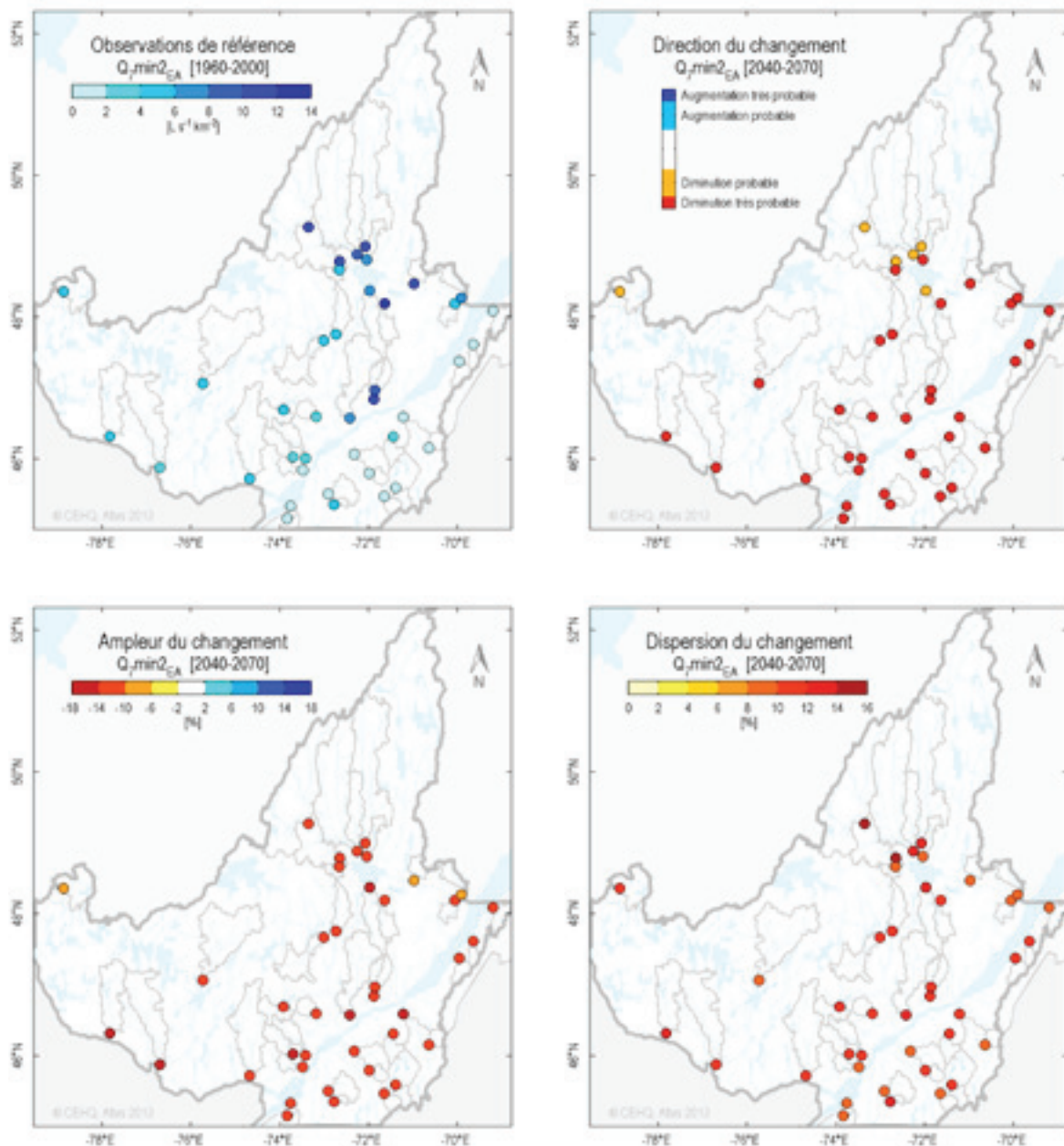


Figure 9 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Nombre de jours par année sous le $Q_{7min2EA}$ (valeur moyenne) ■ $NJ_{Q_{7min2EA}}$

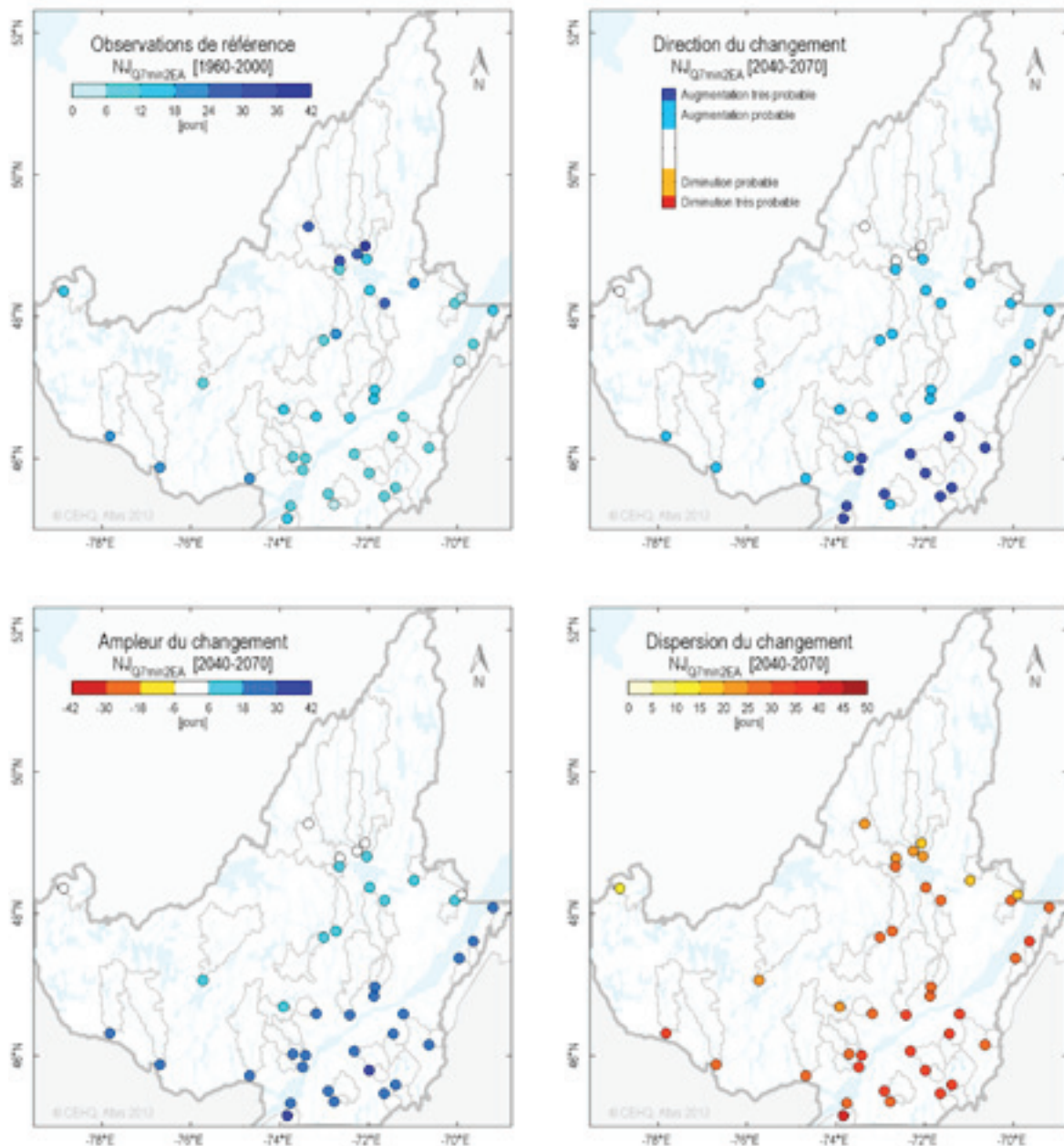




Figure 10 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050
Débit moyen annuel Q_{moy}

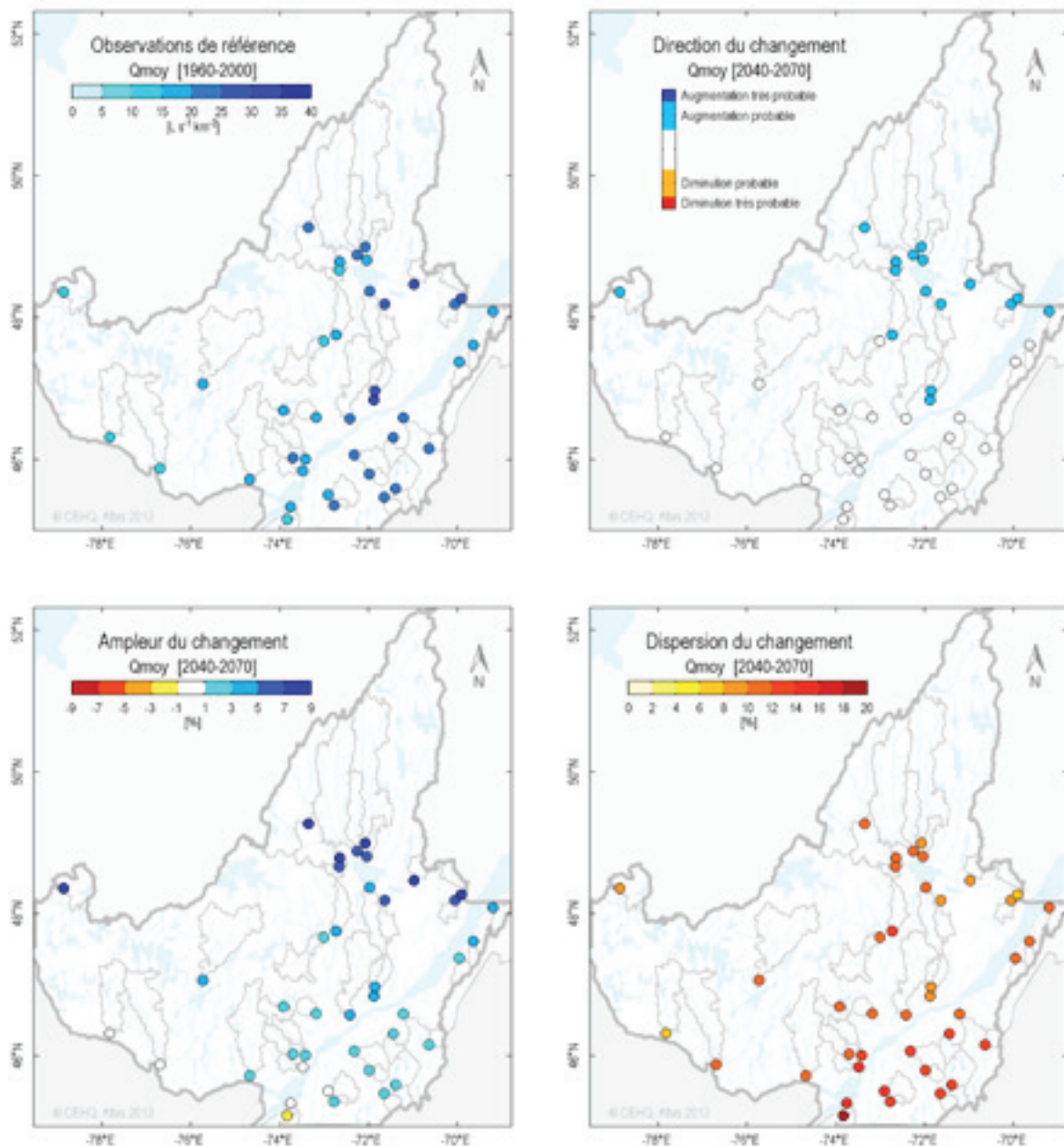


Figure 11 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué à l’hiver et au printemps ■ $Q_{moy_{HP}}$

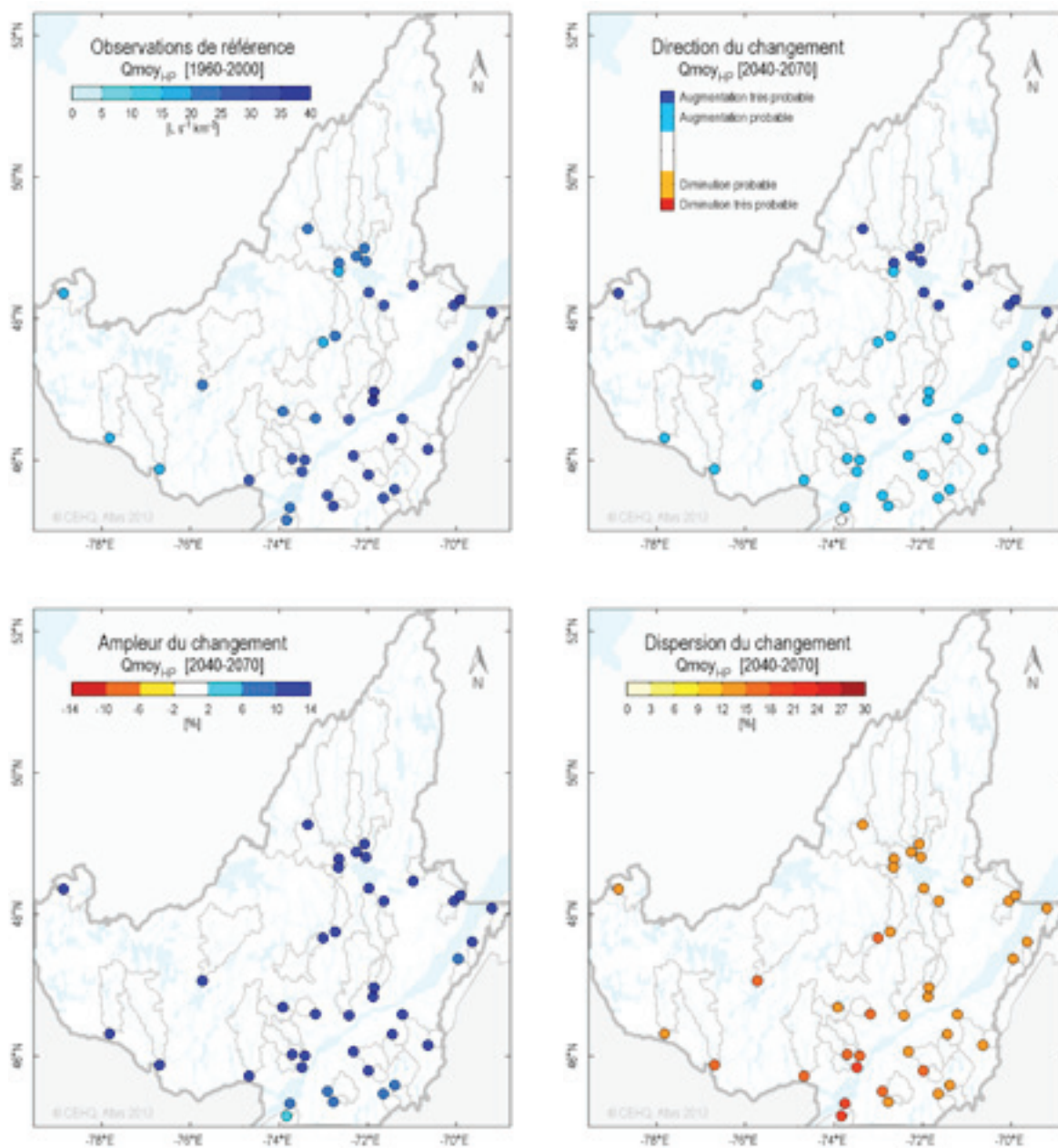


Figure 12 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué à l’été et à l’automne ■ $Q_{moy_{EA}}$

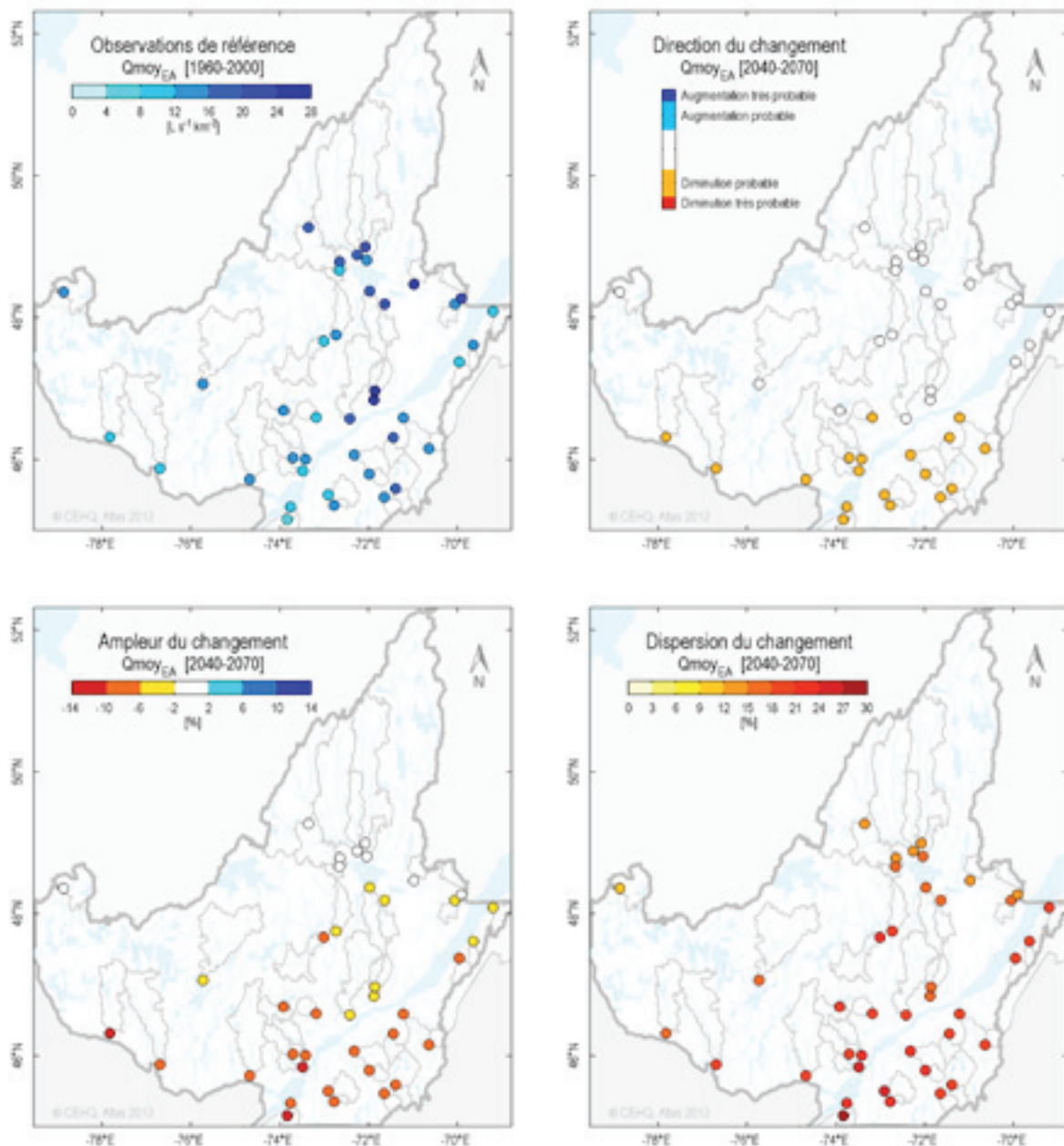


Figure 13 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de janvier Q_{moy_1}

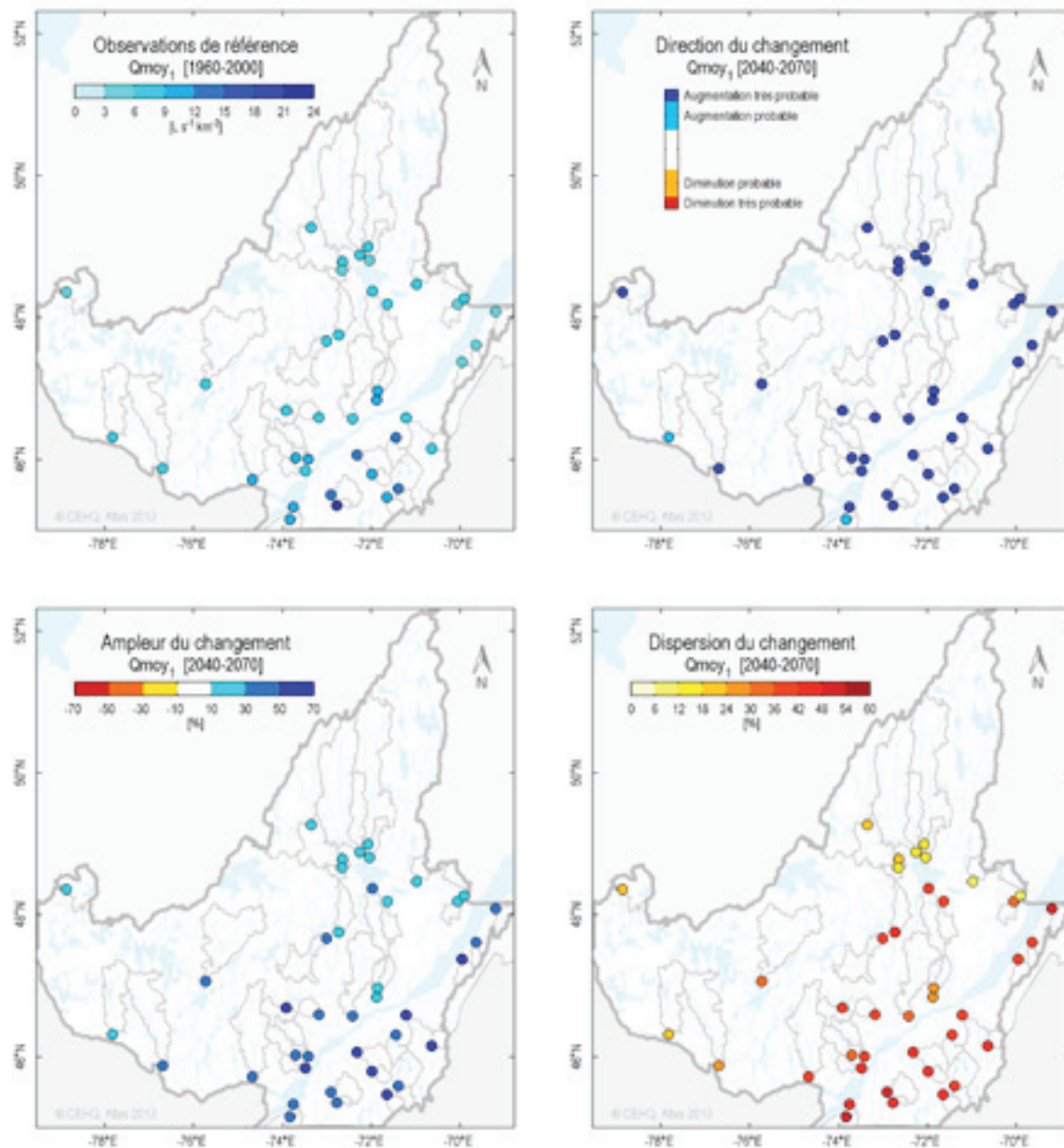


Figure 14 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de février ■ Q_{moy_2}

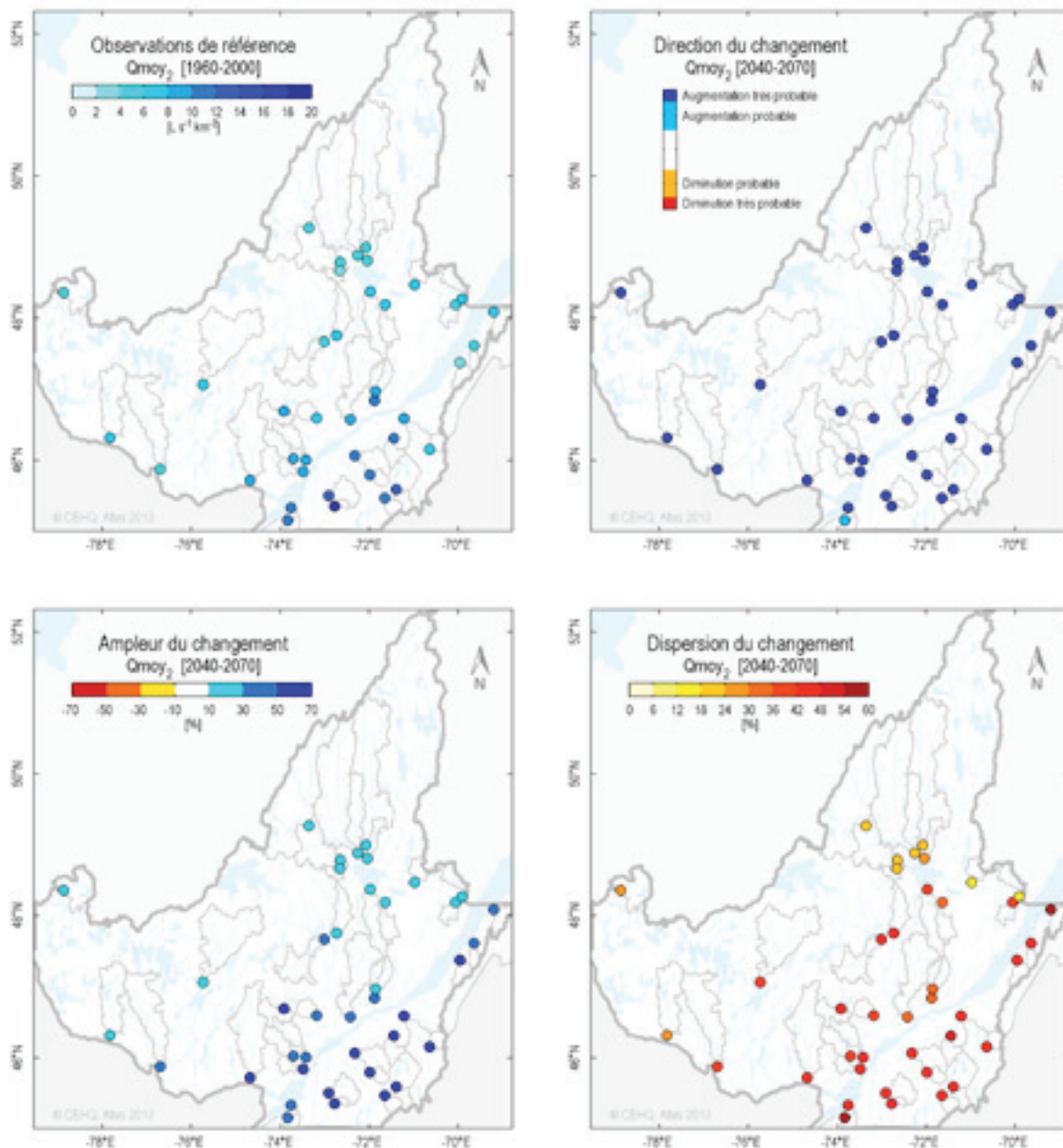


Figure 15 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de mars ■ Q_{moy_3}

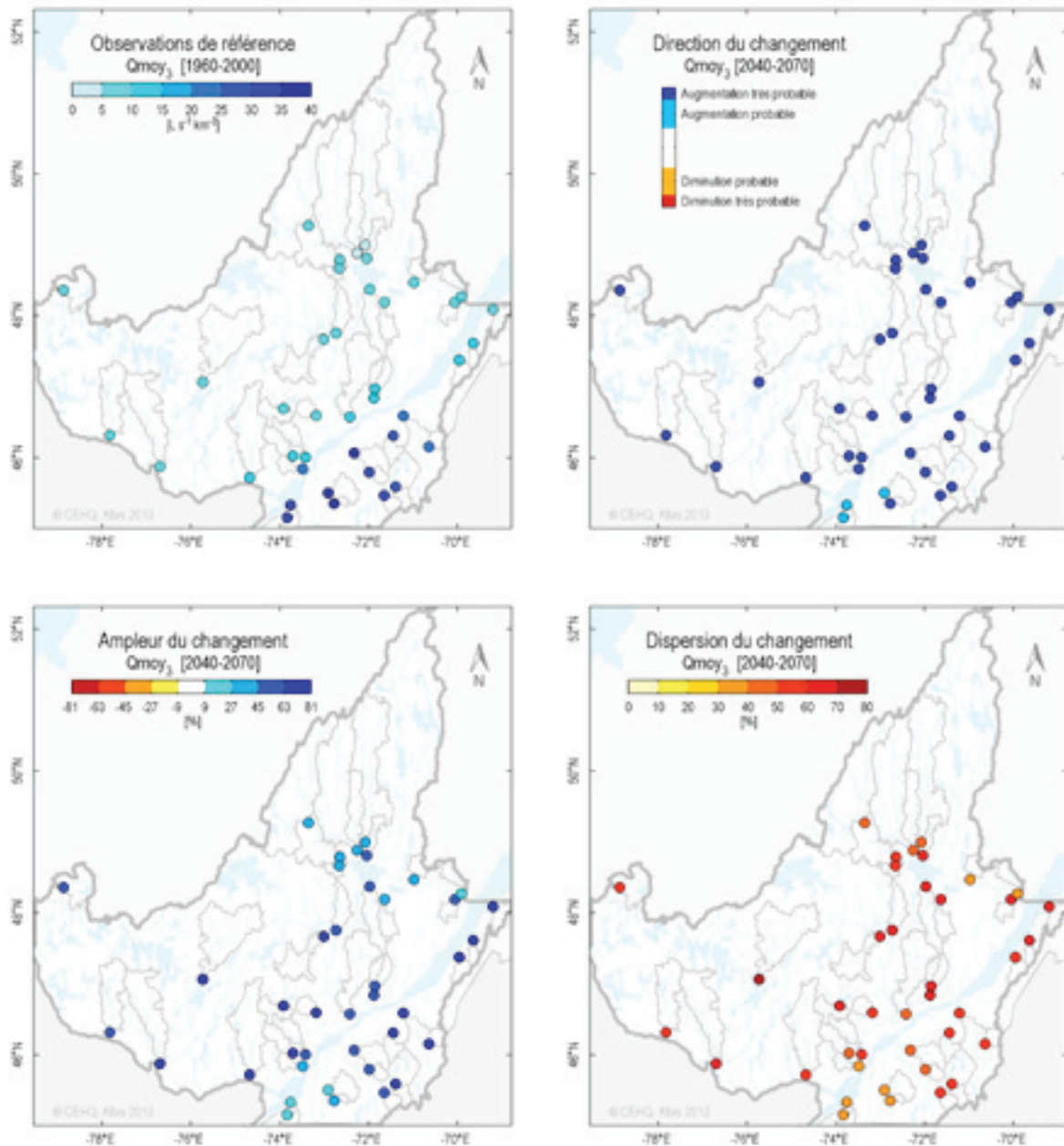


Figure 16 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois d’avril ■ Q_{moy_4}

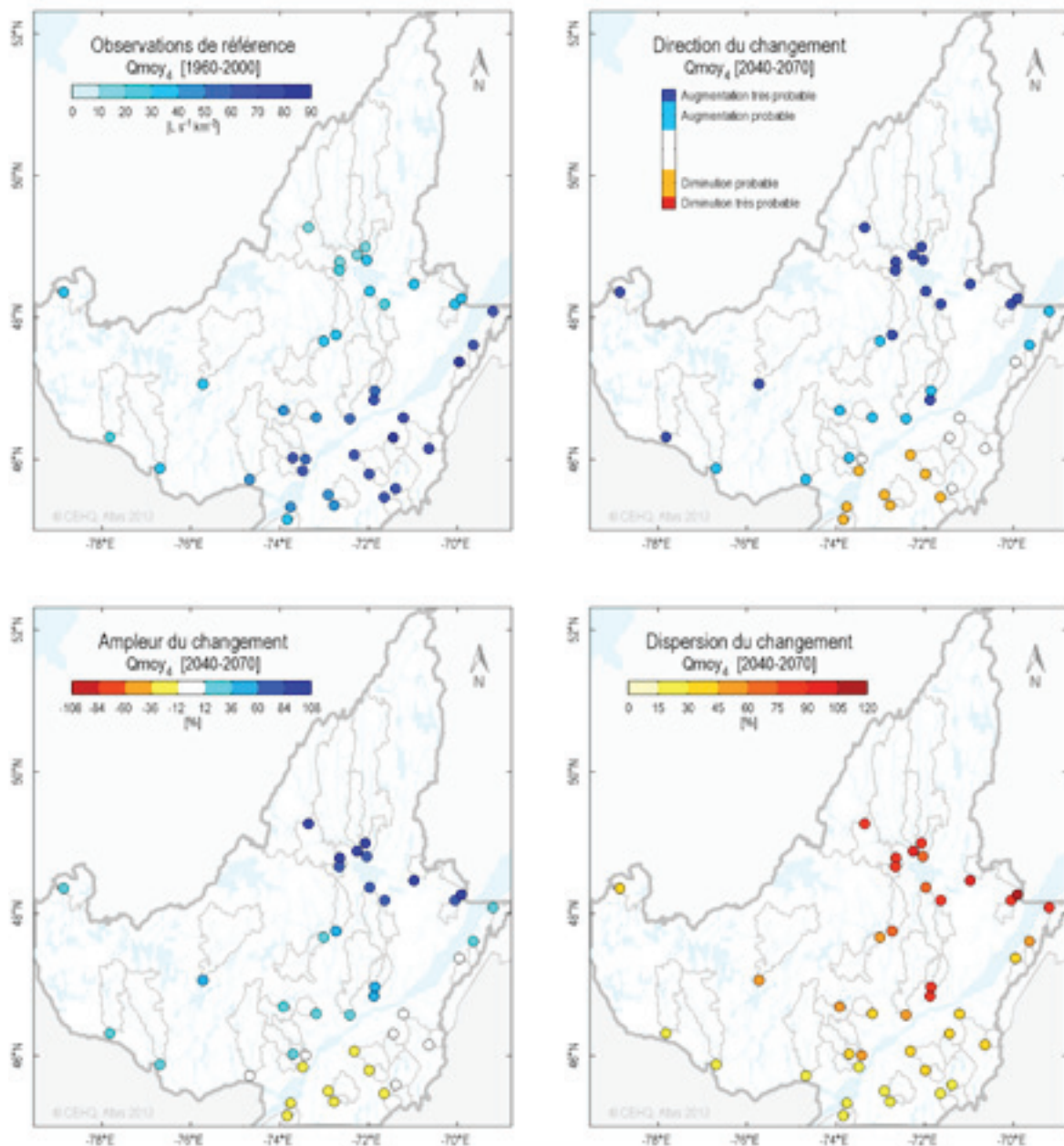


Figure 17 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de mai ■ Q_{moy_5}

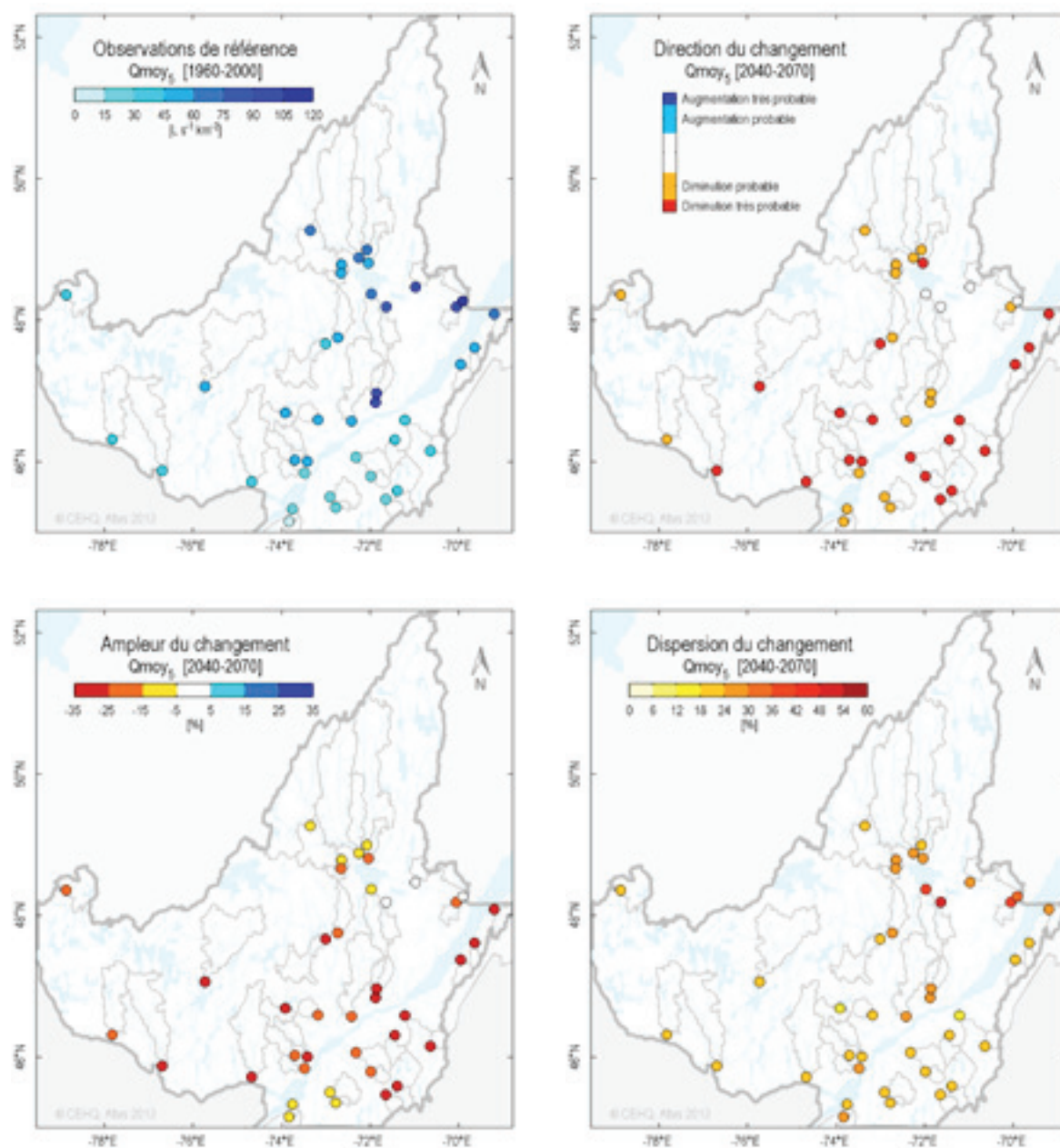


Figure 18 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de juin ■ Q_{moy_6}

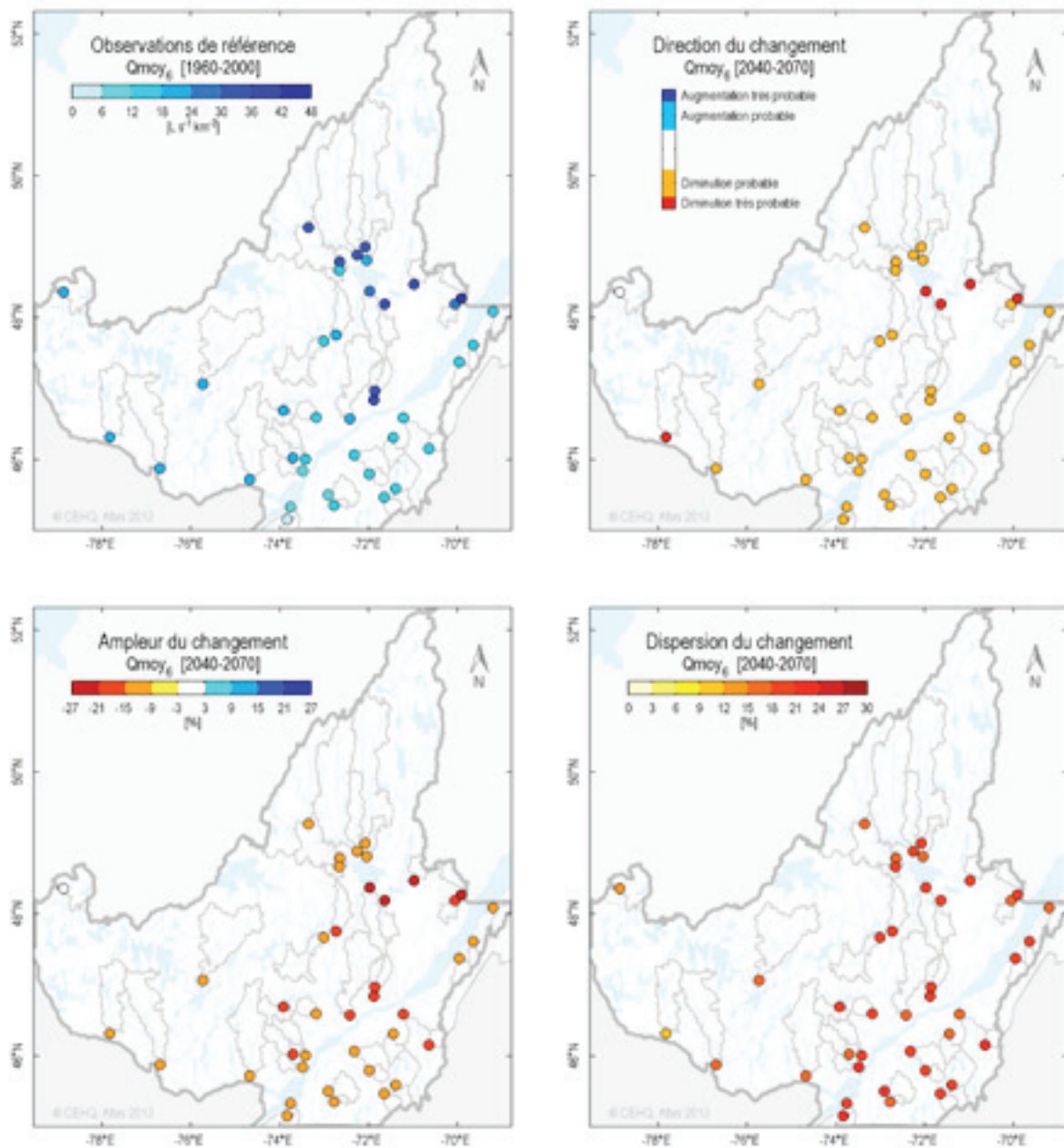


Figure 19 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de juillet ■ $Q_{moy,7}$

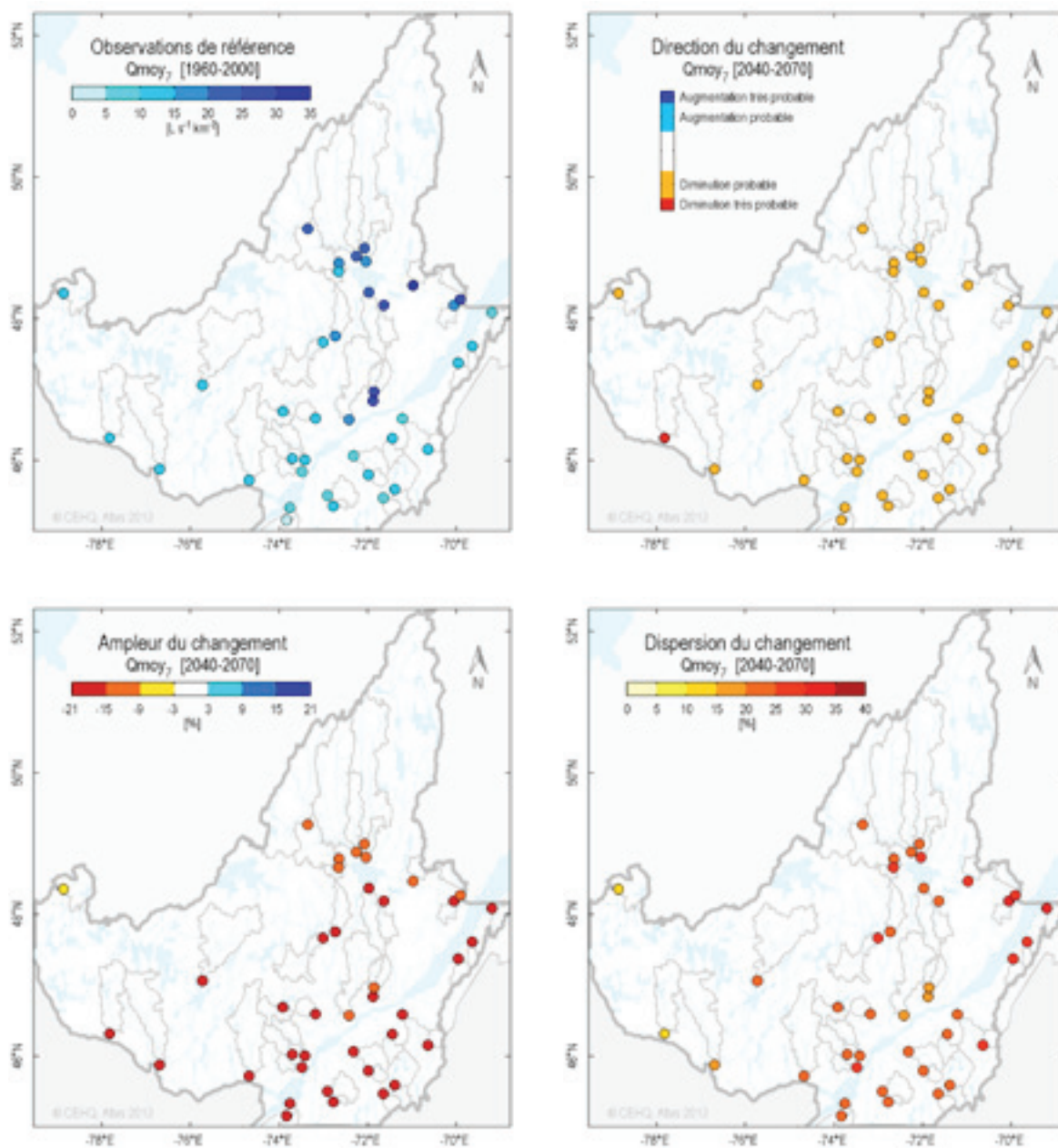


Figure 20 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois d’août ■ Q_{moy_8}

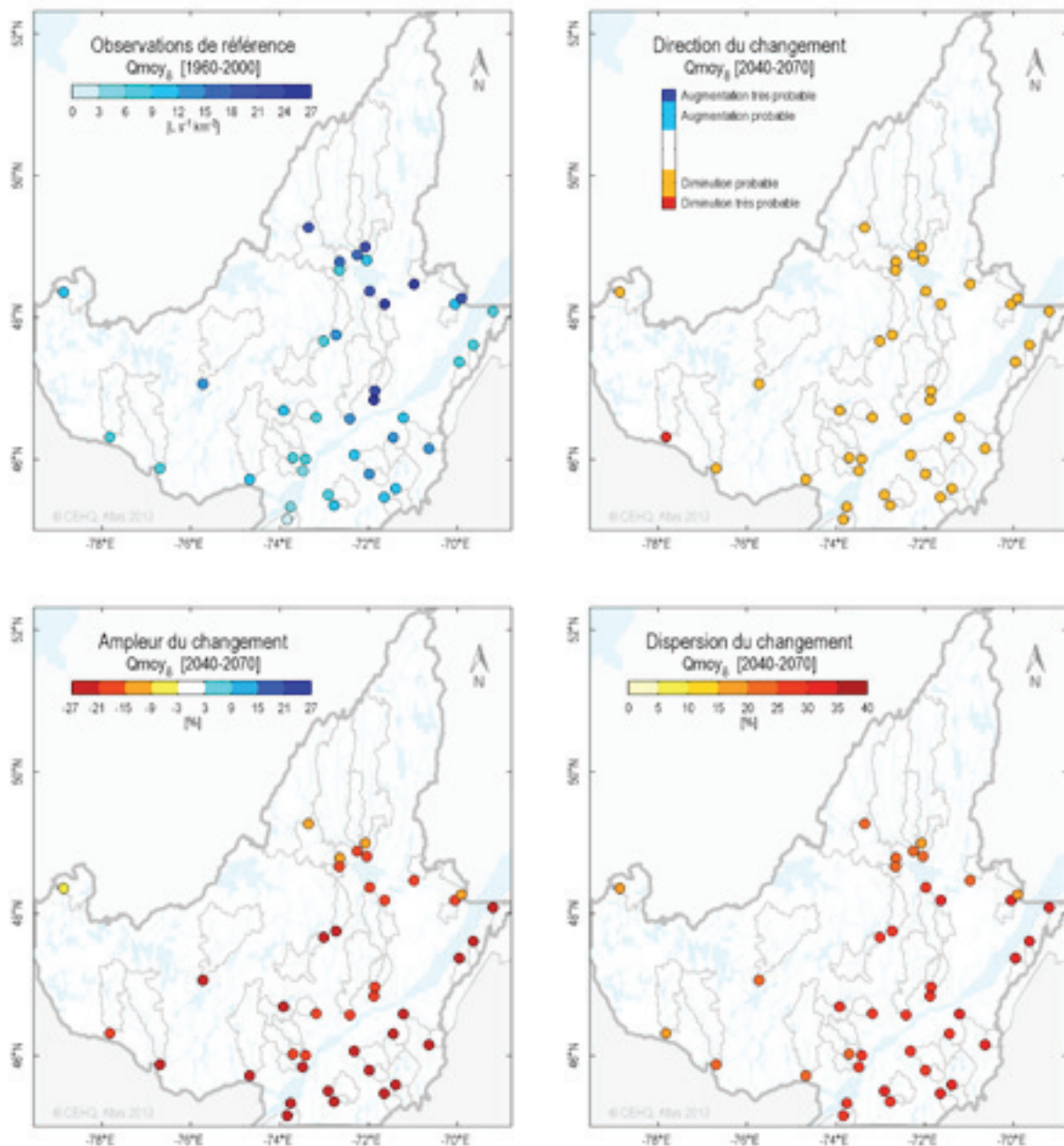


Figure 21 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de septembre Q_{moy}_9

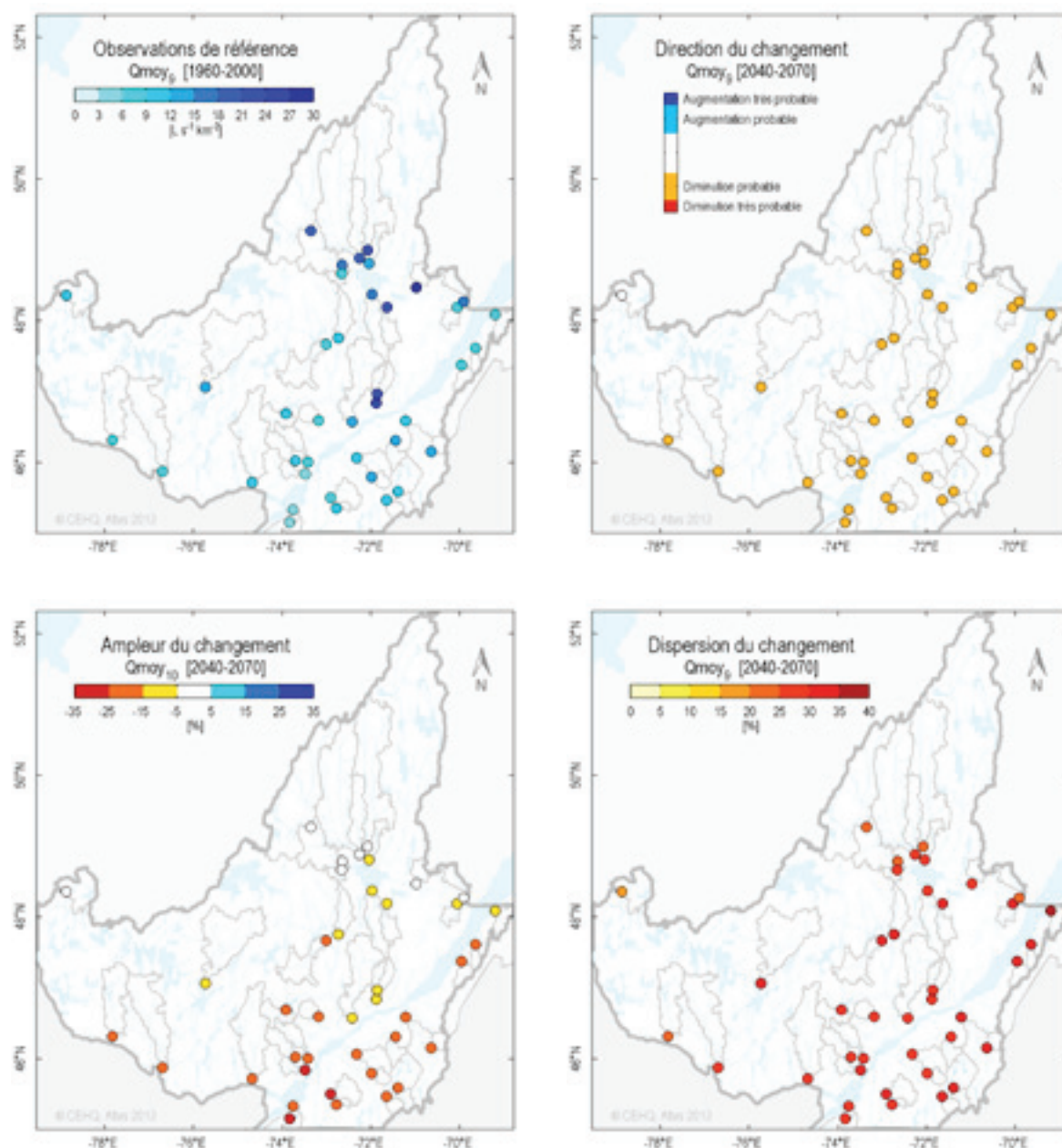


Figure 22 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois d’octobre ■ $Q_{moy_{10}}$

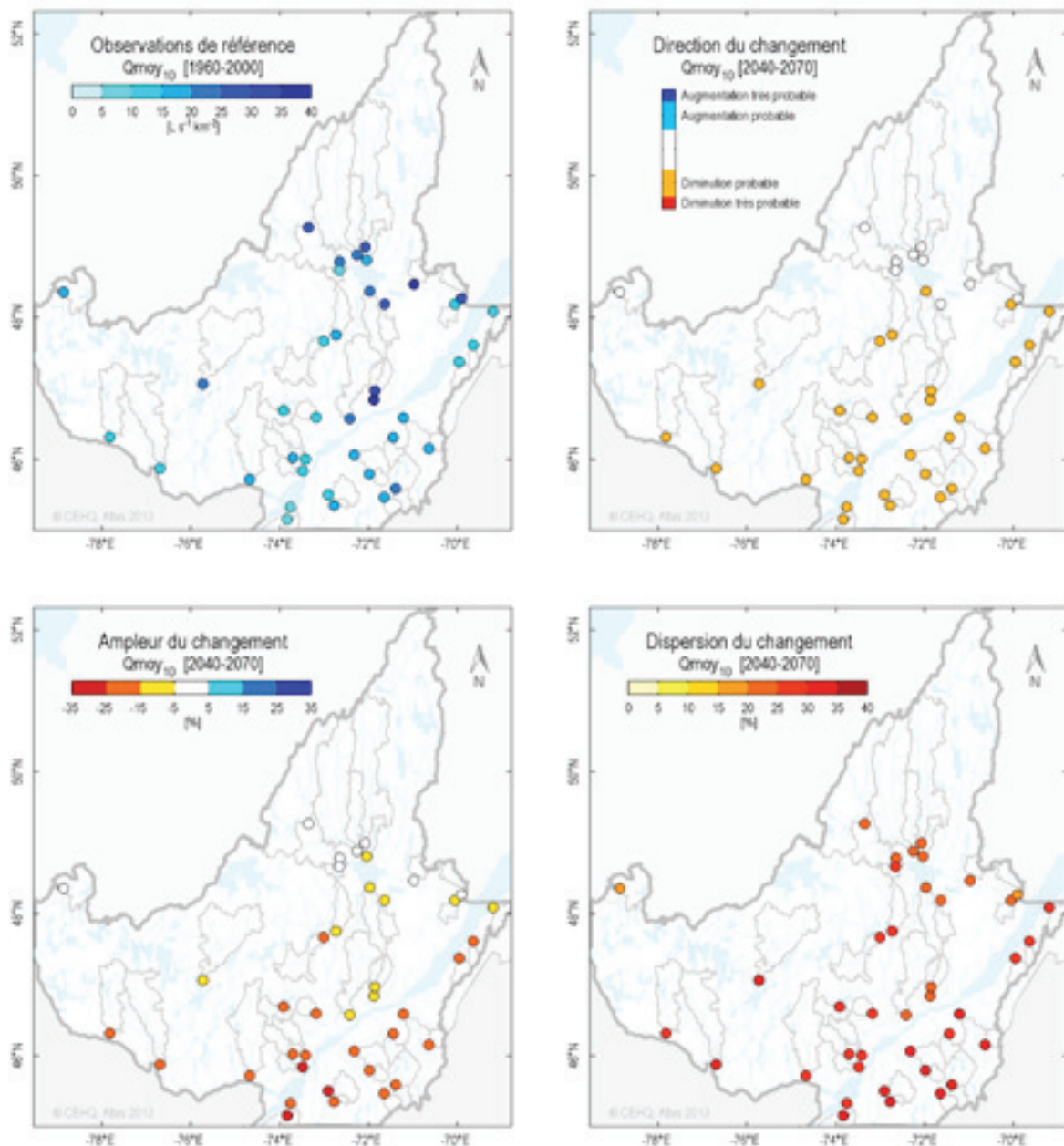


Figure 23 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de novembre $Q_{moy,11}$

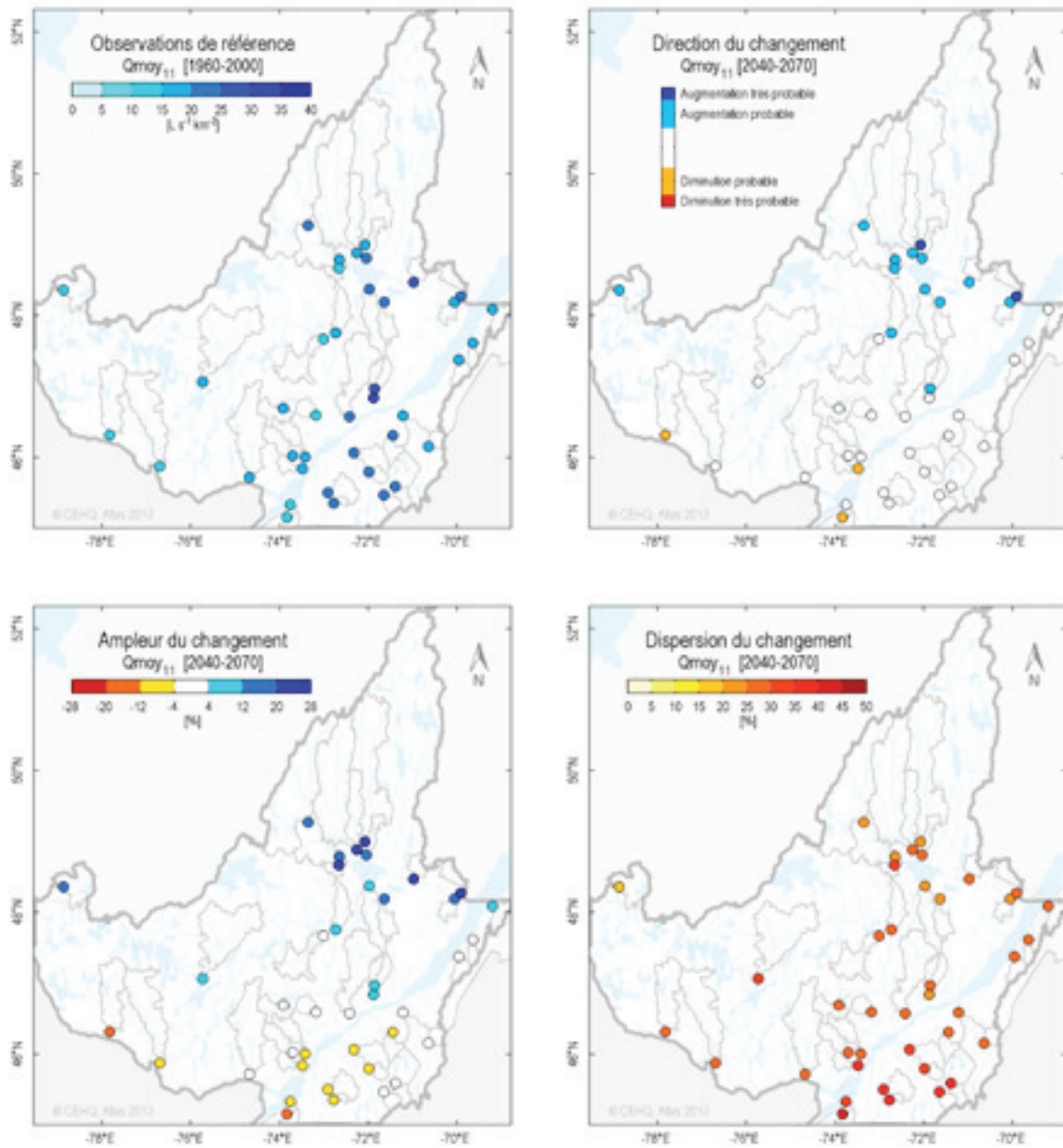
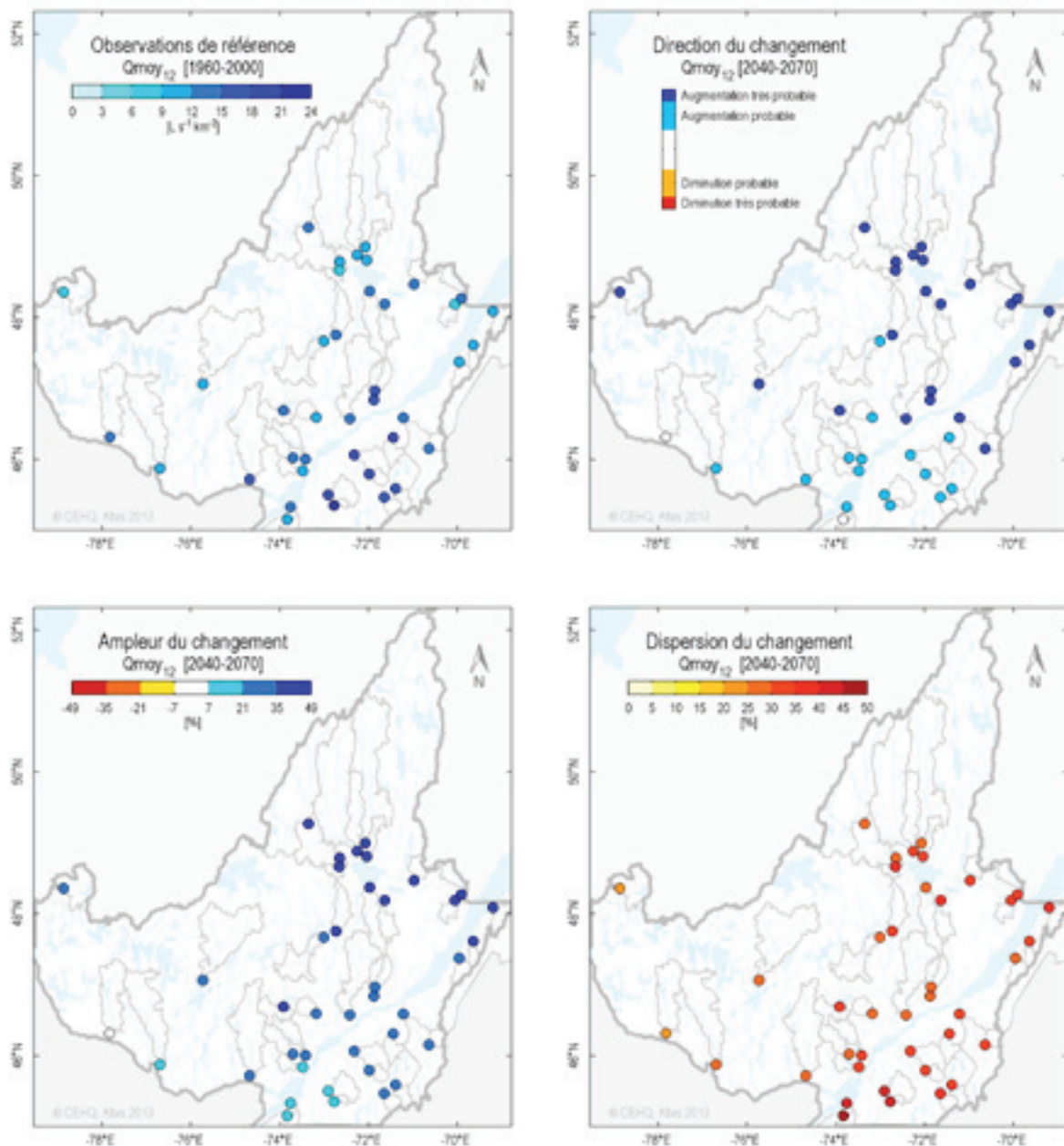


Figure 24 – Projections hydroclimatiques à l’horizon 2050

Débit moyen évalué au mois de décembre ■ $Q_{moy,12}$





Atlas hydroclimatique du Québec méridional



Photo : Grégory Reuchet

Annexes – Méthodologie



Annexe 1 – La modélisation hydroclimatique

L'analyse de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique se base sur la modélisation hydroclimatique, une science qui conjugue la climatologie et l'hydrologie. Cette science a pour objectif principal de reproduire les processus de l'atmosphère et du cycle de l'eau à l'aide de simulateurs numériques appelés « modèles ». Comme illustré à la figure A.1, la modélisation hydroclimatique se résume à trois étapes principales : la production de scénarios climatiques, la transformation des scénarios climatiques en scénarios hydrologiques et l'analyse du changement du régime hydrique. D'abord, différentes variables (ex. : températures, précipitations) sont simulées en exécutant les modèles climatiques (annexe 2). Ces variables sont ensuite traitées afin d'en corriger les biais (annexe 3). Une plateforme de modélisation hydrologique transforme alors les variables climatiques en débit en rivière (annexe 4).

L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique se base sur la notion d'indicateur hydrologique (annexe 5), c'est-à-dire une expression mathématique quantifiant une caractéristique d'un phénomène hydrologique d'intérêt. Pour chaque scénario hydrologique, un indicateur est évalué respectivement pour la période de référence (1971-2000) et une période future (2041-2070). La différence entre ces deux valeurs décrit le changement proprement dit. Pour un ensemble de scénarios hydrologiques, un ensemble de valeurs de changement est produit. Le signal du changement se présente alors sous la forme de trois composantes principales (annexe 6) : la direction, l'ampleur et la dispersion.

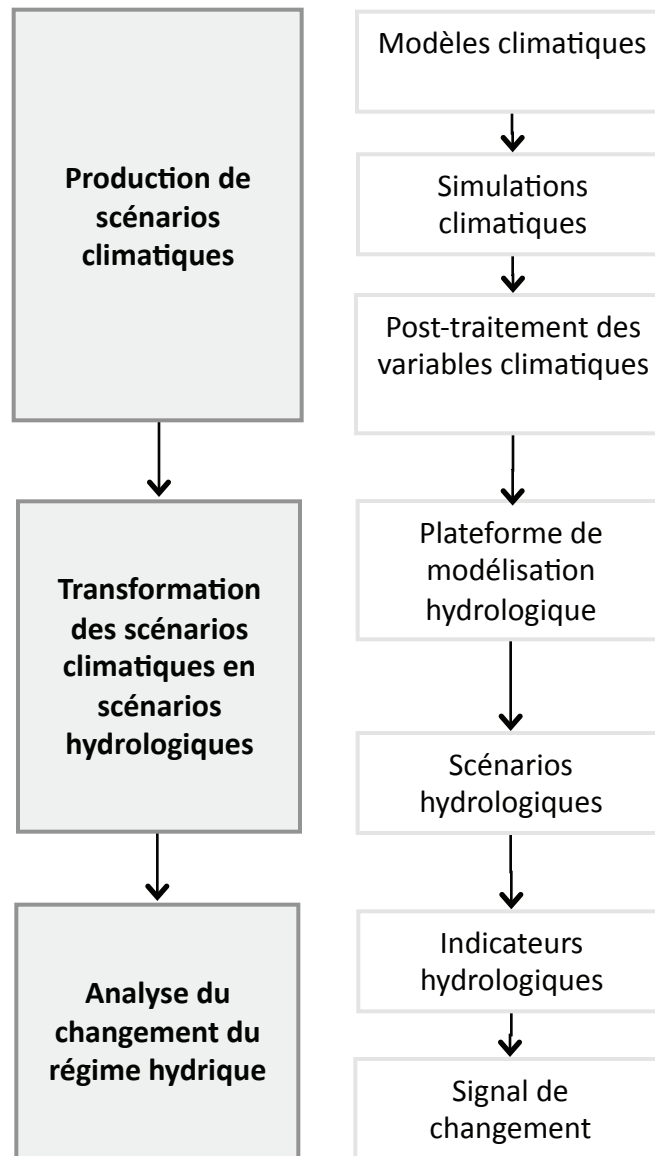


Figure A.1 : Principales étapes de modélisation hydroclimatique

Annexe 2 – Les modèles climatiques

Un modèle climatique est une représentation numérique des processus physiques observés dans l'atmosphère. En pratique, les modèles climatiques sont divisés en deux catégories : les modèles globaux et les modèles régionaux. Les modèles globaux simulent les processus atmosphériques et océaniques à l'échelle de la planète. Leur résolution est grossière (de l'ordre de 200 km par 200 km) et leur maillage est composé de colonnes verticales structurées sur une base sphérique (figure A.2). De plus fine résolution (de l'ordre de 50 km par 50 km), les modèles régionaux simulent les processus atmosphériques sur des territoires circonscrits, tels que l'Amérique du Nord. La physique des phénomènes atmosphériques y est simulée avec une résolution spatiale plus fine. Pour définir les conditions climatiques aux frontières des territoires couverts par les modèles régionaux, les modèles globaux sont utilisés à titre de « pilotes ».

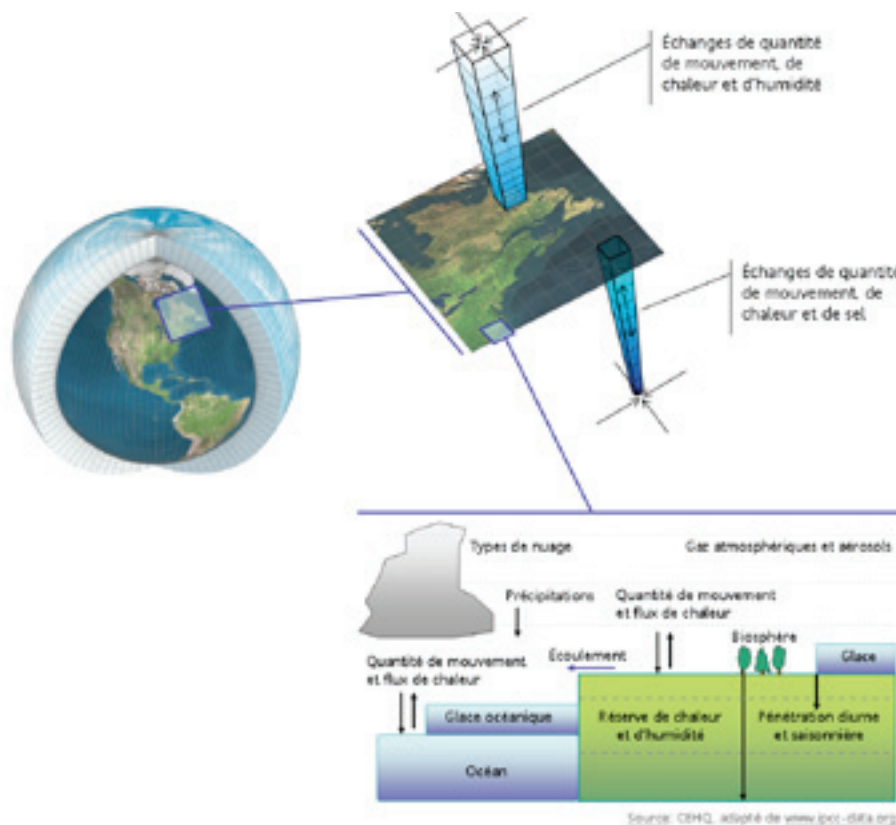


Figure A.2 : Schématisation d'un modèle de climat global

Pour produire des scénarios de changements climatiques, les modèles globaux sont exécutés avec différentes évolutions de concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Ces scénarios de GES sont basés sur des hypothèses de développement économique et technologique ainsi que de croissance de la population mondiale. Il est important de comprendre que le climat est « naturellement » appelé à varier d'une période à l'autre. Cette variabilité naturelle du climat est dite irréductible, c'est-à-dire qu'elle sera nécessairement présente dans l'avenir et qu'elle s'ajoutera aux changements climatiques provoqués par l'activité humaine. La variabilité naturelle du climat est estimée en exécutant un modèle global plusieurs fois à partir de conditions initiales légèrement différentes.

Les valeurs simulées des variables climatiques (ex. : températures et précipitations) diffèrent selon le modèle climatique (global ou régional), le scénario de GES et la variabilité naturelle du climat. La différence entre ces valeurs donne une indication de l'incertitude associée aux simulations climatiques. L'incertitude peut donc être estimée par l'utilisation d'un ensemble de simulations climatiques. Le tableau A.1 montre la composition des sous-ensembles de simulations climatiques utilisés pour produire l'information présentée dans l'*Atlas*. CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 – Meehl *et al.*, 2007) contient 73 simulations climatiques issues de 15 modèles globaux exécutés pour trois scénarios de GES différents. L'information climatique contenue dans l'ensemble de projections CMIP3 correspond au courant dominant de l'état actuel de la connaissance. Cette information exclut les scénarios marginaux (loin des consensus établis par le GIEC, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et les scénarios « surprises » impliquant les rétroactions générées par les émissions anthropiques de GES (ex. : une fonte subite et substantielle du glacier du Groenland, cette fonte étant actuellement anticipée comme un événement se produisant sur une longue période). Finalement, l'ensemble CMIP3 exclut les événements naturels et indépendants des émissions anthropiques de GES, mais pouvant altérer temporairement les projections du climat (ex. : l'effet refroidissant des aérosols faisant suite aux éruptions volcaniques exceptionnelles, telle que celle du Pinatubo en 1991).

Les sous-ensembles de modèles régionaux Ouranos-MRCC (Modèle régional canadien de climat version 4.2.3 – Caya et Laprise, 1999; Music et Caya 2007; de Elía et Côté, 2010) et NARCCAP (North American Regional Climate Change Assessment Program – Mearns *et al.*, 2007) sont pilotés à leurs frontières par des modèles globaux de l'ensemble CMIP3. Ces sous-ensembles permettent de raffiner l'évaluation des incertitudes associées respectivement à la variabilité naturelle du climat (Ouranos-MRCC) et au choix du modèle régional (NARCCAP).

Tableau A.1 : Composition des sous-ensembles de simulations climatiques

	Nombre de simulations	Nombre de modèles globaux	Nombre de modèles régionaux	Nombre de scénarios de GES
CMIP3	73	15	0	3
Ouranos-MRCC	9	3	1	1
NARCCAP	7	4	3	1

Annexe 3 – Le post-traitement des simulations climatiques

L'analyse directe des variables simulées par les modèles climatiques constitue la méthode la plus simple pour évaluer l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique (figure A.3a). Cette approche est cependant limitée par la présence de biais dans les modèles climatiques, c'est-à-dire une estimation systématiquement biaisée de certaines variables (ex. : températures trop froides l'été, nombre excessif de jours pluvieux). Afin de compenser la présence de biais, on applique différentes méthodes de post-traitement aux variables climatiques simulées. Il existe deux types de post-traitement : la correction de biais et la perturbation des observations.

La correction de biais (figure A.3b) définit des facteurs de correction en comparant les propriétés statistiques des variables simulées durant la période de référence à celles des observations historiques. Ces facteurs sont ensuite appliqués aux simulations climatiques afin d'en corriger les biais. Les méthodes de perturbation (figure A.3c) définissent quant à elles des facteurs de perturbation en comparant les propriétés statistiques des variables climatiques simulées des périodes de référence et future. Ces facteurs de perturbation sont ensuite appliqués aux observations historiques afin d'en produire une version « perturbée » dans le futur. L'application d'une méthode de post-traitement étant considérée au même titre qu'une source d'incertitude, quatre méthodes de post-traitement différentes ont été appliquées aux ensembles de simulations climatiques décrits à la section précédente. L'ensemble composé des sorties directes des modèles climatiques et des simulations post-traitées présente un total de 445 « scénarios climatiques ».

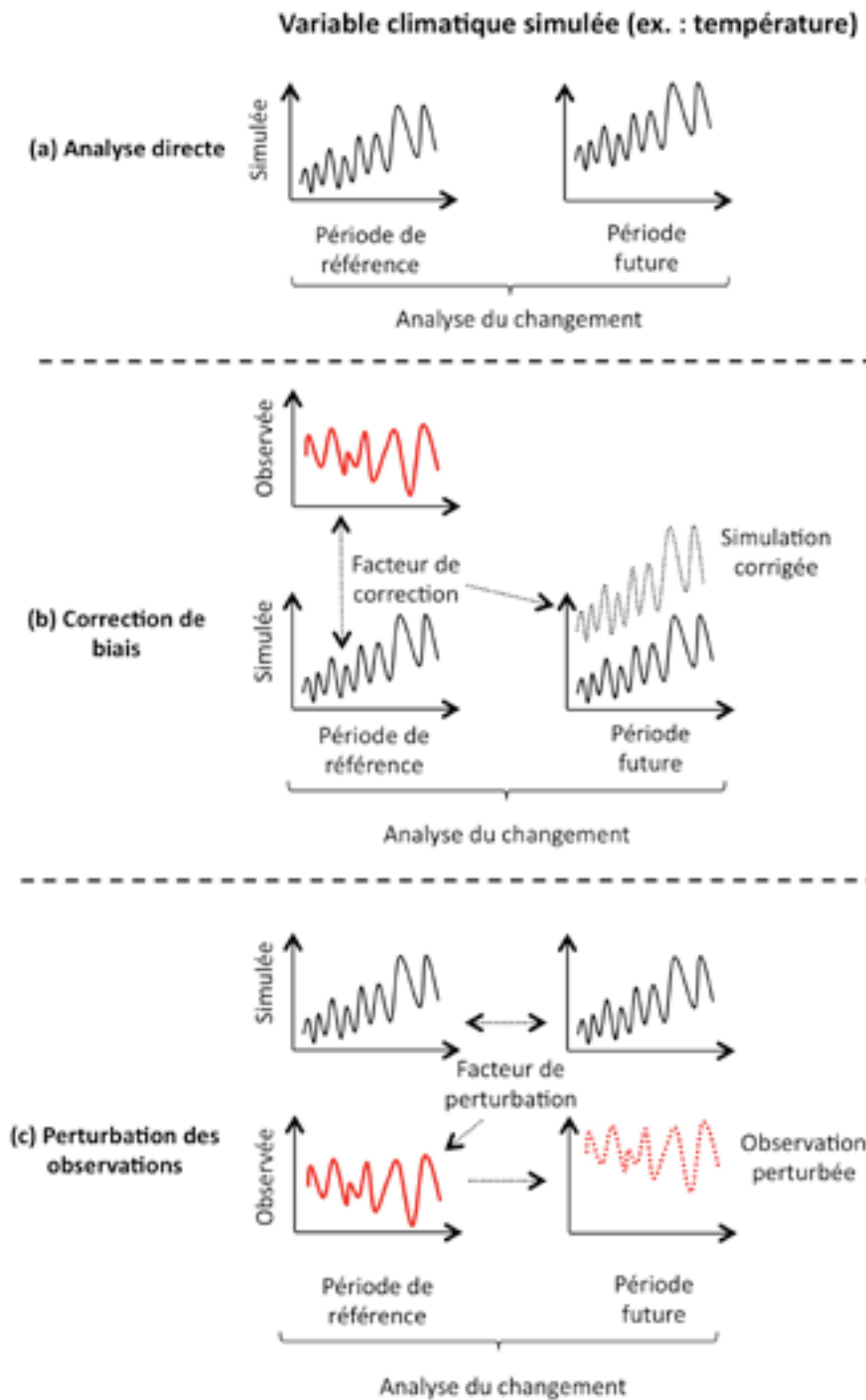


Figure A.3 : Post-traitement des simulations climatiques

Annexe 4 – La plateforme de modélisation hydrologique

Un modèle hydrologique est une représentation numérique du cycle de l'eau permettant de simuler les débits en rivière. Pour produire l'information contenue dans l'*Atlas*, une plateforme de modélisation hydrologique à grande échelle a été mise en place à partir d'Hydrotel (Fortin *et al.*, 2001a, 2001b), un modèle hydrologique largement utilisé au Québec. Hydrotel reproduit les principales composantes du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant : évapotranspiration, accumulation et fonte du couvert de neige, écoulement à la surface et dans le sol, écoulement en rivière. Une caractérisation des propriétés physiographiques du territoire est d'abord nécessaire : topographie, distribution des lacs et rivières, occupation du territoire et types de sol. La figure A.4 présente la portion du Québec méridional couverte par la plateforme de modélisation, soit plus de 388 000 km². Ce territoire inclut les bassins des rivières Outaouais et Saguenay ainsi que la vallée du Saint-Laurent jusqu'à la hauteur de Trois-Pistoles. La performance de la plateforme a été étalonnée puis validée pour 40 bassins versants jaugés (tableau A.2). Ces bassins sont associés à des cours d'eau présentant un régime d'écoulement non influencé, c'est-à-dire exempt de l'influence de barrages situés en amont. Une approche de calage global (Ricard *et al.*, 2012) a été employée afin de garantir la cohérence spatiale des simulations sur l'ensemble du territoire. Une description plus détaillée des étapes de mise en place de la plateforme de modélisation est présentée dans le rapport *Mise en place d'une plateforme de modélisation hydrologique à l'échelle du Québec méridional* (CEHQ, 2012).

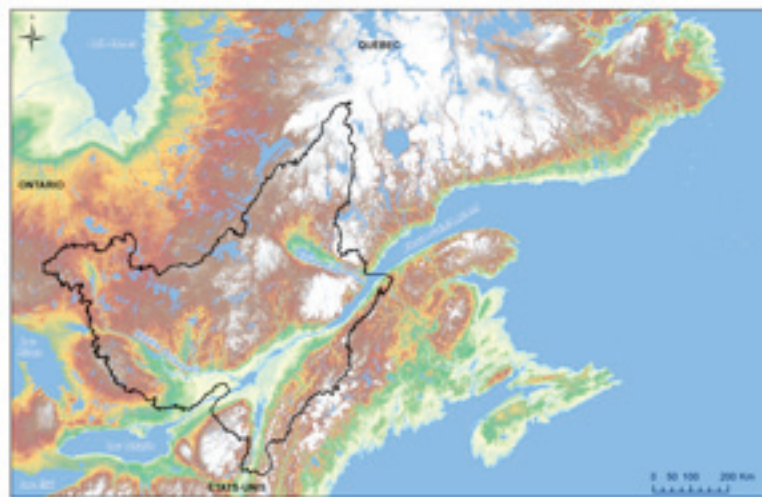


Figure A.4 : Territoire couvert par la plateforme de modélisation hydrologique

Tableau A.2 : Description des 40 bassins versants

Nom du bassin	Station hydrométrique ³	Superficie (km ²)
Des Trois Pistoles	022301	932
Du Loup	022507	525
Ouelle	022704	795
Chaudière	023402	5820
Famine	023422	691
Bécancour	024003	919
Nicolet Sud-Ouest	030101	549
Nicolet	030103	1540
Eaton	030234	642
Au Saumon	030282	738
Noire	030304	1490
Yamaska Nord	030340	248
Châteauguay	030905	2490
Des Anglais	030907	643
Rouge	040204	5460
Gatineau	040830	6840
Coulonge	041301	5150
Dumoine	041902	3760
Kinojévis	043012	2590
Mattawin	050119	1390
Croche	050135	1570
Vermillon	050144	2640
Batiscan	050304	4480
Sainte-Anne	050408	1550
Bras du Nord	050409	642
Ouareau	052212	1270
L'Assomption	052219	1340
De l'Achigan	052233	647
Du Loup	052805	774
Petit Saguenay	060101	712
Aux Écorces	061020	1110
Métabetchouane	061502	2280
Petite rivière Péribonka	061801	1090
Ashuapmushuan	061901	15300
Ashuapmushuan	061905	11100
Aux Saumons	061909	585
Mistassibi	062101	9320
Mistassini	062102	9870
Valin	062701	746
Sainte-Marguerite	062802	1100

³ Pour plus d'information sur les stations hydrométriques, consulter le site www.cehq.gouv.qc.ca.

Annexe 5 – Les scénarios hydrologiques

Les scénarios hydrologiques sont produits en alimentant la plateforme de modélisation ([annexe 4](#)) avec les variables climatiques simulées (ex. : précipitations et températures minimales et maximales) contenues dans les différents scénarios climatiques ([annexe 3](#)). Sous format brut, les scénarios hydrologiques prennent la forme d'hydrogrammes simulés pour les périodes de référence (1971-2000) et future (2041-2070). L'impact des changements climatiques sur le régime hydrique est déterminé en relevant les différences entre ces deux ensembles de scénarios. Pour ce faire, il est nécessaire de définir des indicateurs hydrologiques, c'est-à-dire des expressions mathématiques quantifiant et synthétisant les différentes caractéristiques statistiques des phénomènes hydrologiques d'intérêt. La valeur de changement d'un indicateur hydrologique constitue l'« unité de base » de l'information présentée dans l'*Atlas*. Les valeurs de changement s'expriment en pourcentage pour les indicateurs de débits (variation relative) et en jours pour les indicateurs de jours (variation absolue). Une nomenclature des indicateurs a été créée spécialement pour l'*Atlas*, cette dernière est explicitée au tableau 2.

Annexe 6 – L’analyse du signal de changement

Pour chaque indicateur et chaque bassin versant, 445 valeurs de changement (Δ) sont produites, soit une par scénario hydrologique. L’analyse de la distribution de ces valeurs de changement permet d’isoler trois composantes du signal de changement : la direction, l’ampleur et la dispersion. La direction du changement (figure A.5a) évalue le consensus des scénarios hydrologiques sur la direction du changement, c’est-à-dire la proportion des scénarios (P) indiquant soit une augmentation, soit une diminution de l’indicateur. Dans l’exemple ci-dessous, 86 % des scénarios indiquent une augmentation de l’indicateur. Sur la base du tableau A.3, l’augmentation est alors qualifiée de « probable ».

Tableau A.3 : Évaluation du consensus sur la direction du changement

Direction	Consensus des scénarios hydrologiques
Augmentation très probable	Plus de 90 % des scénarios hydrologiques indiquent une augmentation
Augmentation probable	De 66 % à 90 % des scénarios hydrologiques indiquent une augmentation
Absence de consensus	De 33 % à 66 % des scénarios hydrologiques indiquent une augmentation ou une diminution
Diminution probable	De 66 % à 90 % des scénarios hydrologiques indiquent une diminution
Diminution très probable	Plus de 90 % des scénarios hydrologiques indiquent une diminution

L’ampleur (figure A.5b) correspond à la médiane (Δ_{50}) de l’ensemble des valeurs de changement et permet de définir un changement anticipé « moyen ». Dans l’exemple ci-dessous, l’ampleur du changement serait, par exemple, de l’ordre de +8 %. La dispersion du changement (figure A.5c) se définit comme la différence entre les quantiles 75 et 25 ($\Delta_{75} - \Delta_{25}$). Cette valeur correspond à la largeur de l’enveloppe qui, autour de la médiane, comprend la moitié (50 %) des valeurs de changement. Dans l’exemple ci-dessous, la dispersion serait de l’ordre de 10 %. En posant l’hypothèse d’une distribution normale, la dispersion peut être utilisée pour estimer l’incertitude associée au signal de changement (incertitude de l’ordre de ± 5 %).

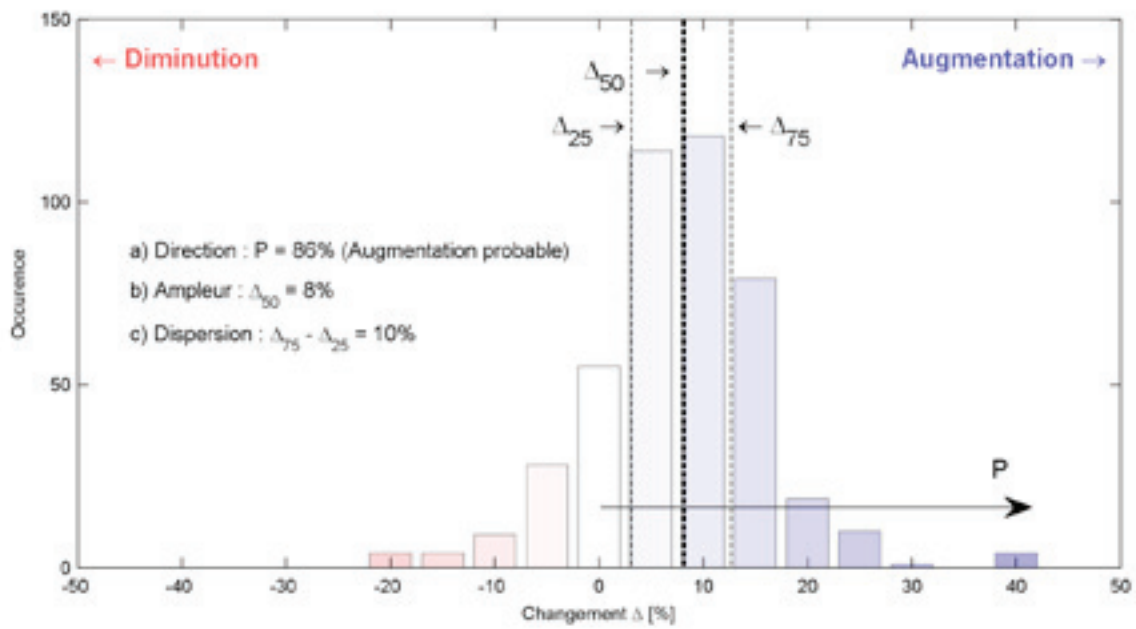


Figure A.5 : Composantes du signal de changement : la direction, l'ampleur et la dispersion

Annexe 7 – Bibliographie

Caya, D. et R. Laprise, 1999. « A Semi-Implicit Semi-Lagrangian Regional Climate Model: The Canadian RCM », *Monthly Weather Review*, vol. 127, n° 3, p. 341-362.

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), 2013. *Production de l'Atlas 2013 des projections hydroclimatiques pour le Québec méridional à l'horizon 2050*. Québec, 21 p. Rapport technique.

Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), 2012. *Mise en place d'une plateforme de modélisation hydrologique à l'échelle du Québec méridional*. Québec, 25 p. et annexes. Rapport technique.

de Elía, R. et H. Côté, 2010. « Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America », *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 19, n° 4, p. 325-339.

Fortin, J. P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa et J. Fitzback, 2001a. « A Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. Part 1: Description of the Model », *Journal of Hydrologic Engineering – ASCE*, vol. 6, n° 2, p. 91-99.

Fortin, J. P., R. Turcotte, S. Massicotte, R. Moussa et J. Fitzback, 2001b. « A Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. Part 2: Application to the Chaudière Watershed », *Journal of Hydrologic Engineering – ASCE*, vol. 6, n° 2, p. 100-108.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), 2008. *Plan d'action 2006-2012 – Le Québec et les changements climatiques : un défi pour l'avenir*. Québec, 52 p. Disponible en ligne à l'adresse http://www.mddep.gouv.qc.ca/changements/plan_action/2006-2012_fr.pdf.

Mearns, L. O. *et al.*, 2007 (mise à jour 2012). *The North American Regional Climate Change Assessment Program dataset*, National Center for Atmospheric Research Earth System Grid Data Portal, Boulder (Colorado). Données téléchargées le 17 décembre 2012. [doi:10.5065/D6RN35ST].

Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer et K. E. Taylor, 2007. « The WCRP CMIP3 Multi-Model Dataset: A New Era in Climate Change Research », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 88, n° 9, p. 1383-1394.

Music, B. et D. Caya, 2007. « Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM) », *Journal of Hydrometeorology*, vol. 8, n° 5, p. 969-988.

Ricard, S., R. Bourdillon, D. Roussel et R. Turcotte, 2012. « Global Calibration of Distributed Hydrological Models for Large Scale Applications », *Journal of Hydrologic Engineering*. [doi:10.1061/(ASCE)HE:1943-5584.0000665].

Remerciements

Les données du Modèle régional canadien du climat (MRCC) ont été générées et fournies par Ouranos.

Nous désirons reconnaître la contribution du North American Regional Climate Change Assessment Program (NARCCAP), qui a fourni des données utilisées pour produire l'information exposée dans le présent document. Ce programme est financé par la National Science Foundation (NSF), le U.S. Department of Energy (DoE), la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) et l'Office of Research and Development de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

Nous remercions les équipes de modélisation qui nous ont permis d'analyser leurs simulations, le Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI), qui a recueilli et archivé les résultats des modèles de la phase 3 du Coupled Model Intercomparison Project (CMIP3), ainsi que le Working Group on Coupled Modelling (WGCM) du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC), qui a organisé les activités d'analyse des données des modèles. Le jeu de données multi-modèles CMIP3 du PMRC est soutenu par la National Science Foundation du U.S. Department of Energy.

Nos remerciements vont aux organisations membres de la collaboration (cQ)² - Ouranos, Hydro-Québec et Rio Tinto Alcan - ainsi qu'au Centre Eau Terre Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique et à l'Université Laval. Nous remercions également l'Université de Munich et l'Agence bavaroise pour l'environnement (collaboration QBic³ - *Québec-Bavaria International Collaboration on Climate Change*) pour leur contribution scientifique et technique.

Nous remercions finalement Marco Braun, Diane Chaumont, Anne Frigon, Pascal Marceau et Antoine Verville pour leurs commentaires éclairés sur les versions préliminaires de l'*Atlas*.

Les coûts relatifs à la réalisation de l'*Atlas* sont assumés par le Fonds vert dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec.



Bayerisches Landesamt für Umwelt



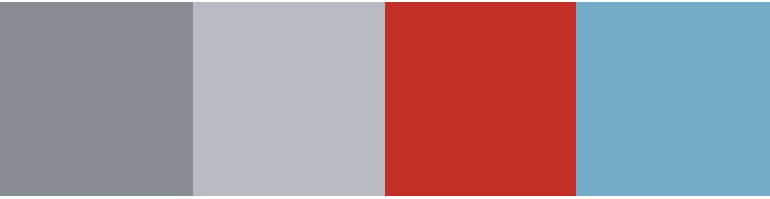


Photo de la couverture : Caroline Anderson

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2013

ISBN : 978-2-550-67325-5 (imprimé)

ISBN : 978-2-550-67326-2 (PDF)

© Gouvernement du Québec, 2013

Québec 

- Ministère du Développement durable,
de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
- Centre d'expertise hydrique du Québec