OURANOS



BILAN HYDROLOGIQUE DES RIVIÈRES SAINT-CHARLES ET MONTMORENCY DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Rapport final
Octobre 2016

Communauté métropolitaine de Québec

QUÉBECINNOVE

BILAN HYDROLOGIQUE DES RIVIÈRES SAINT-CHARLES ET MONTMORENCY DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Rapport préliminaire

Juin 2016

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos
René Roy, Ouranos
Richard Turcotte, Ouranos/MDDELCC
François Morneau, Ouranos/CMQ

PRINCIPAUX COLLABORATEURS :

François Anctil, Université Laval
Nicolas Audet, Ouranos
Alain Mailhot, INRS-ETE
Alain Rousseau, INRS-ETE
René Therrien, Université Laval

Citation suggérée : Ouranos (2016). *Bilan hydrologique des rivières Saint-Charles et Montmorency dans un contexte de changements climatiques.* Rapport présenté à la Communauté métropolitaine de Québec. Ouranos. 44 pages + annexes.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs.
Toute utilisation de cette publication et de son contenu n'engage pas Ouranos et ses partenaires.
Pour plus d'information sur les impacts et l'adaptation liés aux changements climatiques, nous vous invitons à consulter les sites www.adaptation.rncan.gc.ca et www.ouranos.ca

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un projet piloté par Ouranos avec le soutien de la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ).

L'étude est financée par Ouranos, la CMQ et le réseau QuébecInnove.

L'étude a bénéficié de l'aide de chercheurs de l'Université Laval et de l'Institut national de recherche scientifique (INRS), soient François Anctil, Alain Mailhot, Alain Rousseau et René Therrien. L'étude a également bénéficié de simulations effectuées par la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). Nous en profitons pour remercier Philippe Noël, Simon Ricard et Charles Poirier de la DEH pour l'information qui nous a été transmise. Nous remercions également Stéphane Savary de l'INRS-ETE pour la révision de ce rapport.











SOMMAIRE EXECUTIF

À elles seules, les rivières Saint-Charles et Montmorency fournissent environ 75 % de la population de la Ville de Québec en eau potable (Brodeur *et al.*, 2012). Or, depuis une trentaine d'années, les villes et les municipalités établies sur le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec ont connu des croissances de population entre 20 et plus de 750 % (Roche, 2010). La pression urbaine sur les rivières augmente donc de manière continuelle. D'ailleurs, pendant les étés 2002 et 2010, la station de pompage de la rivière Jacques-Cartier a dû être réactivée afin d'acheminer davantage d'eau vers le lac Saint-Charles et contrer une période de sècheresse particulièrement sévère. Dans un contexte où les changements climatiques apportent une variabilité supplémentaire au régime hydrique des rivières, la CMQ souhaite répondre aux deux questions suivantes :

« Aura-t-on suffisamment d'eau potable pour alimenter la CMQ dans 15 ou 20 ans ? »

« Quels seront les enjeux hydrologiques pour l'approvisionnement en eau potable de la CMQ dans 15 ou 20 ans ? »

Ces enjeux hydrologiques peuvent inclure, de manière non exhaustive, la dégradation de la qualité de l'eau et les dommages aux structures d'approvisionnement causés par les inondations et les crues soudaines. Le projet actuel se veut une première étape afin de répondre à ces questions. Plusieurs études ont déjà été réalisées par le passé sur les rivières Saint-Charles et Montmorency, notamment à l'Université Laval, à l'INRS-ETE et à divers paliers de gouvernement. Dans le but d'aider les décideurs à analyser l'information émanant de ces divers centres de recherche et de les guider vers l'identification des lacunes dans les connaissances et l'identification des besoins de recherche, cette étude a pour objectif de :

- Faire un inventaire des données d'observation disponibles (débits en rivière, pluviométrie, etc.)
- Faire un inventaire des études scientifiques et/ou des modèles hydrologiques développés et appliqués sur les bassins versants des rivières Saint-Charles et Montmorency, avec ou sans considération des changements climatiques

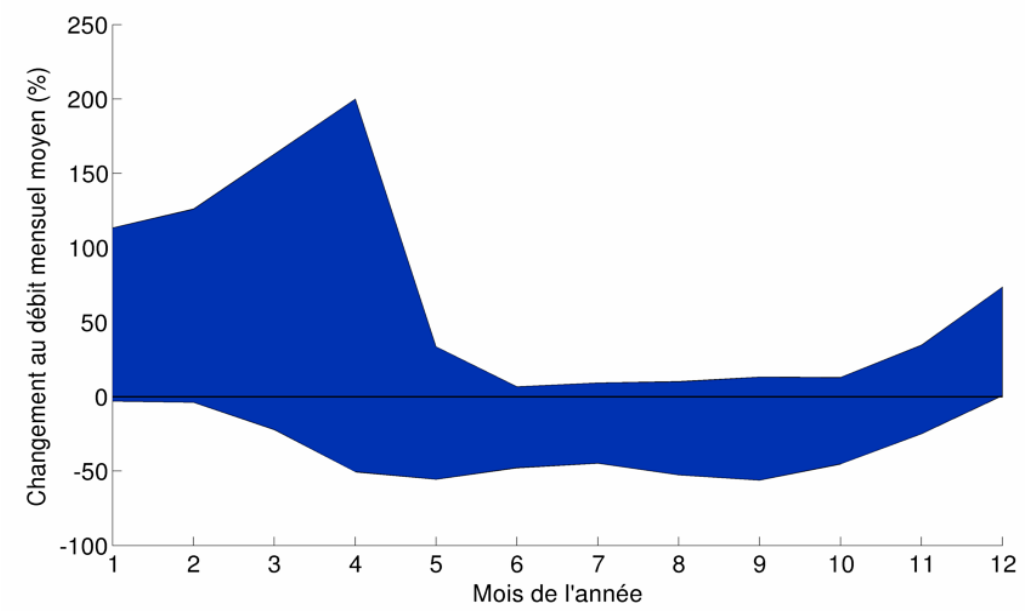


Figure S.1 : Changements prévus au débit mensuel moyen des rivières de la région de Québec à l'horizon 2050, par rapport à la période 1971-2000. Les valeurs présentées dans le graphique sont représentatives des rivières Saint-Charles, Montmorency, Jacques-Cartier, Ste-Anne et Bras-du-Nord.

Dans un premier temps, les stations météorologiques et hydrométriques ont été répertoriées. Leur répartition est concentrée sur les centres urbains, soit un réseau d'observations situé principalement dans la région de la Ville de Québec, avec peu de stations météorologiques au centre ou au nord du territoire. Les stations hydrométriques, elles, sont situées à l'exutoire des bassins versants et disposent de longues séries de données.

En raison de l'importance du lac Saint-Charles pour l'approvisionnement en eau potable, plusieurs modèles hydrologiques sont disponibles pour la région. Deux d'entre eux ont déjà été utilisés pour explorer l'impact des changements climatiques sur la ressource en eau des rivières Saint-Charles et Montmorency aux horizons 2050 et 2080. Ces études, dont celle de la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MDDELCC illustrée ci-haut, pointent vers une diminution des débits moyens en été de l'ordre de 20 % en moyenne, accompagnés d'une baisse des niveaux des nappes phréatiques. Les étiages risquent également d'être plus sévères, avec des débits minimums de 1 à 50 % plus faibles en été. En contrepartie, un changement de -5 à +130 % du débit moyen est prévu en février, un mois actuellement problématique en raison des faibles débits. D'autres études, qui portent sur l'évolution des précipitations extrêmes, pointent également vers une intensification des précipitations maximales 24h de l'ordre de 5 à 25 % à l'horizon 2050.

Pour les suites du projet, et pour répondre aux besoins de la CMQ, il serait avantageux d'étudier ces aspects à plus court terme, soit dans un horizon de 15 à 20 ans.

TABLE DES MATIÈRES

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS 1

1.1 CONTEXTE 1

1.2 OBJECTIFS ET QUESTION DE RECHERCHE 2

1.3 ÉLÉMENTS DU RAPPORT 2

2 ÉTAT ACTUEL DE LA RESSOURCE EN EAU 3

2.1 DESCRIPTION DES BASSINS VERSANTS 3

2.2 PROBLÉMATIQUES ACTUELLES 6

3 INVENTAIRE 8

3.1 DONNÉES D'OBSERVATION 8

3.1.1 Météorologie 8

3.1.2 Débits en rivière 13

3.1.3 Sols et eaux souterraines 15

3.2 MODÈLES HYDROLOGIQUES ET ÉTUDES 19

4 IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES 22

4.1 MODÉLISATION DU CLIMAT 22

4.2 DISPONIBILITÉ FUTURE DE LA RESSOURCE EN EAU 25

4.2.1 Moyenne annuelle 26

4.2.2 Hiver et printemps 29

4.2.3 Été et automne 30

4.3 PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES 31

4.3.1 Changements récents aux pluies extrêmes 32

4.3.2 Changements futurs aux pluies extrêmes 33

4.4 AUTRES ASPECTS DE LA RESSOURCE EN EAU 36

4.4.1 Urbanisation du territoire 36

4.4.2 Qualité de l'eau 36

5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 38

6 RÉFÉRENCES 40

ANNEXE A. NORMALES CLIMATIQUES 45
ANNEXE B. MODÈLES HYDROLOGIQUES 46
ANNEXE C. ATLAS HYDROCLIMATIQUE 55
ANNEXE D. COURBES IDF 65

LISTE DE FIGURES

Figure 1. Bassin versant de la prise d'eau de Château-d'Eau (Loretteville) et emplacement des diverses prises d'eau du bassin 4

Figure 2. Emplacement des diverses prises d'eau du bassin versant de la rivière Montmorency 5

Figure 3. Emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques sur le territoire de la CMQ 9

Figure 4. Débits moyens et extrêmes historiques pour les stations hydrométriques (haut) de la rivière Saint-Charles et (bas) de la rivière Montmorency. 14

Figure 5. Maximums saisonniers à la station hydrométrique de la rivière Montmorency. 15

Figure 6. Modélisation GOCAD des sols de la région de Québec. 16

Figure 7. Confinement et épaisseur des aquifères de dépôts meubles 17

Figure 8. Profondeur du niveau piézométrique du roc fracturé 18

Figure 9. Projections climatiques pour la période 2000-2100. 23

Figure 10. Changements au débit mensuel moyen à l'horizon 2050 (Atlas hydroclimatique) et 2080 (Cochand, 2014) pour les rivières Saint-Charles, Montmorency, Jacques-Cartier, Ste-Anne et Bras-du-Nord 27

Figure 11. Changements prévus aux débits extrêmes par l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional à l'horizon 2050 28

Figure 12. Années d'opération des 99 stations du Québec situées au sud du 49e parallèle qui enregistrent des données horaires et/ou les maxima journaliers à divers pas de temps sous-quotidiens 31

Figure 13. Tendances des pluies extrêmes aux stations météorologiques sur la période 1965-2005, où une station doit posséder au minimum 20 ans de données pour être considérée 34

Figure 14. Changements projetés (%) aux précipitations maximales annuelles 24h (moyenne multi-modèles) entre l'horizon 2050 et la période de référence 35

Figure 15. Changements prévus (%) aux précipitations extrêmes (a) 24h (b) 72h et (c) 7 jours à l'horizon 2050, par rapport à la période 1961-1990 35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Localisation des stations météorologiques à proximité de la zone d'étude (ECCC) 10
Tableau 2. Moyennes climatiques et extrêmes historiques 11
Tableau 3. Modèles hydrologiques calibrés des rivières Saint-Charles et Montmorency..... 21
Tableau 4. Projections climatiques pour le sud du Québec et de l'Ontario 24

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Acronyme	Définition
APEL	Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CMQ	Communauté métropolitaine de Québec
DEH	Direction de l'expertise hydrique
ECCC	Environnement et Changements climatiques Canada
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HGS	HydroGeoSphere
IDF	Intensité-Durée-Fréquence
INRS-ETE	Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement
IRDA	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement
MCG	Modèle de circulation globale
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MRC	Modèle régional de climat
OBV	Organisme de bassin versant
PACES-CMQ	Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de la Communauté Métropolitaine de Québec
RNCAN	Ressources naturelles Canada

1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

1.1 CONTEXTE

À elles seules, les rivières Saint-Charles et Montmorency fournissent environ 75 % de la population de la Ville de Québec en eau potable (Brodeur *et al.*, 2012). Bien qu'une proportion importante d'habitations soient desservies à l'aide de réseaux d'aqueducs, ce sont tout de même environ 6 % des résidences de la Ville de Québec et 20 % des résidences situées sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles qui s'alimentent en eau potable à partir de puits privés ou publics (Brodeur *et al.*, 2009; Cochand, 2014). Sur le bassin versant de la rivière Montmorency, les municipalités disposent toutes d'un réseau d'aqueduc. Les puits privés, localisés principalement en dehors des zones urbaines, ne sont toutefois pas répertoriés (OBV Charlevoix-Montmorency, 2014).

Entre 1970 et 2006, les municipalités situées sur le bassin versant en amont de la prise d'eau située à la hauteur du Château-d'Eau (prise d'eau de la Ville de Québec, située à 11 km en aval de l'embouchure du lac Saint-Charles) ont connu des croissances de population entre 45 et 783 %, ce qui représente globalement une augmentation de 1 000 à 3 000 personnes par municipalité, avec une augmentation de près de 5 000 personnes (+375 %) à Lac-Beauport. Lac-Delage se démarque également par la forte augmentation de sa population (+783 %) sur un territoire d'environ 1.5 km² en excluant le lac, soit 60 habitants en 1971 par rapport à 530 en 2006 (Roche, 2010; 2014). Pendant cette période, la population de la Ville de Québec a également connu une croissance de 20 %, ce qui représente près de 83 000 personnes (Institut de la statistique du Québec, 2014).

Dans un tel contexte, il devient important de quantifier les impacts probables des changements climatiques sur l'approvisionnement en eau potable de la région. Déjà, plusieurs études ont démontré que les changements climatiques auraient des répercussions sur le cycle de l'eau au niveau mondial, que ce soit par une augmentation de l'évapotranspiration en été, la hausse des températures et les redoux en hiver ou une intensification des précipitations extrêmes (Huntington, 2006; Kundzewicz *et al.*, 2008).

1.2 OBJECTIFS ET QUESTION DE RECHERCHE

Dans un contexte où les changements climatiques apportent une variabilité et, potentiellement, un stress hydrique supplémentaire à des bassins versants utilisés pour l'alimentation en eau potable de plus d'un demi-million de personnes, la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) souhaite répondre aux questions suivantes :

« Aura-t-on suffisamment d'eau potable pour alimenter la CMQ dans 15 ou 20 ans ? »
« Quels seront les enjeux hydrologiques pour l'approvisionnement en eau potable de la CMQ dans 15 ou 20 ans ? »

Ces enjeux hydrologiques peuvent inclure, de manière non exhaustive, la dégradation de la qualité de l'eau et les dommages aux structures d'approvisionnement causés par les inondations et les crues soudaines. Ces questions de recherche font partie d'un projet de plus grande envergure mené par la CMQ, dont le présent rapport ne constitue que l'un des éléments. Il est d'ailleurs prévu que cette contribution puisse être bonifiée par des projets subséquents.

Dans les dernières années, plusieurs études ont été effectuées sur les bassins versants des rivières Saint-Charles et Montmorency, notamment à l'Université Laval, à l'Institut national de la recherche scientifique – Centre Eau Terre Environnement (INRS-ETE) et à divers paliers de gouvernement. Ainsi, l'objectif principal du présent rapport est de réaliser un inventaire :

1) Des données d'observation disponibles (débits en rivière, pluviométrie, etc.)
2) Des études scientifiques et/ou des modèles hydrologiques réalisés sur les bassins versants des rivières Saint-Charles et Montmorency (avec ou sans considération pour les changements climatiques)

Cet inventaire permettra à terme d'assister la CMQ afin de déterminer les projets de recherche à mettre en œuvre pour pouvoir répondre aux deux questions mentionnées précédemment.

1.3 ÉLÉMENTS DU RAPPORT

Le rapport est divisé en trois sections. Le Chapitre 2 traite des bassins versants des rivières Saint-Charles et Montmorency dans leur état actuel, par rapport à la disponibilité de la ressource en eau et les problématiques actuelles liées à l'approvisionnement en eau potable. Le Chapitre 3 constitue l'inventaire des données d'observation et des modèles hydrologiques calés lors d'études précédentes. Finalement, le Chapitre 4 décrit les études ayant analysé l'impact des changements climatiques sur la ressource en eau des bassins versants des rivières Saint-Charles et Montmorency.

2 ÉTAT ACTUEL DE LA RESSOURCE EN EAU

2.1 DESCRIPTION DES BASSINS VERSANTS

Avec une population d'environ 350 000 personnes pour une superficie de 550 km², le bassin versant de la rivière Saint-Charles est le plus urbanisé du Québec (Brodeur *et al.*, 2009). Il inclut en tout ou en partie les villes de Québec, de l'Ancienne-Lorette et de Lac-Delage, les municipalités des cantons-unis de Stoneham-et-Tewkesbury, de Lac-Beauport, de Saint-Gabriel-de-Valcartier, de Shannon et de Sainte-Brigitte-de-Laval, ainsi que le territoire de la réserve amérindienne de Wendake (APEL, 2009). Le bassin versant en amont de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles couvre environ 60 % de la superficie totale du bassin (Figure 1). Il est constitué à 74 % de forêts, 16.5 % de milieux bâtis, 6 % de milieux humides, 2.7 % de lacs et 0.8 % de milieux agricoles. Ces pourcentages sont demeurés plus ou moins stables depuis 2009 (Roche, 2014).

Le lac Saint-Charles, d'une superficie de 3.6 km² pour un volume maximal d'environ 14.8 millions de mètres cube, constitue le réservoir principal de la prise d'eau du Château-d'Eau (prise d'eau de la Ville de Québec, située à 11 km en aval de l'embouchure du lac Saint-Charles). Le lac est séparé en deux réservoirs dont le plus important, au nord, compte pour 70 % de la capacité totale du lac (APEL, 2009). Les deux réservoirs sont connectés via un étranglement de faible profondeur, ce qui est problématique lors d'étiages sévères. Comme la profondeur du lac est beaucoup plus importante au nord (17.5 m, par rapport à 4.5 m), l'eau reste parfois « prisonnière » du bassin nord et ne permet pas d'alimenter convenablement la prise d'eau de la Ville de Québec (Salou, 2009).

Le bassin versant de la rivière Montmorency, quant à lui, possède une superficie de 1 150 km², dont 92 % est forestier (OBV Charlevoix-Montmorency, 2014). Plus de la moitié du territoire est située en-dehors des limites de la CMQ. Même s'il comprend ou chevauche sept municipalités et deux territoires non organisés, le bassin demeure peu peuplé. En 2014, la population avoisinait les 30 000 personnes, dont les deux tiers faisaient partie de la Ville de Québec et étaient situés en aval des prises d'eau de Charlesbourg (Lac des Roches) et de Beauport. La localisation de toutes les prises d'eau du bassin est illustrée à la Figure 2. Contrairement à la rivière Saint-Charles, la rivière Montmorency ne possède aucun réservoir dédié aux prises d'eau.

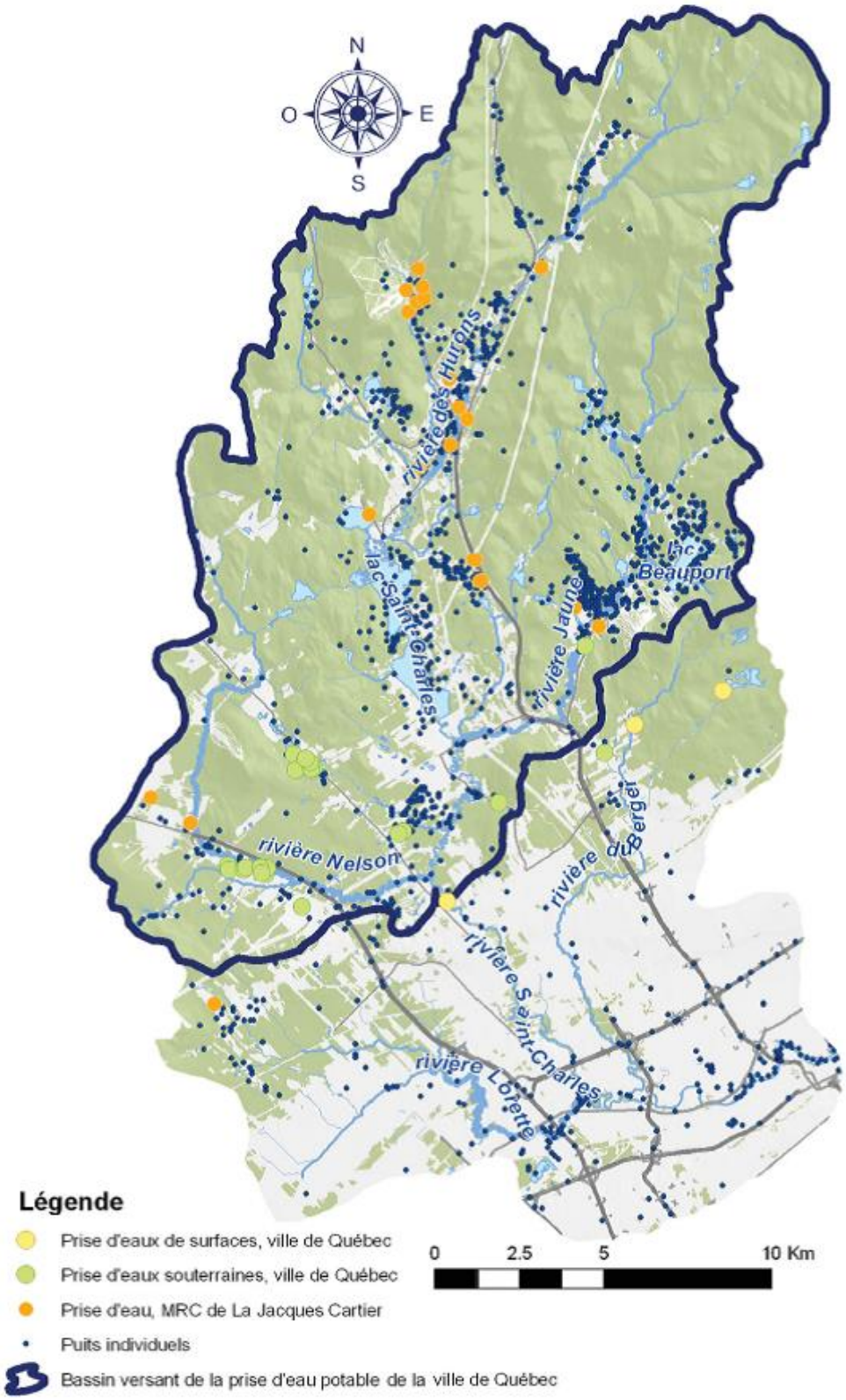


Figure 1. Bassin versant de la prise d'eau de Château-d'Eau et emplacement des diverses prises d'eau du bassin (Brodeur *et al.*, 2012).

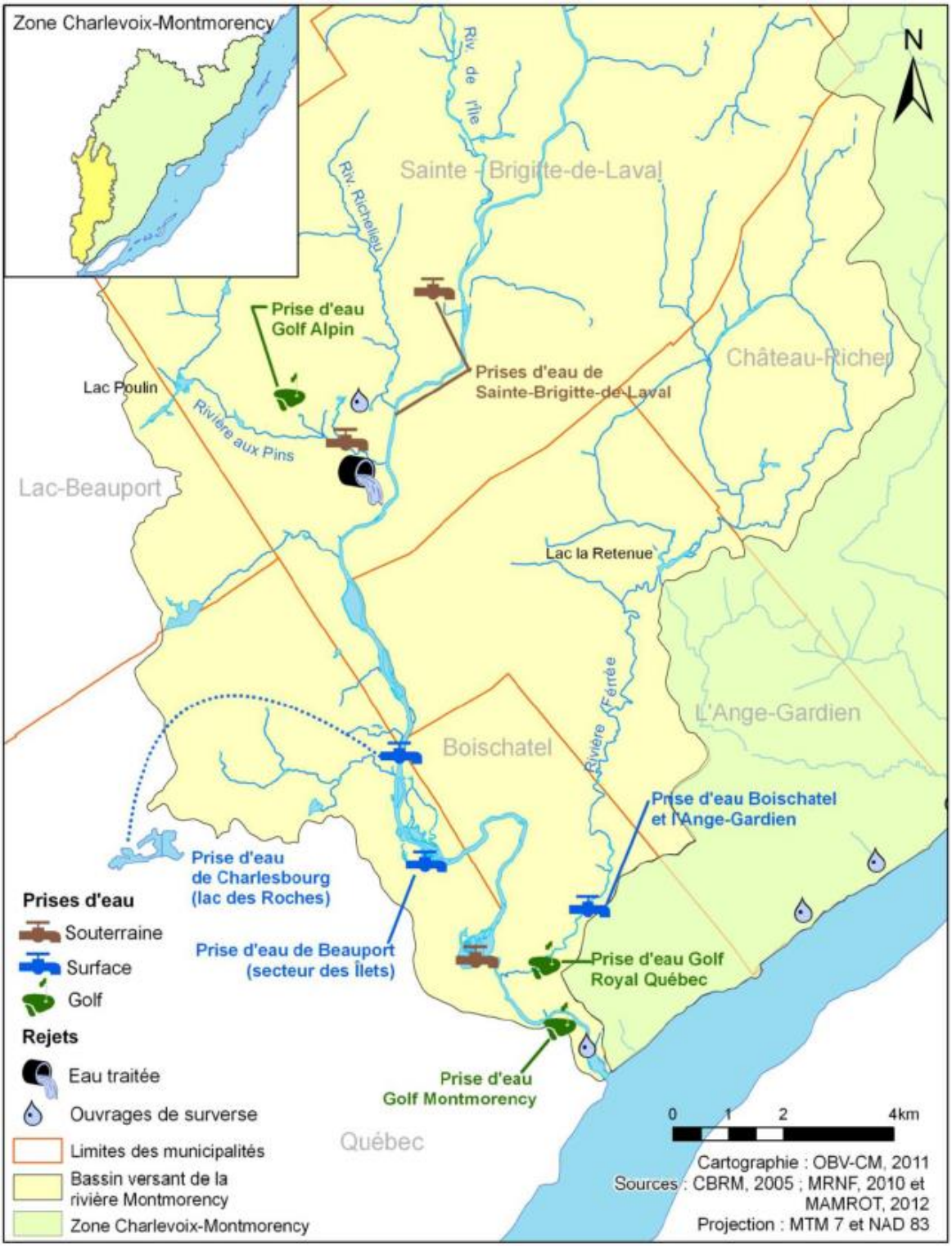


Figure 2. Emplacement des diverses prises d'eau du bassin versant de la rivière Montmorency. Les prises d'eau de Charlesbourg et de Beauport sont utilisées par la Ville de Québec (OBV Charlevoix-Montmorency, 2014).

Les bassins versants à l'étude chevauchent deux zones climatiques et géomorphologiques, soient les Laurentides méridionales au nord et les Basses-Terres du Saint-Laurent au sud. Les Laurentides sont caractérisées par un relief escarpé, par des pentes d'environ 25 % et par un taux de ruissellement (quantité d'eau de pluie qui ne s'infiltre pas dans le sol, par rapport à la précipitation totale) entre 1 et 30 % en raison de la présence d'un couvert forestier significatif. Le roc y est affleurant et l'épaisseur des dépôts meubles dépasse rarement 10 m (Talbot Poulin *et al.*, 2013). Le climat est de type subpolaire humide, caractérisé par des températures froides (la moyenne annuelle est de 0.5°C) et un total de précipitation annuelle d'environ 1 580 mm (Station Forêt Montmorency, voir Section 3.1.1). Au contraire, les Basses-Terres du Saint-Laurent possèdent un relief assez plat, des pentes de moins de 10 % et un taux de ruissellement situé entre 35 et 90 % en raison de l'urbanisation (Talbot Poulin *et al.*, 2013). Le climat est de type tempéré subhumide, avec une température moyenne annuelle de 4.2°C et un total de précipitation d'environ 1 190 mm (Station Aéroport Jean-Lesage, voir Section 3.1.1).

2.2 PROBLÉMATIQUES ACTUELLES

Sur la rivière Saint-Charles, en période d'étiage prolongé, la gestion du barrage Cyrille-Delage devient délicate afin de garantir un apport constant à la prise d'eau du Château-d'Eau tout en garantissant un débit écologique minimal dans la rivière et en limitant l'impact sur les Marais du Nord. Les mois de février et de juillet sont notamment difficiles à gérer (Gerardin et Lachance, 1997; APEL, 2014). À certains moments, principalement en hiver, le débit utilisé par l'usine d'eau potable représente à lui seul la somme des apports provenant de la rivière des Hurons (le principal tributaire du lac Saint-Charles) et des tributaires secondaires de la rivière Saint-Charles (Brodeur *et al.*, 2009). Cela signifie qu'il devient pratiquement impossible d'emmagasiner de l'eau dans le lac Saint-Charles pour un usage futur tout en garantissant un débit minimal écologique dans la rivière et l'alimentation en eau potable d'environ 250 000 personnes. D'autres études mentionnent également que l'usine utilise par moments jusqu'à 98 % du débit de la rivière (Gerardin et Lachance, 1997). Noter que ce chiffre est mentionné en 1997, alors que la Ville de Québec ne disposait pas encore de réglementation par rapport aux débits écologiques. Il existe une différence notable entre les débits d'étiage des périodes pré- et post-2000 (voir la Section 3.1.2).

En hiver (décembre-mars), en été (juin-août) et en période de fraie des salmonidés (octobre), le débit minimal dans la rivière Saint-Charles est réglementé et doit respecter un débit réservé écologique calculé en suivant l'approche hydrobiologique *Instream Flow Incremental Methodology*. Pour les trois périodes, ce débit est respectivement de 0.6, 0.9 et 1.3 m^3/s (Brodeur *et al.*, 2009). Or, une analyse des débits à la station hydrométrique située en aval de la

prise d'eau pour les années 2004-2005, puis 2010-2011, a montré que les débits écologiques minimaux n'étaient pas toujours respectés (Brodeur *et al.*, 2009; Brodeur *et al.*, 2012). Dans le cadre de l'étude actuelle, une analyse similaire a été réalisée pour la période 2012-2016. Cette analyse a montré que les débits mesurés étaient inférieurs aux débits écologiques lors de 116 journées (10.9 % des journées réglementées), à raison de 86 fois en hiver (14.9 % des journées entre décembre et mars), 18 fois en été (4.9 % des journées entre juin et août) et 12 fois en période de fraie (9.7 % des journées d'octobre).

Les étiages constituent ainsi un enjeu important pour la prise d'eau à Château-d'Eau. En 2003, lors d'un étiage particulièrement sévère, le haut-fond entre les deux réservoirs du lac Saint-Charles avait dû être dragué afin de permettre l'alimentation en eau du réservoir sud et donc de la rivière Saint-Charles (Salou, 2009). Un an plus tôt, en 2002, la station de pompage de la rivière Jacques-Cartier a dû être réactivée afin de contrer une période de sècheresse particulièrement sévère et acheminer de l'eau vers le lac Saint-Charles (Brodeur *et al.*, 2012). Cela s'est produit de nouveau en 2010. Dans les deux cas, les débits enregistrés à la station hydrométrique située à 6.4 km en aval de la prise d'eau du Château-d'Eau étaient de moins de 1 m^3/s. Ils ont même atteint 0.08 m^3/s le 8 septembre 2002.

Les inondations sont également un phénomène récurrent qui peut augmenter l'apport de matières en suspension et de polluants dans l'eau et, dans les pires cas, causer des dommages aux structures d'approvisionnement en eau potable (APEL, 2014). Sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles, le secteur des méandres de la haute Saint-Charles, le secteur du parc Duberger-Les Saules, ainsi que les abords des rivières Jaune, Nelson et Lorette ont été identifiés comme problématiques (Brodeur *et al.*, 2009; Brodeur *et al.*, 2012). Sur la rivière Montmorency, les inondations constituent la principale problématique reliée à l'eau potable, puisque les forts débits en période de crue peuvent causer des dommages matériels à la station de pompage (OBV Charlevoix-Montmorency, 2014).

Les causes des inondations sont variables, mais on note la présence de milieux urbanisés en plaine inondable sur les abords de la rivière Saint-Charles, de la rivière Jaune et de la rivière Lorette (Brodeur *et al.*, 2009). Les rivières Lorette et Montmorency sont également sujettes aux embâcles (Brodeur *et al.*, 2012; OBV Charlevoix-Montmorency, 2014).

3 INVENTAIRE

3.1 DONNÉES D'OBSERVATION

La carte illustrée à la Figure 3 présente l'ensemble des stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques sur le territoire de la CMQ. Outre les stations encore actives, la carte indique également les stations inactives aujourd'hui.

3.1.1 MÉTÉOROLOGIE

Le

Tableau 1 présente les caractéristiques des stations météorologiques situées sur la zone d'étude dont les données sont compilées par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). À noter que les données horaires indiquées dans le tableau ne comprennent pas les précipitations. Sauf indication contraire, celles-ci sont toujours quotidiennes. En raison des longs historiques disponibles, les stations de l'Aéroport Jean-Lesage et de la Forêt Montmorency ont fait l'objet d'études climatologiques par ECCC. Les résultats sont présentés au Tableau 2 et illustrés à l'Annexe A. Noter que la station Valcartier, malgré une longue série de données pour de nombreuses variables, ne mesure les précipitations que depuis 2013. Les données horaires ne sont également pas enregistrées en soirée et pendant la nuit, en plus de présenter un nombre élevé de journées manquantes.

Deux stations météorologiques se démarquent par l'utilisation de pluviomètres à auget basculeur, qui permet l'acquisition des précipitations à un pas de temps de 5 minutes. Cette résolution temporelle est essentielle à la caractérisation des évènements extrêmes. La première station, située à l'aéroport Jean-Lesage, est opérée par des observateurs et fait partie du Service de l'Information sur le Milieu ATmosphérique (SIMAT) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC). Les données de précipitation à haute résolution temporelle sont disponibles pour la période 1961-1995, puisque l'appareil a été retiré par la suite (Jarrett, P. de l'ECCC, communication personnelle).

La seconde station, Forêt Montmorency, est localisée légèrement au nord de la carte à la Figure 3 (en dehors du territoire de la CMQ). Cette station est opérée par le Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval (Salou, 2009). Les données sont disponibles à cette station depuis 1965 et elle est toujours en opération.

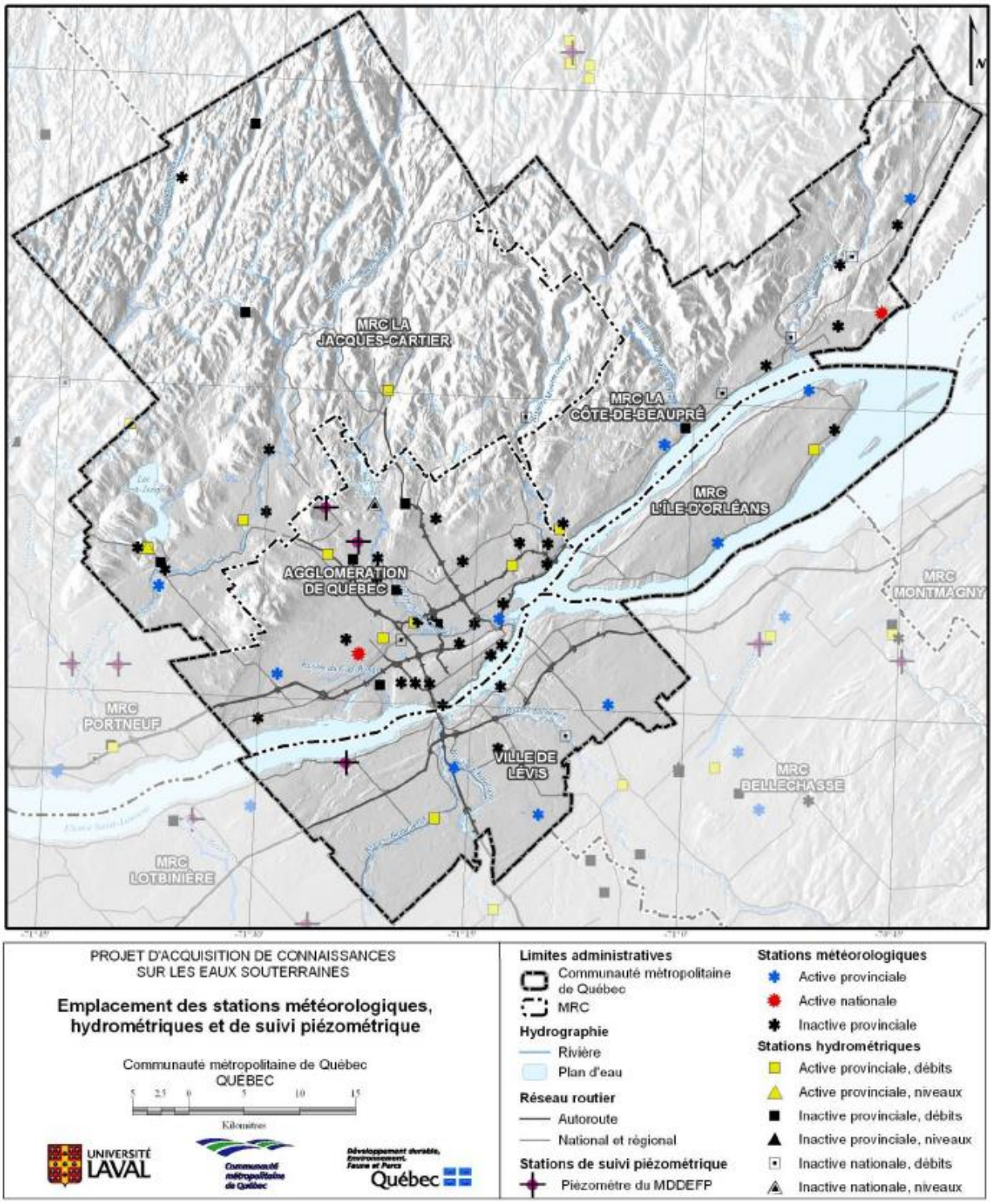


Figure 3. Emplacement des stations météorologiques, hydrométriques et piézométriques fédérales et provinciales sur le territoire de la CMQ (Talbot Poulin *et al.*, 2013).

Tableau 1. Localisation des stations météorologiques à proximité de la zone d'étude (ECCC)

Station	Latitude	Longitude	Altitude	Années	ID	Résolution temporelle[1]
Beauport	46°50'13" N	71°11'50" W	10.0 m	1999-2016	7010565	Horaire
Québec (Jean-Lesage INTL)	46°48'13" N	71°22'54" W	60.0 m	2005-2016	701S001	Horaire
Québec (Jean-Lesage INTL A)	46°48'00" N	71°23'00" W	74.4 m	1953-2013	7016294	Horaire[2]
Québec (INTL A)	46°47'28" N	71°23'36" W	74.4 m	2013-2016	7016293	Horaire
Ste-Foy (Université Laval)	46°46'49" N	71°17'15" W	91.4 m	1996-2016	701Q004	Horaire
Valcartier A	46°54'00" N	71°30'00" W	167.6 m	1978-2016	7018574	Horaire
Valcartier A	46°54'01" N	71°30'12" W	167.6 m	2000-2016	7018573	Horaire
Forêt Montmorency	47°19'00" N	71°09'00" W	640.0 m	1965-2002	7042388	Quotidien[2]
Forêt Montmorency RCS	47°19'22" N	71°08'54" W	672.8 m	2003-2016	7042395	Horaire

[1] Les données quotidiennes comprennent la température, les précipitations et la vitesse du vent. En plus de ces variables, les données horaires mesurent également l'humidité, la direction du vent et la pression atmosphérique à la station. Sauf lorsqu'indiqué, les précipitations sont toujours des données quotidiennes.

[2] Les précipitations sont enregistrées à un pas de temps de 5 minutes. À l'aéroport Jean-Lesage, cela s'applique pour la période 1961-1995 seulement.

Tableau 2. Moyennes climatiques et extrêmes historiques

Station	T° moyenne annuelle	Pluie annuelle moyenne	Hauteur annuelle moyenne des précipitations sous forme de neige	Précipitations annuelles moyennes	T° maximale journalière extrême	T° minimale journalière extrême	Pluie 24h maximale	Neige 24h maximale
Climatologie 1971-2000								
Aéroport Jean-Lesage	4.0°C	923.8 mm	315.9 cm	1230.3 mm	35.6°C (17/07/1953)	-35.4°C (04/01/1981)	81.2 mm (14/09/1979)	52.0 cm (15/12/2003)
Forêt Montmorency	0.3°C	964.0 mm	638.9 cm	1588.5 mm	33.9°C (01/08/1975)	-42.0°C (26/01/1994)	92.2 mm (06/09/1979)	50.6 cm (22/03/1999)
Climatologie 1981-2010								
Aéroport Jean-Lesage	4.2°C	899.3 mm	303.4 cm	1189.7 mm				
Forêt Montmorency	0.5°C	963.7 mm	619.9 cm	1583.1 mm				

Outre les stations d'ECCC, le MDDELCC possède des stations supplémentaires. Elles sont toutefois majoritairement situées sur le territoire de la Ville de Québec ou près du fleuve Saint-Laurent. Leur utilité est donc limitée pour l'étude des bassins versants de la prise d'eau du Château d'Eau et de la rivière Montmorency, dont une grande partie du territoire se trouve à des altitudes plus élevées et dans une zone climatique différente. Une demande doit être acheminée à Info-Climat pour accéder à ces données. La Ville de Québec possède également des pluviomètres sur son territoire, mais ils ne disposent généralement pas de longues séries de données. Ils n'enregistrent également que les précipitations liquides (Gaborit *et al.*, 2010).

La variabilité spatiale des pluies et la faible densité de stations météorologiques au nord de la zone d'étude constituent une lacune importante pour la modélisation hydrologique, commune à de nombreuses régions au Québec. Il a d'ailleurs été noté que lorsqu'une précipitation de 10 mm ou plus est mesurée à la station de l'aéroport Jean-Lesage ou à la Forêt Montmorency, le débit observé à la station hydrométrique de la rivière Saint-Charles n'augmente que dans 50 % des cas (Salou, 2009).

Cette lacune spatiale pourrait être comblée par l'utilisation de données interpolées sur grille. Les produits les plus communs sont ceux de Ressources naturelles Canada (Hutchinson *et al.*, 2009); et du MDDELCC (Bergeron, 2016). Les deux grilles possèdent une résolution d'environ 10 km et les données sont quotidiennes, avec une période couverte allant respectivement de 1950/1961 à 2013. L'acquisition des données doit s'effectuer en prenant contact avec une personne-ressource (respectivement Dan McKenney pour RNCan et Info-Climat pour le MDDELCC).

De plus, la Direction de l'expertise hydrique (DEH, anciennement le Centre d'expertise hydrique du Québec - CEHQ) du MDDELCC a récemment effectué la reconstitution historique des apports verticaux (eaux de fonte et précipitations) pour la période 1900-2010 (Poirier *et al.*, 2014). Cette étude a été réalisée dans le cadre du Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES, voir Section 3.1.3) et l'information est accessible à tous via une demande à Info-Climat. Les données sont interpolées sur une grille de 10 km de résolution. Contrairement aux données sur grille discutées au paragraphe précédent, les apports verticaux combinent les eaux de fonte et la pluie, ce qui simplifie la modélisation hydrologique en retirant l'obligation de modéliser le manteau neigeux.

3.1.2 DÉBITS EN RIVIÈRE

La DEH possède trois stations hydrométriques actives sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles. Toutefois, seule la station située sur la rivière Saint-Charles (à 6.4 km en aval de la prise d'eau) couvre une longue période, soit de 1969 à aujourd'hui. Les autres stations, sur les rivières Nelson et des Hurons, ne sont en opération que depuis 2006 et 2007 respectivement. Six stations supplémentaires sont aujourd'hui inactives, sur les rivières Jaune (1983-1994), Nelson (1983-1994), Saint-Charles (deux localisations : 1964-1968 et 1983-1995), Lorette (2006-2009) et du Berger (1983-1995).

Les débits à l'exutoire du lac Saint-Charles ne sont pas enregistrés. Des limnimètres (appareils utilisés pour mesurer la profondeur des lacs) sont toutefois placés sur le barrage Cyrille-Delage et mesurent les niveaux d'eau en amont et en aval de l'ouvrage. Il est possible d'effectuer une estimation du débit à partir des niveaux d'eau, de la configuration des vannes et de leur ouverture (Salou, 2009). Un historique des apports au lac Saint-Charles a d'ailleurs récemment été réalisé par la DEH et couvre les années 2013 à aujourd'hui (Poirier, C. de la DEH, communication personnelle). L'existence des données nécessaires à une reconstitution historique couvrant un passé plus lointain n'a pas encore été confirmée par la DEH ou par la Ville de Québec (la configuration du barrage a notamment été modifiée en 2013), mais une étude de ce genre pourrait permettre d'étendre l'historique des débits disponibles de la rivière Saint-Charles. Le débit prélevé à la prise d'eau du Château-d'Eau est d'environ 1.5 à 2 m^3/s (Gaborit *et al.*, 2010; Cochand, 2014).

Sur la rivière Montmorency, une station de la DEH est installée près de l'exutoire du bassin. La série de données couvre les années 1924 à 1939, puis de 1964 à aujourd'hui. Une seconde station, plus ou moins au centre du bassin versant, couvre les années 1966-1982, puis 1996 à aujourd'hui. Le débit prélevé aux deux prises d'eau de la Ville de Québec sur ce bassin varie de 0.3 à 0.6 m^3/s chacune (OBV Charlevoix-Montmorency).

La Figure 4 présente un résumé du régime hydrique mesuré aux stations hydrométriques des rivières Saint-Charles et Montmorency (DEH #050904 et #051001). Les autres stations ne disposent pas d'assez de données. On remarque qu'en moyenne, les débits de la rivière Saint-Charles respectent les débits réservés écologiques (Section 2.3). Toutefois, historiquement, des débits beaucoup plus bas ont été atteints lors des années 80 et au début des années 90, avant qu'une réglementation ne soit mise en place (Bourgeois *et al.*, 1998). Depuis les années 2000, une amélioration notable est remarquée dans le débit minimal atteint lors des étiages estivaux, probablement en raison de la réglementation. Ce n'est toutefois pas le cas en hiver et en période de fraie.

Sur la rivière Montmorency, tels qu'en témoignent les débits minimums historiques enregistrés, les étiages ne constituent pas un enjeu important. Au contraire, ce sont plutôt les très forts débits qui posent problème, puisqu'ils peuvent causer des dommages à la station de pompage de l'eau potable et des inondations dans certains secteurs (OBV Charlevoix-Montmorency, 2014). Il est intéressant de noter que cette rivière, au régime d'écoulement naturel, affiche un certain devancement des crues printanières dans le temps, de même que des débits minimaux estivaux plus sévères depuis l'an 2000. Toutefois, tel qu'illustré à la Figure 5, aucune tendance statistiquement significative n'est visible au niveau des maximums saisonniers (*p-value* de 0.83 et 0.52 pour la régression linéaire au printemps et en été, respectivement).

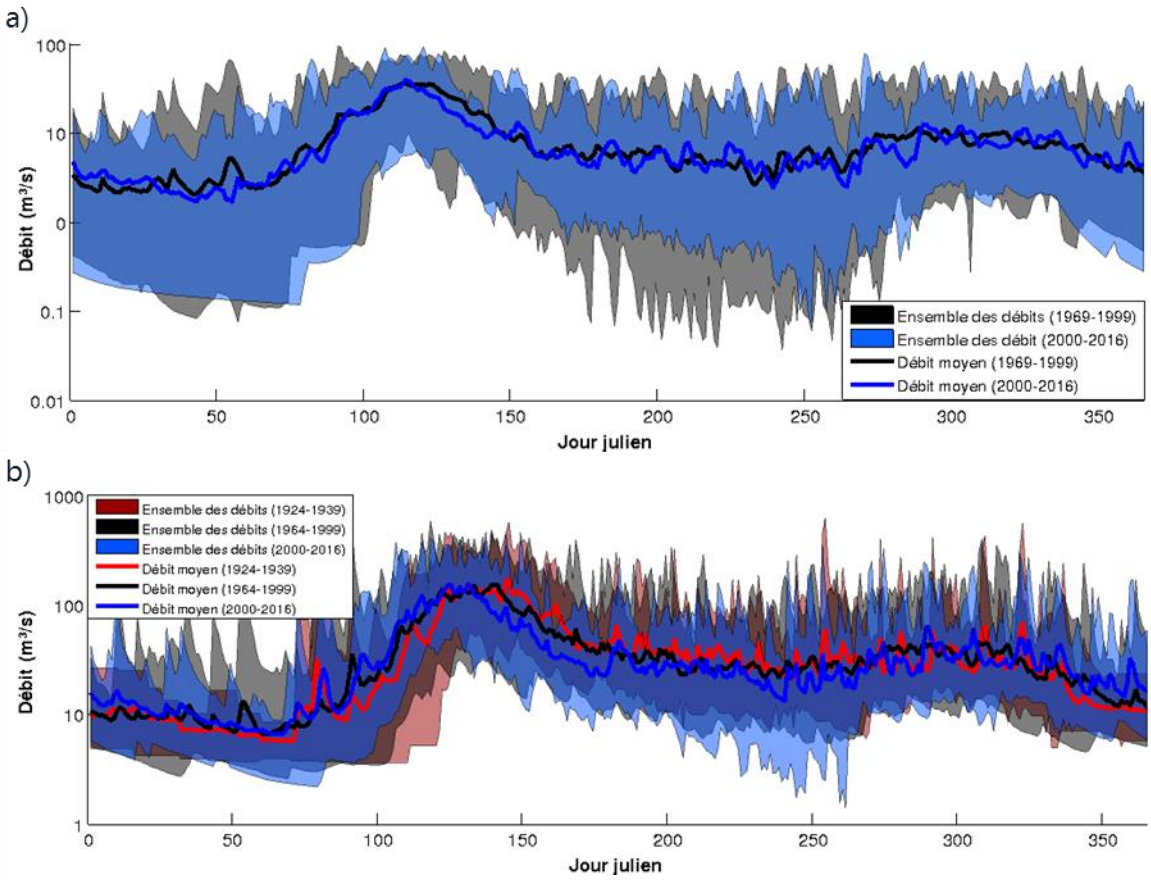


Figure 4. Débits moyens et extrêmes historiques pour les stations hydrométriques (a) de la rivière Saint-Charles et (b) de la rivière Montmorency.

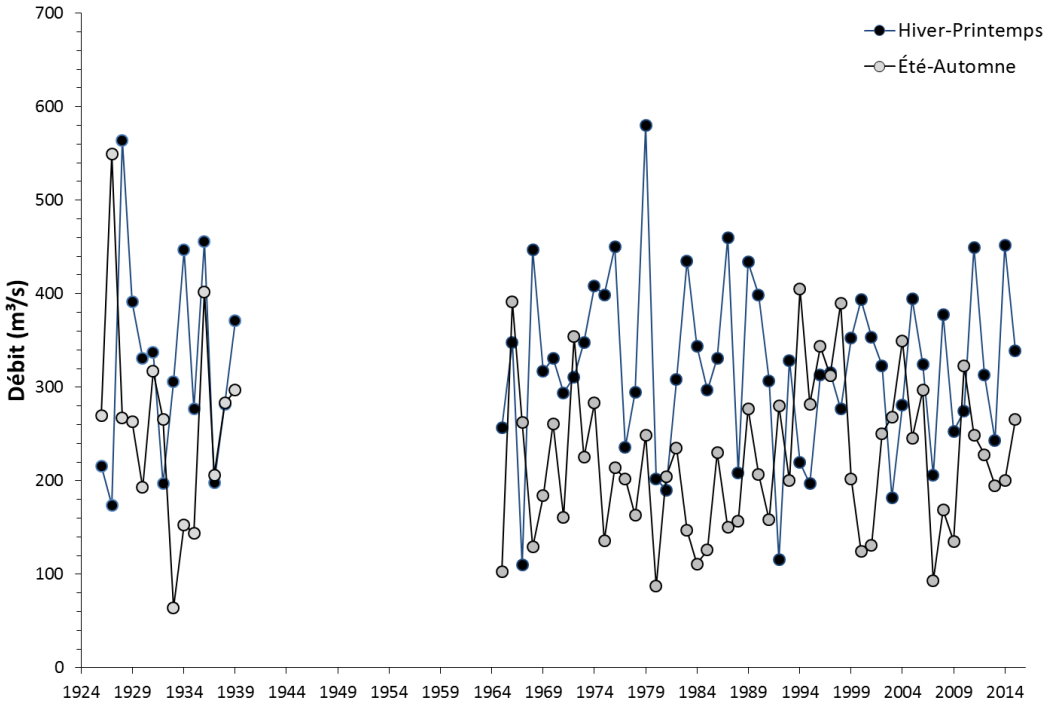


Figure 5. Maximums saisonniers (Hiver-Printemps et Été-Automne) à la station hydrométrique de la rivière Montmorency. Les débits maximaux à la station de la rivière Saint-Charles ne sont pas présentés en raison de la présence du barrage Cyrille-Delage.

3.1.3 SOLS ET EAUX SOUTERRAINES

Une cartographie détaillée de l'occupation des sols a été produite par Canards Illimités Canada en 2007 à partir d'images Landsat. Sur le territoire de la CMQ, qui exclue une grande partie du bassin versant de la Montmorency, l'occupation du sol et la pédologie (premier mètre de sol) de la région ont été mises à jour dans le cadre du Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines de la Communauté Métropolitaine de Québec (PACES-CMQ; Talbot Poulin *et al.*, 2013). Pour ce faire, des données plus récentes (entre 2008 et 2012) de quelques autres organismes ont été utilisées, dont l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Agriculture et Agroalimentaire Canada (Base nationale de données sur les sols – BNDS) et le ministère de la Forêt, de la Faune et des Parcs (Système d'inventaire écoforestier – SIEF).

Deux études récentes ont réalisé la cartographie des aquifères en procédant, entre autres, à de nouveaux forages et relevés géophysiques dans la région de Québec. La première étude, par Lamarche (2011), s'est concentrée principalement sur les dépôts meubles. Un modèle tridimensionnel a été produit en intégrant les nouvelles données aux cartes géologiques des

dépôts de surface déjà existantes. La résolution des voxels (pixels tridimensionnels) est de l'ordre de 250 x 250 x 2 m pour la plupart du domaine, mais avec une résolution verticale de 1 m pour une grande partie de la zone d'étude actuelle. Sur l'ensemble du territoire, le modèle représente quelques millions de voxels (Cochand, 2014). Le modèle est présenté à la Figure 6.

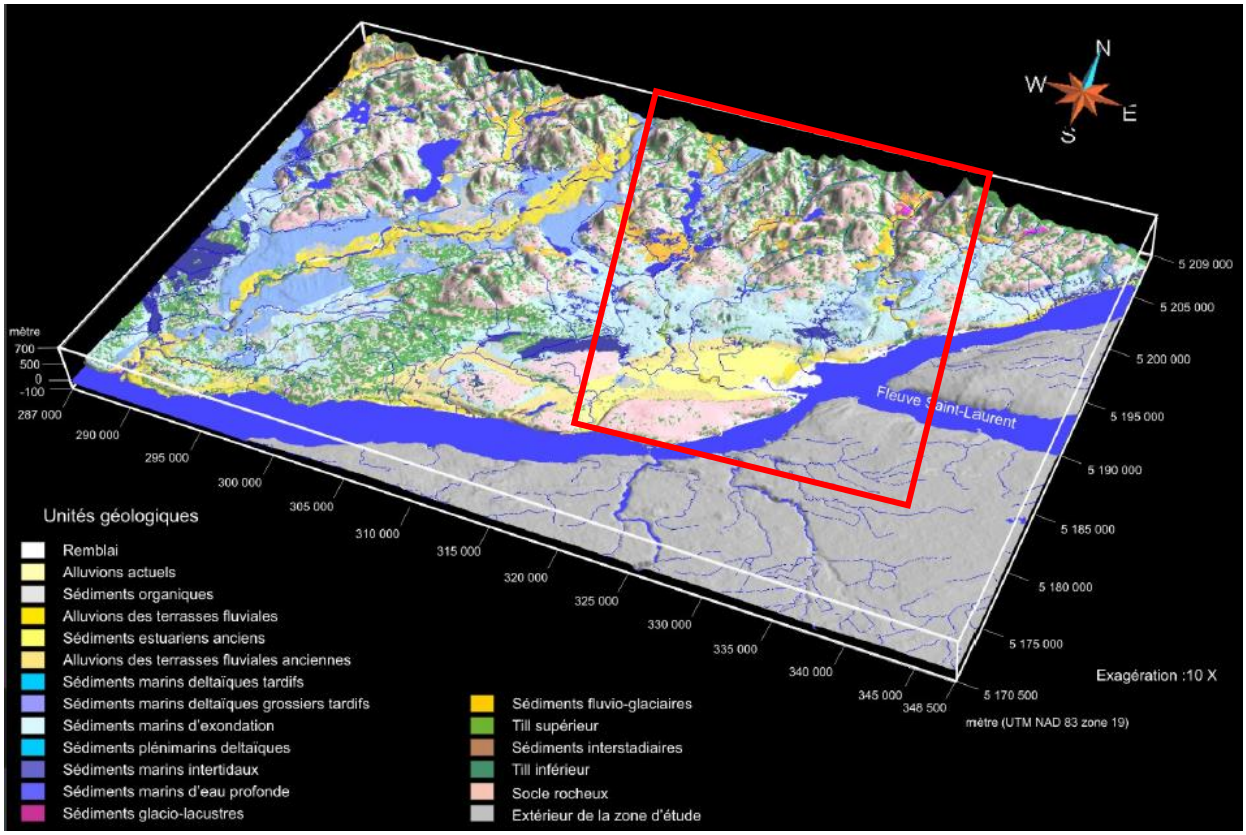


Figure 6. Modélisation GOCAD des sols de la région de Québec. La région à l'étude est encadrée en rouge où le lac Saint-Charles apparaît dans le coin supérieur-gauche (Lamarche, 2011).

L'étude de Lamarche (2011) comprend une première analyse hydrogéologique de la région de Québec, mais les aquifères ont été principalement caractérisés dans le cadre du PACES-CMQ (Talbot Poulin *et al.*, 2013). En plus des dépôts meubles, cette étude a également procédé à la caractérisation du roc fracturé. Les résultats principaux par rapport au volet de caractérisation sont illustrés à la Figure 7 et à la Figure 8. La recharge des eaux souterraines a également été abordée lors de ce projet à l'aide du modèle hydrogéologique HELP. Plus de détails sont donnés à la Section 3.2 et à l'Annexe B.

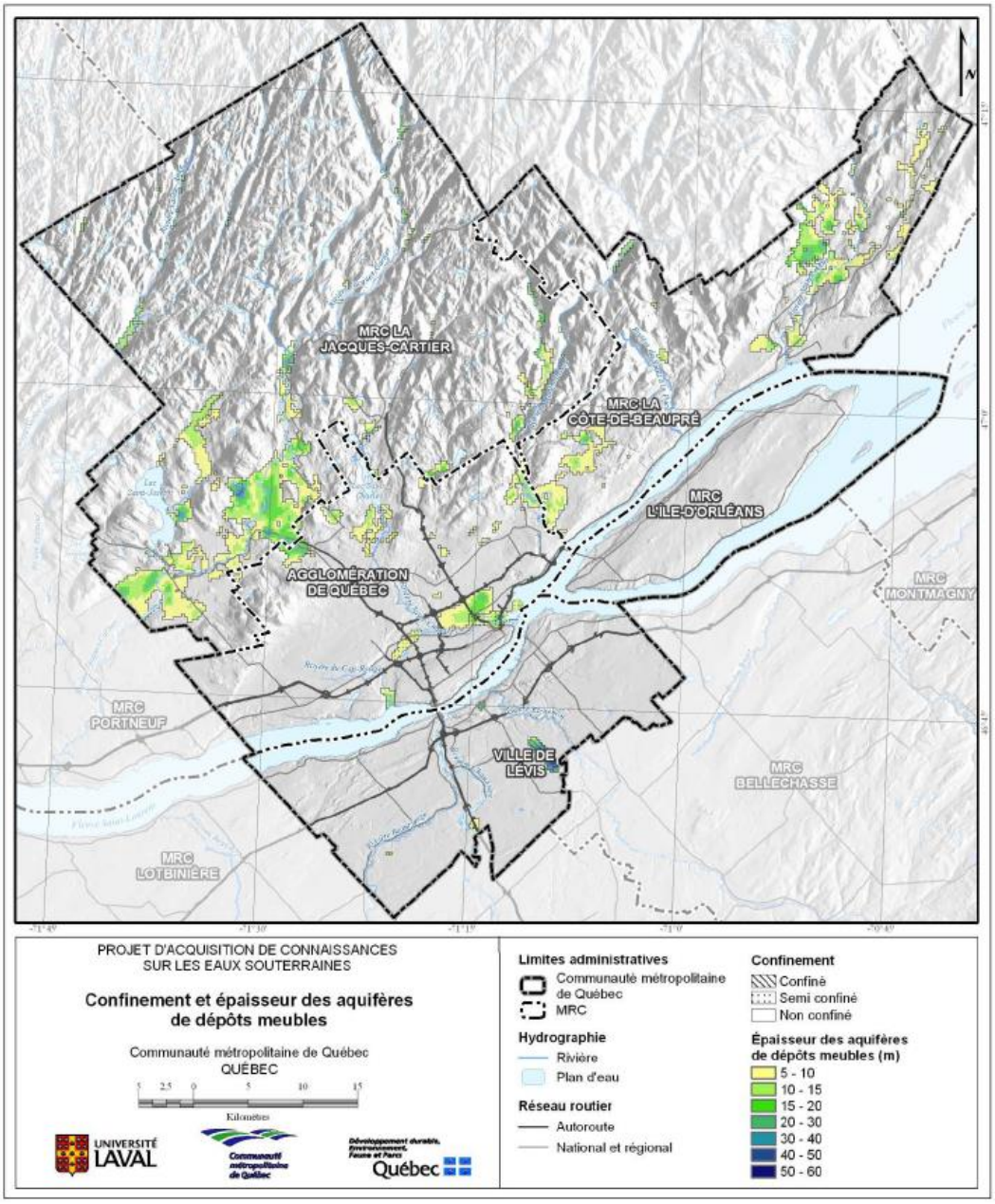


Figure 7. Confinement et épaisseur des aquifères de dépôts meubles (Talbot Poulin *et al.*, 2013).

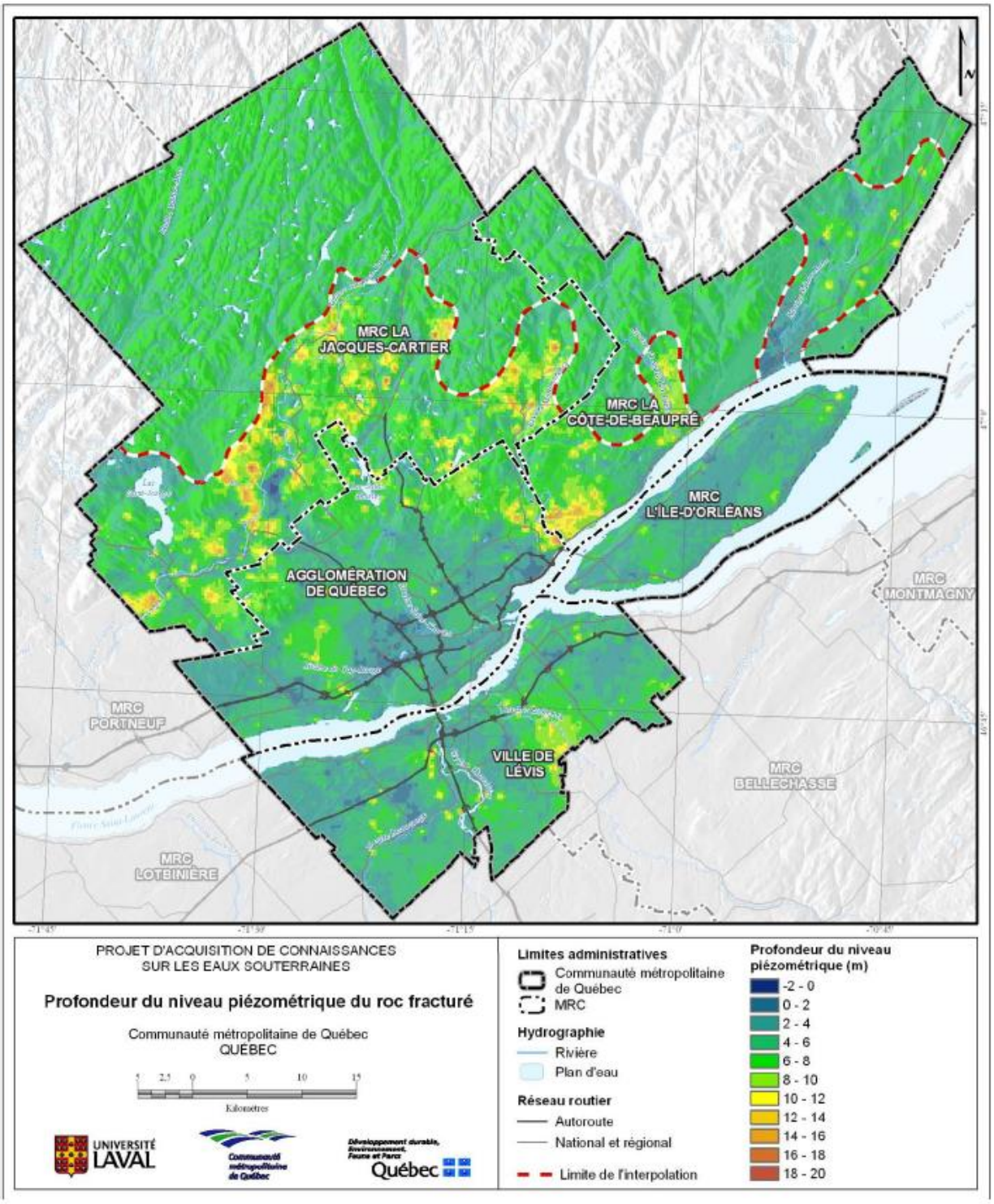


Figure 8. Profondeur du niveau piézométrique du roc fracturé (Talbot Poulin *et al.*, 2013).

3.2 MODÈLES HYDROLOGIQUES ET ÉTUDES

L'un des objectifs principaux de l'étude est de répertorier les modèles hydrologiques calés des rivières Saint-Charles et Montmorency. Le Tableau 3 présente les modèles identifiés lors de l'étude, ainsi que le critère de Nash-Sutcliffe obtenu lorsque mentionné (un critère de 1 indique un accord parfait entre les valeurs simulées et observées). Les résultats les plus intéressants sont illustrés à l'Annexe B. Les modèles implémentés avant 2008 n'ont pas été considérés.

Dans la plupart de ces études, il est noté que la quasi-absence d'informations sur la distribution spatiale des précipitations constitue un obstacle important à la modélisation des bassins versants, qui se manifeste par des crues non simulées en dehors de la période de fonte printanière ou, au contraire, par des pluies non détectées aux stations lorsque des crues significatives sont observées. Il en est de même pour l'absence ou la quasi-absence de séries de débits mesurés sur les tributaires du lac Saint-Charles qui complexifient le processus de calage des modèles (Salou, 2009; Gaborit *et al.*, 2010). Tel que discuté à la Section 3.1.1, la reconstitution des apports au lac Saint-Charles pourrait pallier en partie à ce problème.

Pour l'instant, l'étude de Gaborit *et al.* (2010) conclue que la modélisation à l'aide de modèles relativement simples tels que GR4J ou le réseau de neurones produisent des résultats similaires au modèle beaucoup plus complexe SWAT lorsqu'on l'utilise pour reproduire les données historiques. Cette problématique déjà bien documentée dans la littérature est causée par la surparamétrisation d'un modèle tel que SWAT par rapport aux données disponibles (Moon *et al.*, 2004; Geza et McCray, 2008). Le modèle HYDROTEL est similaire à SWAT en termes de complexité, ce qui signifie qu'il possède les mêmes limitations quant au manque d'information spatiale. Cela dit, ces modèles peuvent être utilisés pour simuler l'impact de l'aménagement du territoire sur le régime hydrique d'un bassin versant. Dans ce contexte la littérature scientifique suggère que cette particularité ne doit pas être négligée étant donné son impact majeur sur l'hydrologie d'un bassin (Savary *et al.*, 2009; Quilbé *et al.*, 2008). Dans le cadre de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (CEHQ, 2013; 2015), la DEH a préconisé un calage global plutôt qu'un calage local à l'échelle d'un bassin versant afin de tirer profit de l'information contenue dans les données de plusieurs bassins (CEHQ, 2014).

Puisque le débit en rivière lors des périodes d'étiage provient principalement des écoulements souterrains, le calage des étiages, essentiel pour déterminer la vulnérabilité des prises d'eau, est tributaire d'une bonne caractérisation des sols (Goderniaux *et al.*, 2009). Pour cette raison, les modèles HydroGeoSphere (utilisé dans les études de Cochand (2014) et de Graf (2015)) et HELP (utilisé dans le cadre du PACES-CMQ) sont particulièrement intéressants. D'ailleurs, une étude réalisée en Ontario a montré qu'HydroGeoSphere permettait de modéliser l'impact des changements climatiques sur la ressource en eau (Li *et al.*, 2008). De plus, contrairement aux

études de Salou (2009) et de Gaborit *et al.* (2010), les modèles HydroGeoSphere de Cochand (2014) et de Graf (2015) ont été mis en place après la caractérisation des aquifères réalisée par Lamarche (2011) et Talbot Poulin *et al.* (2013). Il demeure toutefois difficile de comparer les résultats d'HydroGeoSphere avec ceux des autres modèles, puisque l'étude de Cochand (2014) a favorisé un calage sur les bilans hydrologiques moyens plutôt qu'un calage par une méthode telle que le critère de Nash-Sutcliffe.

Tableau 3. Modèles hydrologiques calibrés des rivières Saint-Charles et Montmorency

Référence	Institution(s)	But de l'étude	Modèle(s) utilisé(s)	Type de modèle	Critère Nash-Sutcliffe (Calage/Validation)	Référence du modèle
Rivière Saint-Charles						
Salou (2009)	Université Laval	Estimation des apports au lac Saint-Charles	SWAT	Hydrologie (distribué)	0.66 / 0.30	Arnold et Fohrer (2005)
Gaborit et al. (2010)	Université Laval	Modélisation du débit pour aider la prise de décision dans la gestion de l'eau	SWAT	Hydrologie (distribué)	0.72 / 0.66	
			GR4J	Hydrologie (global)	0.78 / 0.67	Perrin (2002)
			Réseau de neurones	Boîte noire	0.79 / 0.67	ASCE (2000)
Rousseau *et al.* (2010; 2014)	INRS-ETE	Calcul des temps de parcours vers la prise d'eau	HYDROTEL GIBSI	Hydrologie (distribué)	0.65 / 0.68 (2010) 0.95 (2014 - calage)	Fortin *et al.* (2001)
Talbot Poulin *et al.* (2013)	Université Laval MDDELCC CMQ	Acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la CMQ	HELP	Hydrogéologie (distribué)	N/A	Schroeder *et al.* (1994)
Cochand (2014)	Université Laval	Étude de l'impact des CC et du développement urbain sur la ressource en eau	HydroGeoSphere	Hydrogéologie (intégré)	N/A	Therrien *et al.* (2005)
Graf (2015)	Université Laval	Étude de la vulnérabilité de l'eau souterraine	HydroGeoSphere	Hydrogéologie (intégré)	N/A	
Rivière Montmorency						
Rousseau *et al.* (2008)	INRS-ETE	Reproduction des scénarios de crues passées	HYDROTEL GIBSI	Hydrologie (distribué)	0.75 / 0.86	Fortin *et al.* (2001)
Talbot Poulin *et al.* (2013)	Université Laval MDDELCC CMQ	Acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la CMQ	HELP	Hydrogéologie (distribué)	N/A	Schroeder *et al.* (1994)
Québec méridional						
CEHQ (2014)	MDDELCC/DEH	Étude de l'impact des CC sur le régime hydrique des rivières	HYDROTEL	Hydrologie (distribué)	N/A	Fortin *et al.* (2001)

4 IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

4.1 MODÉLISATION DU CLIMAT

Un modèle climatique se veut une simulation des interactions entre l'atmosphère, l'eau (océans et eau douce), la cryosphère (neige et glace), les sols et la biosphère. Ces modèles sont divisés en deux catégories. Les Modèles de Circulation Globale (MCG) possèdent une résolution grossière, de l'ordre de plusieurs dizaines à quelques centaines de kilomètres, ce qui leur permet de modéliser l'ensemble de la planète. Les Modèles Régionaux de Climat (MRC), eux, possèdent une résolution plus fine, de l'ordre de dix à quelques dizaines de kilomètres, mais doivent en contrepartie se limiter à un domaine plus restreint.

Trois types d'incertitudes doivent être pris en compte dans l'analyse des projections climatiques, soient l'évolution dans le temps des émissions de gaz à effet de serre (GES), la nature chaotique et aléatoire des phénomènes atmosphériques (explorée en faisant varier les conditions initiales des MCG et des MRC) et les erreurs structurales des modèles eux-mêmes (par exemple, des processus physiques simplifiés ou une résolution spatiale et temporelle insuffisante pour adéquatement représenter un phénomène).

Afin d'explorer l'impact du premier type d'incertitudes, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a créé des scénarios standards d'émissions futures de GES. Ces scénarios, présentés à la Figure 9 par les lignes de différentes couleurs, illustrent un ensemble de décisions politiques et sociétales probables, allant d'une réduction drastique et rapide des émissions de GES à une progression constante des émissions tout au long du siècle. Dans le plus récent (5^{e}) rapport du GIEC (2013), ces scénarios sont appelés « *Representative Concentration Pathways* » (RCP) et représentent le déséquilibre d'énergie entre le rayonnement solaire réchauffant la Terre et les émissions de rayonnement infrarouge quittant l'atmosphère, où le chiffre utilisé dans l'appellation des RCP indique le forçage radiatif résultant à la fin du siècle (en W/m^2). Noter que même si la nomenclature utilisée dans le cadre du 4^{e} rapport du GIEC (2007) est différente, les scénarios du « Special Report on Emissions Scenarios » (SRES) demeurent similaires aux RCP, tel qu'illustré à la Figure 9.

Les deux autres types d'incertitudes sont traités en utilisant des analyses d'ensemble multi-modèles, où chaque modèle est utilisé à plusieurs reprises avec un jeu de paramètres initiaux légèrement différents, ce qui permet de quantifier l'impact de la nature chaotique du climat et des erreurs inhérentes à chaque modèle sur l'évolution du climat tout au long du siècle. La Figure 9, par exemple, illustre l'augmentation de la température moyenne mondiale selon les

deux analyses d'ensemble multi-modèle *Coupled Model Intercomparison Project – Phase 3* (CMIP3, Meehl *et al.*, 2007) et *Phase 5* (CMIP5, Taylor *et al.*, 2012), où le nombre entre parenthèses dans la légende indique le nombre de simulations utilisées.

Les changements climatiques sont identifiés et quantifiés en comparant les propriétés statistiques d'indicateurs météorologiques (ex. température, précipitations, pression atmosphérique, humidité, ensoleillement) sur des périodes distinctes et suffisamment longues (habituellement, une période de 30 ans). Tel qu'illustré à la Figure 9, les incertitudes mentionnées précédemment n'ont qu'un impact limité sur les premières décennies, mais cet impact devient significatif aux horizons 2050, 2080 et 2100.

L'amplitude des changements climatiques est également influencée par la localisation géographique. Le Tableau 4 présente les projections climatiques pour le sud du Québec et de l'Ontario, telles que publicisées par Ouranos dans le cadre de la Synthèse 2015 (Ouranos, 2015). Les changements projetés se démarquent de la variabilité naturelle du climat dès l'horizon 2020 dans le cas de la température et beaucoup plus tard, soit à l'horizon 2050 ou même 2080, dans le cas des précipitations. Même en 2080, les précipitations estivales et automnales demeurent à l'intérieur de la variabilité naturelle du climat.

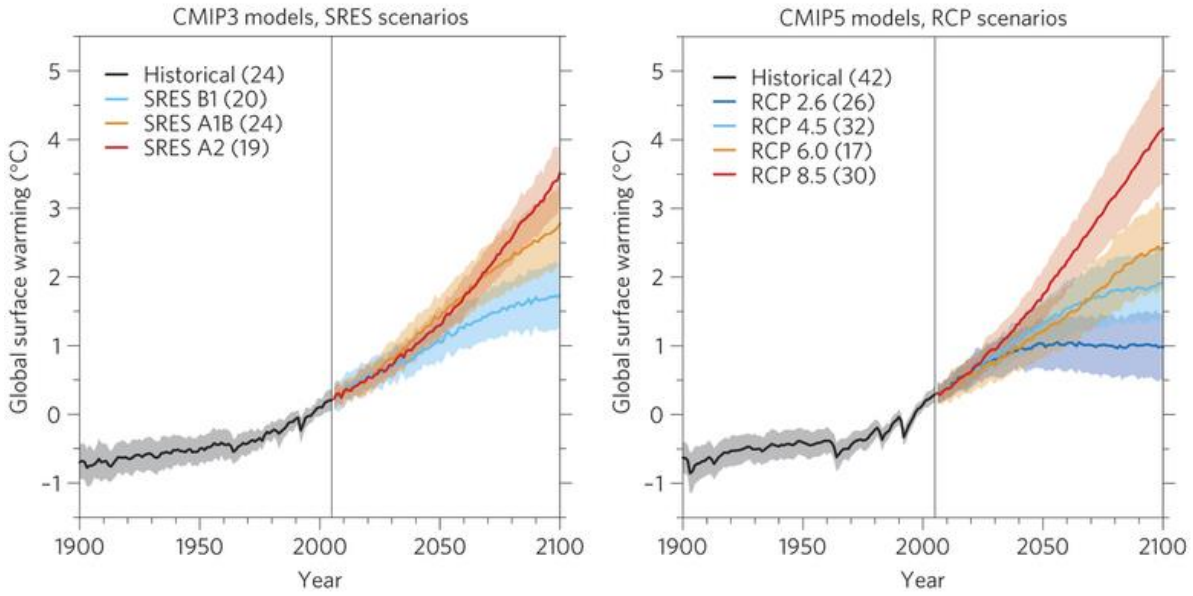


Figure 9. Projections climatiques pour la période 2000-2100. Chaque couleur constitue un scénario d'émissions de GES différents. Les lignes pleines indiquent les moyennes multi-modèles, tandis que la zone ombrée représente un écart-type de déviation relatif à la variabilité interne de chaque modèle. Le nombre entre parenthèses indique le nombre de simulations utilisées. (Knutti et Sedláček, 2013).

Tableau 4. Projections climatiques (10e et 90e percentile) pour le sud du Québec et de l'Ontario (Ouranos, 2015)

Saison		Normale climatique 1971-2000		Horizon 2020		Horizon 2050		Horizon 2080	
		μ	σ	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Hiver	Température (°C)	-9.5	1.6	+1.2 à +2.7	+1.0 à +2.9	+1.8 à +4.3	+3.0 à +5.5	+2.3 à +5.5	+5.1 à +8.2
	Précipitations (%)	228 mm	16	+0 à +15	+1 à +17	+2 à +22	+5 à +27	+5 à +24	+7 à +36
Printemps	Température (°C)	3.9	1.3	+0.7 à +2.3	+0.8 à +2.1	+1.4 à +3.5	+2.2 à +5.1	+1.8 à +4.2	+3.9 à +7.6
	Précipitations (%)	246 mm	19	+0 à +11	-2 à +10	+3 à +17	+7 à +18	+1 à +18	+11 à +25
Été	Température (°C)	17.6	0.8	+1.0 à +1.8	+1.0 à +2.0	+1.6 à +3.3	+2.2 à +4.5	+1.9 à +4.2	+3.9 à +7.2
	Précipitations (%)	296 mm	12	-2 à +10	-3 à +8	-1 à +9	-5 à +10	-4 à +12	-10 à +11
Automne	Température (°C)	6.4	0.9	+0.8 à +2.1	+0.9 à +2.2	+1.7 à +3.4	+2.5 à +4.2	+2.1 à +4.3	+3.9 à +6.8
	Précipitations (%)	284 mm	16	-3 à +10	-7 à +8	-2 à +13	-2 à +14	-2 à +13	-5 à +19

La modélisation de l'impact des changements climatiques sur un indicateur local, par exemple sur le régime hydrique à la prise d'eau de la rivière Saint-Charles, demande l'utilisation d'un modèle hydrologique afin de transformer l'information climatique des MCG/MRC en débit.

Une première approche favorise l'utilisation d'un grand nombre de scénarios climatiques équiprobables, qui sont utilisés comme données d'entrée au modèle hydrologique afin de créer un éventail de futurs possibles. L'impact des changements climatiques sur une variable précise (par exemple, les étiages estivaux) est alors traité en analysant les résultats du modèle hydrologique pour chaque scénario climatique, habituellement sur une période de 30 ans, ce qui permet d'obtenir une information sur le signal de changement, présenté sous la forme de la direction, de l'ampleur et de la dispersion des résultats (CEHQ, 2013; 2015). Ce type d'approche, plus robuste que l'approche présentée au paragraphe suivant, favorise généralement les modèles hydrologiques dont le temps de calcul varie de quelques secondes à quelques heures.

Une deuxième approche est utilisée pour les modèles hydrologiques dont le temps de calcul rend impossible l'utilisation de la technique précédente. Cette technique suppose l'utilisation de quelques scénarios climatiques représentatifs (par exemple, les lignes pleines des scénarios A2,

A1B et B1 à la Figure 9). La différence sur les propriétés statistiques est alors appliquée à la climatologie historique. Par exemple, si la température du 1er janvier 2071-2100 est en moyenne 3°C plus chaude que pour la période 1981-2000, alors la température des 1er janviers de 1981 à 2000 sera rehaussée de 3°C. Le modèle hydrologique est simulé en utilisant les données historiques « ajustées » pour tenir compte des changements climatiques. Cette méthode requiert un nombre beaucoup plus faible de simulations, mais ne prend pas en compte l'incertitude intrinsèque aux scénarios climatiques. De plus, comme le climat passé est utilisé, les modifications potentielles à la fréquence et à l'intensité des évènements pluvieux n'est pas prise en compte.

4.2 DISPONIBILITÉ FUTURE DE LA RESSOURCE EN EAU

Parmi les études présentées à la Section 3, seule celle de Cochand (2014) analyse l'impact des changements climatiques sur le bassin versant de la rivière Saint-Charles. Les projections ont été faites à l'horizon 2080 (2071-2100) et, en raison du temps de calcul requis par le modèle HGS, trois scénarios d'émissions de GES ont été utilisés. Ceux-ci représentent la moyenne de 21 MCG pour le scénario d'émissions SRES B1 (faibles émissions), 24 modèles pour le scénario SRES A1B (émissions moyennes) et 20 pour le scénario SRES A2 (fortes émissions) Les MCG utilisés correspondent aux modèles considérés pour l'élaboration du quatrième rapport du GIEC, tel qu'illustré par les lignes pleines à la Figure 9 (GIEC, 2007).

Le MDDELCC et la DEH ont produit deux Atlas hydroclimatiques du Québec méridional où sont analysés plusieurs bassins versants jaugés à l'aide du modèle HYDROTEL (CEHQ, 2013; 2015). Les bassins sont choisis en fonction de leur localisation (Québec méridional) et du type d'écoulement (seules les rivières naturelles ou influencées journellement sont retenues). Au total, ce sont 50 bassins versants du sud du Québec qui ont été analysés selon un calage global. Ce type de calage favorise une cohérence spatiale sur l'ensemble du territoire, au détriment de la performance à l'échelle du bassin versant (Ricard *et al.*, 2011; CEHQ, 2014). L'édition 2013 de l'Atlas utilise 73 scénarios climatiques issus du *Coupled Model Intercomparison Project – Phase 3* (CMIP3, Meehl *et al.*, 2007), 9 scénarios Ouranos-MRCC et 7 scénarios NARCCAP pilotés à leurs frontières par des modèles de CMIP3, tandis que l'édition 2015 de l'Atlas utilise 98 scénarios climatiques issus du *Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5* (CMIP5, Taylor *et al.*, 2012). Dans les deux cas, les résultats se concentrent sur l'horizon 2050 (2041-2070). Il est à noter que les résultats de l'Atlas 2015 n'invalident pas ceux de l'Atlas 2013; les deux documents sont complémentaires (CEHQ, 2015).

Deux rivières situées à proximité du lieu d'étude, Ste-Anne et Bras-du-Nord, ont été analysées lors de ces exercices. Dans le cadre de l'étude actuelle, la DEH a procédé à l'analyse des rivières Saint-Charles, Montmorency et Jacques-Cartier par la même méthodologie que les rivières de

l'Atlas. Il faut toutefois noter que ces rivières avaient originellement été écartées soit en raison de leur régime d'écoulement influencé (rivières Saint-Charles et Jacques-Cartier), soit en raison de la taille trop petite de leur bassin versant (rivière Saint-Charles), soit en raison de simplifications au niveau du modèle HYDROTEL (la rivière Montmorency n'est modélisée que par un seul tronçon). Les résultats, notamment en ce qui a trait aux étiages et aux crues, doivent donc être pris avec réserve et comparés aux résultats aux rivières Bras-du-Nord et Ste-Anne (Noël, P. de la DEH, communication personnelle).

Les résultats de la DEH présentés aux Section 4.2.1, 4.2.2 et 4.2.3 réfèrent aux cinq rivières mentionnées précédemment (Saint-Charles, Montmorency, Jacques-Cartier, Ste-Anne, Bras-du-Nord). Les résultats plus généraux de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional sont présentés à l'Annexe C.

4.2.1 MOYENNE ANNUELLE

De manière générale, le climat futur sera marqué par une hausse des températures, des précipitations et de l'évaporation, ce qui amènera une intensification du cycle de l'eau (Huntington, 2006). Plus spécifiquement, cela signifie qu'en hiver, les périodes de fonte et les évènements de pluie sur neige seront plus fréquents, ce qui se répercutera par des crues hivernales plus fréquentes. En été, la hausse des températures favorisera l'évapotranspiration et des débits plus faibles, quoique les évènements de précipitations pourraient devenir plus convectifs (orageux) et favoriser des crues soudaines. Pour cette raison, il est difficile de prévoir quel sera l'impact des changements climatiques sur la quantité totale d'écoulement en eau accumulée dans l'année.

Les simulations de la DEH, pour l'Atlas hydroclimatique à l'horizon 2050, indiquent un changement au débit annuel moyen de l'ordre +4.2 à +4.8 % (2013)[1] et -1.6 à -0.6 % (2015), selon la rivière, avec un consensus élevé (2013) et modéré (2015) entre les scénarios climatiques quant à la direction du changement. Dans tous les cas, la dispersion (qui englobe la moitié des valeurs de changement obtenues selon les divers scénarios climatiques) est d'environ 10 %. Ces chiffres considèrent l'ensemble de la région, soient les rivières Bras-du-Nord, Ste-Anne, Saint-Charles, Montmorency et Jacques-Cartier. Il s'agit de résultats similaires à ceux obtenus par HGS

[1] Afin d'alléger le texte, les années 2013 et 2015 sont utilisées afin de référer aux scénarios climatiques CMPI3/CMIP5 utilisés lors de l'élaboration des deux éditions de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Les résultats mentionnés dans le texte représentent l'ampleur du changement moyen selon les cinq rivières analysées.

où peu de changements sont notés à l'horizon 2080 peu importe le scénario climatique utilisé (Cochand, 2014). La recharge totale des aquifères demeure elle aussi assez stable (-1.15 à +6.0 %, selon le scénario climatique).

La variation mensuelle des débits, calculée par la DEH selon les techniques de l'Atlas hydroclimatique, est illustrée à la Figure 10. La dispersion des résultats, autant entre les rivières qu'entre les scénarios climatiques, est beaucoup plus élevée en hiver et au printemps, par rapport à l'été et l'automne.

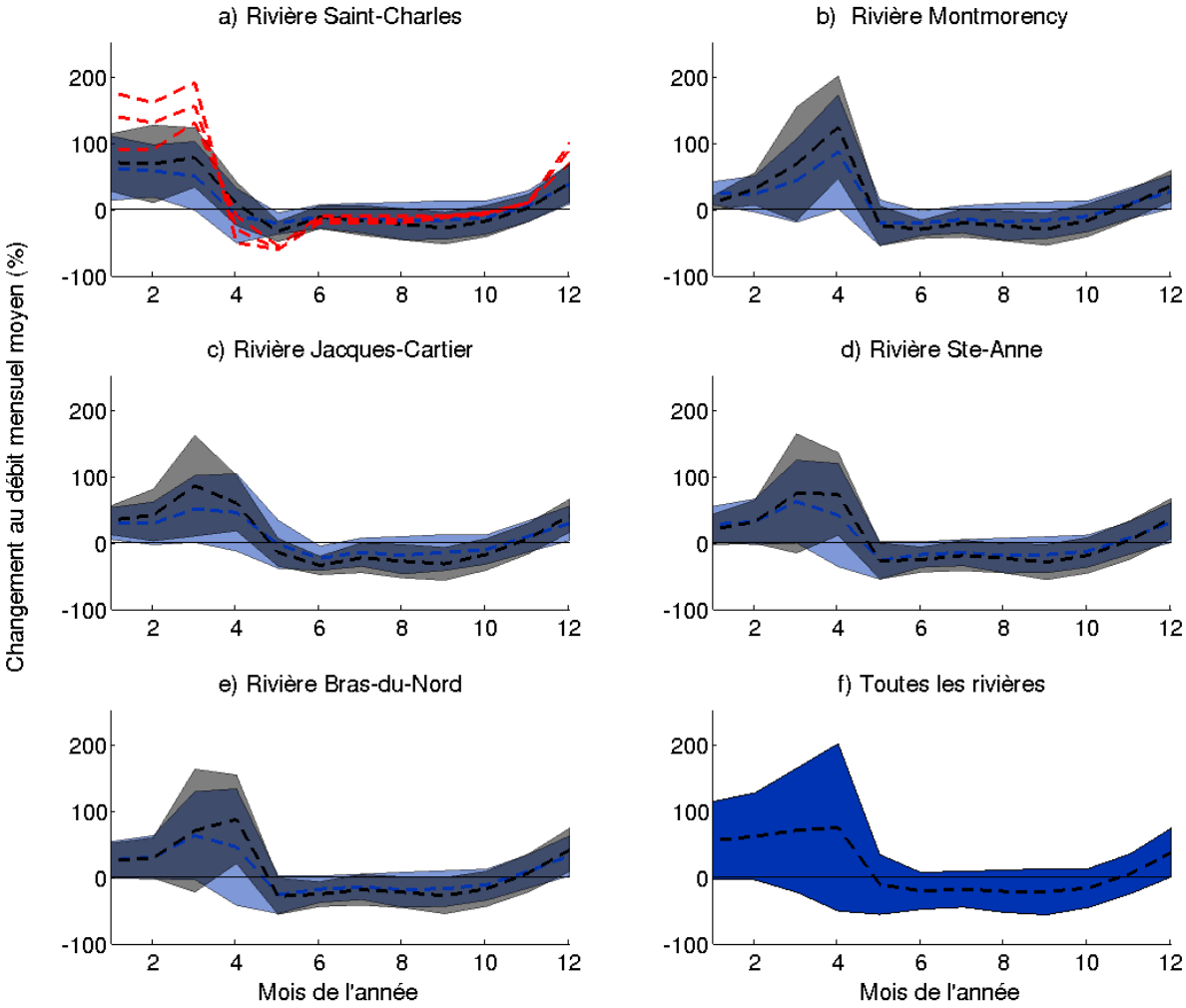


Figure 10. Changements prévus au débit mensuel moyen de quelques rivières de la région de Québec à l'horizon 2050, par rapport à 1971-2000, selon les scénarios climatiques de CMIP3 (bleu) et CMIP5 (gris). La ligne pointillée indique la moyenne. L'analyse suit la méthodologie employée par la Direction de l'expertise hydrique (DEH) du MDDELCC dans le cadre de ses deux éditions de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (CEHQ, 2013; 2015). À l'intérieur d'une même simulation, la dispersion des résultats inclut la moitié des scénarios climatiques analysés. Les lignes rouges illustrent les résultats de Cochand (2014) à l'horizon 2080.

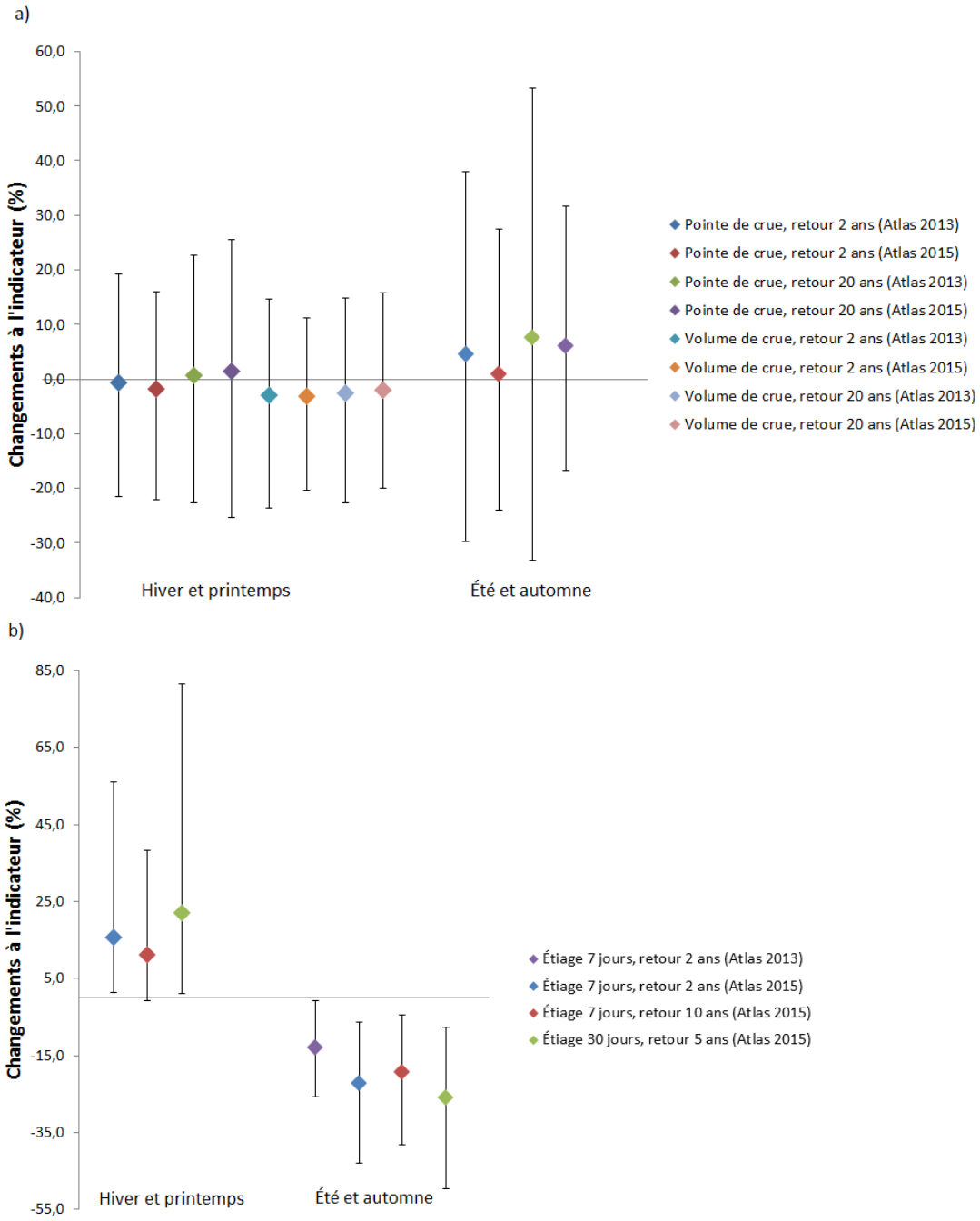


Figure 11. Changements prévus aux débits extrêmes par l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional à l'horizon 2050. Les résultats affichés regroupent les rivières Saint-Charles, Montmorency, Jacques-Cartier, Ste-Anne et Bras-du-Nord pour (a) les débits et volumes de crues de périodes 2 et 20 ans et (b) les étiages 7 jours de 2 et 10 ans et étiage 30 jours de 5 ans. Noter que certains indicateurs n'étaient pas analysés dans le cadre de l'édition 2013 de l'Atlas hydroclimatique. Le point indique la moyenne de toutes les rivières et les barres verticales représentent la dispersion des résultats.

4.2.2 HIVER ET PRINTEMPS

Les résultats détaillés se trouvent à la Figure 11 et à l'Annexe C. De manière générale, il peut être noté que le consensus sur la direction des changements est beaucoup plus élevé pour les débits moyens et les étiages hivernaux que pour les débits de crue. Ces résultats prévalent autant pour les rivières Saint-Charles, Montmorency et Jacques-Cartier que pour les rivières avoisinantes analysées dans le cadre de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (CEHQ, 2013; 2015). Noter que malgré le consensus élevé quant à la direction des changements, les étiages hivernaux eux-mêmes demeurent complexes à modéliser et à mesurer.

À l'horizon 2050, les volumes de crue et les débits de pointe présentent des changements respectifs de -8.3 à +1.5 % et de -4.8 à +5.2 %, avec seulement un consensus modéré entre les scénarios climatiques (dispersion de l'ordre de 15 à 20 %). À l'horizon 2080, les résultats de l'étude de Cochand (2014) pointent vers un manteau neigeux de 40 à 70 % plus mince en hiver en raison des épisodes de redoux plus communs et en raison d'évènements de pluie sur neige. L'étude ne discute pas des effets de cette diminution sur le débit de pointe en rivière ou sur le volume de crue, mais note que le volume de fonte mensuel maximal diminue d'environ 50 % et est devancé d'environ un mois.

Il existe un fort consensus entre les scénarios climatiques quant à la direction des changements pour les étiages hivernaux et le débit moyen saisonnier. On peut ainsi s'attendre à un débit moyen plus élevé de 8.3 à 10.9 % (±10 %)[1] en hiver, accompagné d'étiages moins sévères en raison des redoux et de l'augmentation des épisodes de pluie hivernale, qui favoriseront la fonte de la neige en hiver et la recharge des aquifères. En février, identifié comme un mois particulièrement problématique en raison de sévères étiages, on peut s'attendre à une augmentation du débit moyen à l'horizon 2050 de l'ordre de +57.6 à 68.0 % (±39 à 58 %) sur la rivière Saint-Charles et +23.1 à 41.5 % (±24 à 38 %) pour les rivières avoisinantes (CEHQ, 2013; 2015). Des résultats similaires sont attendus pour l'horizon 2080 à la rivière Saint-Charles, où le débit moyen en février est de 90 à 160 % supérieur au débit historique (Cochand, 2014). Au niveau des étiages, soit le débit minimal moyen sur une période de 7 jours, la rivière Saint-Charles présente une augmentation de 28.7 % (±27.4 %), alors que l'augmentation est plutôt de l'ordre de 8.8 à 17.9 % (±7.5 à 13.7 %) pour les rivières avoisinantes (CEHQ, 2015). Ces chiffres se

[1] Afin d'alléger le texte, le chiffre dans la parenthèse représente la dispersion des résultats, qui englobe la moitié des valeurs de changement obtenues selon les divers scénarios climatiques utilisés. Sauf lorsque mentionné, les résultats indiqués dans le texte représentent l'ampleur du changement moyen selon les deux Atlas et selon les cinq rivières analysées.

rapportent à un évènement d'une période de retour de 2 ans, mais, tel qu'identifié à la Figure 11, les résultats sont similaires pour les autres indicateurs d'étiage.

À l'échelle du bassin versant, Cochand (2014) note également une augmentation importante du niveau piézométrique dû à une recharge hivernale plus importante dans les zones de roc fracturé en haute altitude et dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. L'étude note entre autre une infiltration de deux à trois fois plus importante en janvier, par rapport à la moyenne historique.

4.2.3 ÉTÉ ET AUTOMNE

Les résultats détaillés se trouvent à la Figure 11 et à l'Annexe C. Comme pour l'hiver et le printemps, le consensus sur la direction des changements est beaucoup plus élevé dans le cas des débits moyens et des étiages estivaux que pour les crues estivales. Ces résultats prévalent pour toutes les rivières de la région (CEHQ, 2013; 2015). Ainsi, les crues estivales/automnales semblent légèrement plus intenses à l'horizon 2050 (-1.0 à +10.1 %), mais avec un faible consensus entre les divers scénarios climatiques quant à direction du changement. La dispersion des résultats est de l'ordre de 15 à 40 %. Les crues estivales et automnales n'ont pas été traitées dans le cadre de l'étude de Cochand (2014).

Au contraire, le consensus est élevé quant à la direction des changements pour les étiages estivaux et le débit moyen saisonnier. On peut ainsi s'attendre à un débit moyen plus faible de -2.2 à -10.2 % (±15 à 20 %) en été et en automne, accompagné par des étiages plus sévères en raison de l'augmentation des températures et de l'évapotranspiration. Des résultats similaires sont obtenus pour l'horizon 2080, où le débit moyen en été est de 10 à 25 % inférieur au débit historique selon le scénario climatique utilisé (Cochand, 2014). Au niveau des étiages, l'édition 2013 de l'Atlas projette une diminution du débit minimal sur 7 jours d'environ 11 à 14 % (±10 à 12 %) à l'horizon 2050. L'édition 2015 de l'Atlas présente une diminution similaire d'environ 19 % (±12 %) pour les rivières Bras-du-Nord, Sainte-Anne et Montmorency, mais une diminution de l'ordre de 28 % (±15 %) pour les rivières Saint-Charles et Jacques-Cartier (CEHQ, 2013; 2015). Ces chiffres se rapportent à un évènement d'une période de retour de 2 ans, mais, tel qu'identifié à la Figure 11, les résultats sont similaires pour les autres indicateurs d'étiage. En juillet, identifié comme un mois particulièrement problématique en raison de sévères étiages, on peut s'attendre à une diminution du débit moyen à l'horizon 2050 de l'ordre de -12.9 à -22.5 % (±20 à 23 %) sur les rivières de la région à l'étude (CEHQ, 2013; 2015).

À l'échelle du bassin versant, Cochand (2014) note également une diminution de 4 à 8 % des niveaux piézométriques, provoqués par une recharge estivale moins importante dans les zones

de roc fracturé en haute altitude et dans les Basses-Terres du Saint-Laurent. L'étude note que les aquifères granulaires, situés dans les bas topographiques, semblent les plus sensibles.

4.3 PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES

De nombreuses études concluent que les changements climatiques auront un impact sur la fréquence et sur l'intensité des précipitations extrêmes (Trenberth, 1999; Emori et Brown, 2005; Allan et Soden, 2008). Le GIEC a d'ailleurs conclu qu'il est probable que la fréquence des fortes précipitations dans le monde ait déjà augmenté par rapport à 1950 (GIEC, 2013). Les précipitations extrêmes sont toutefois un phénomène difficile à caractériser. D'une part, les évènements dommageables pour les structures municipales et de transport (conduites, ponceaux, etc.) et susceptibles de provoquer des crues soudaines sont souvent des évènements convectifs locaux de courte durée (orages d'été localisés). Ces évènements sont difficiles à capter avec une station météorologique standard et sont difficiles à modéliser en raison de la résolution temporelle et spatiale requise (Huard, 2011; Mladjic *et al.*, 2011). D'autre part, le nombre de stations météorologiques en opération possédant l'équipement nécessaire pour mesurer les intensités de pluie à fine résolution temporelle (pas de temps de 5 minutes) a atteint un maximum dans les années 1980 et 1990, mais ce nombre a diminué depuis (Figure 12). C'est entre autre le cas à l'aéroport Jean-Lesage, où l'auget basculeur a été retiré en 1995 (Jarrett, P. de l'ECCC, communication personnelle).

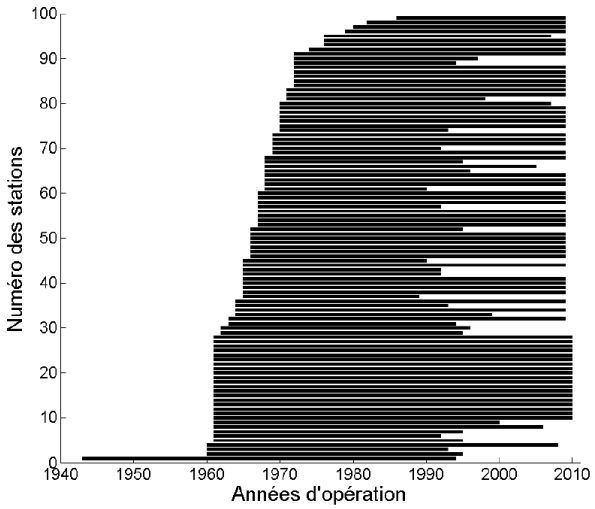


Figure 12. Années d'opération des 99 stations du Québec situées au sud du 49^{e} parallèle qui enregistrent des données horaires et/ou les maxima journaliers à divers pas de temps sous-quotidiens. Pour être retenues, les stations devaient compter au moins 15 ans de données. Noter que ce graphique n'inclut que les données disponibles publiquement (Mailhot et Talbot, 2011).

Afin de standardiser l'utilisation des précipitations extrêmes dans divers domaines, tel que l'ingénierie urbaine, ECCC procède régulièrement au calcul et à la mise à jour de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) à partir des données de précipitation mesurées à leurs stations (Hogg et Carr, 1985; Jarrett, 2010). Un processus similaire est parfois effectué à une échelle plus locale. L'IRDA, en collaboration avec le gouvernement du Québec et avec Ressources naturelles Canada, a par exemple récemment mandaté une mise à jour des courbes IDF pour le sud du Québec (Mailhot et Talbot, 2011).

Pour un pas de temps et une station donnée, une courbe IDF est créée en appliquant des lois statistiques (habituellement de type Gumbel ou GEV) sur les précipitations maximales annuelles de la série de données. Cela permet d'associer une période de retour aux différentes intensités de pluie. Cette analyse est répétée pour plusieurs pas de temps (généralement entre 5 minutes et 72 heures), ce qui permet d'obtenir un portrait complet des extrêmes probables. Les courbes IDF disponibles pour la zone à l'étude sont illustrées à l'Annexe D. La Figure D.2, par exemple, permet de savoir qu'il n'existe que 2 % de chances qu'il tombe 45.4 mm de pluie en une heure à l'aéroport Jean-Lesage pour une année donnée.

Malgré leur utilisation fréquente dans plusieurs domaines, les courbes IDF possèdent une lacune importante. Les lois statistiques utilisées pour calculer les périodes de retour supposent un système stationnaire, ce qui ignore potentiellement l'impact des changements climatiques sur les précipitations extrêmes. De nombreux travaux sont en cours pour explorer cette problématique.

4.3.1 CHANGEMENTS RÉCENTS AUX PLUIES EXTRÊMES

Depuis 2014, les courbes IDF produites par ECCC sont accompagnées d'une analyse des tendances (Annexe D). Ces résultats ont d'ailleurs fait l'objet d'une publication scientifique, où il a été déterminé qu'environ 5 % des stations du pays présentent une tendance statistiquement significative au niveau de leurs précipitations extrêmes pour la période 1965-2005 (Shephard *et al.*, 2014). L'étude note également qu'en favorisant une étude régionale plutôt que les données aux stations, il est possible de détecter que les deux-tiers des régions au Canada connaissent des tendances à l'accroissement de leurs quantités de pluie extrêmes, quoique non statistiquement significatives. Ces résultats sont illustrés à la Figure 13.

Des résultats similaires ont été obtenus par deux autres études, où l'analyse des données aux stations sur la période 1900-2003/2009 indique que même si le nombre de jours avec précipitations et la pluie annuelle totale ont augmenté depuis le début des années 1900, il n'est pas possible de détecter une augmentation statistiquement significative de l'intensité des

précipitations extrêmes (Vincent et Mekis, 2006; Mekis et Vincent, 2011). Pour l'instant, donc, il semble que la majorité des stations météorologiques présentent soit une tendance nulle, soit une tendance non statistiquement significative. Entre autre, cela est expliqué par la forte variabilité interannuelle de cet indicateur et les séries de données souvent courtes qui rendent difficile de sortir du « bruit » naturel (Klein Tank *et al.*, 2009; Shephard *et al.*, 2014). Il faut également noter que plusieurs stations ne sont plus actives depuis la fin des années 90 et que l'analyse est effectuée sur les années disponibles (1961-1995 à l'aéroport Jean-Lesage et 1967-1999 à la Forêt Montmorency).

Une étude récente a procédé à la mise à jour des courbes IDF pour le sud du Québec, en utilisant notamment la période 1967-2009 à la station Forêt Montmorency (Mailhot et Talbot, 2011). L'analyse des tendances a été effectuée en utilisant le test Mann-Kendal (Meylan *et al.*, 2008), également employé par Shephard *et al.* (2014), et il a été déterminé que 7 % des stations dans le sud du Québec présentent une tendance significative à un seuil de confiance de 95 %, un chiffre similaire à celui d'ECCC. Ce n'est toutefois pas le cas des stations Aéroport Jean-Lesage et Forêt Montmorency (Mailhot et Talbot, 2011).

Les courbes IDF à l'aéroport Jean-Lesage (1961-1995) et à la Forêt Montmorency (1967-1999 et 1967-2009) de même que l'analyse des tendances, sont illustrées à l'Annexe D.

4.3.2 CHANGEMENTS FUTURS AUX PLUIES EXTRÊMES

De par la nature des GCM et des MRC, l'étude des changements aux pluies extrêmes est limitée par la résolution spatiale et temporelle des modèles. À leur échelle (les modèles les plus précis possèdent une résolution de 12 à 15 km et un pas de temps de 15 minutes), certains processus tel que des orages intenses et très localisés ne peuvent être adéquatement représentés ou résolus. De plus, la valeur obtenue à un pixel sera toujours plus faible que la donnée à la station. Pour ces raisons, la plupart des études privilégient plutôt une analyse des pluies d'une durée de 12h et plus, qui sont mieux représentées par les modèles (Huard, 2011).

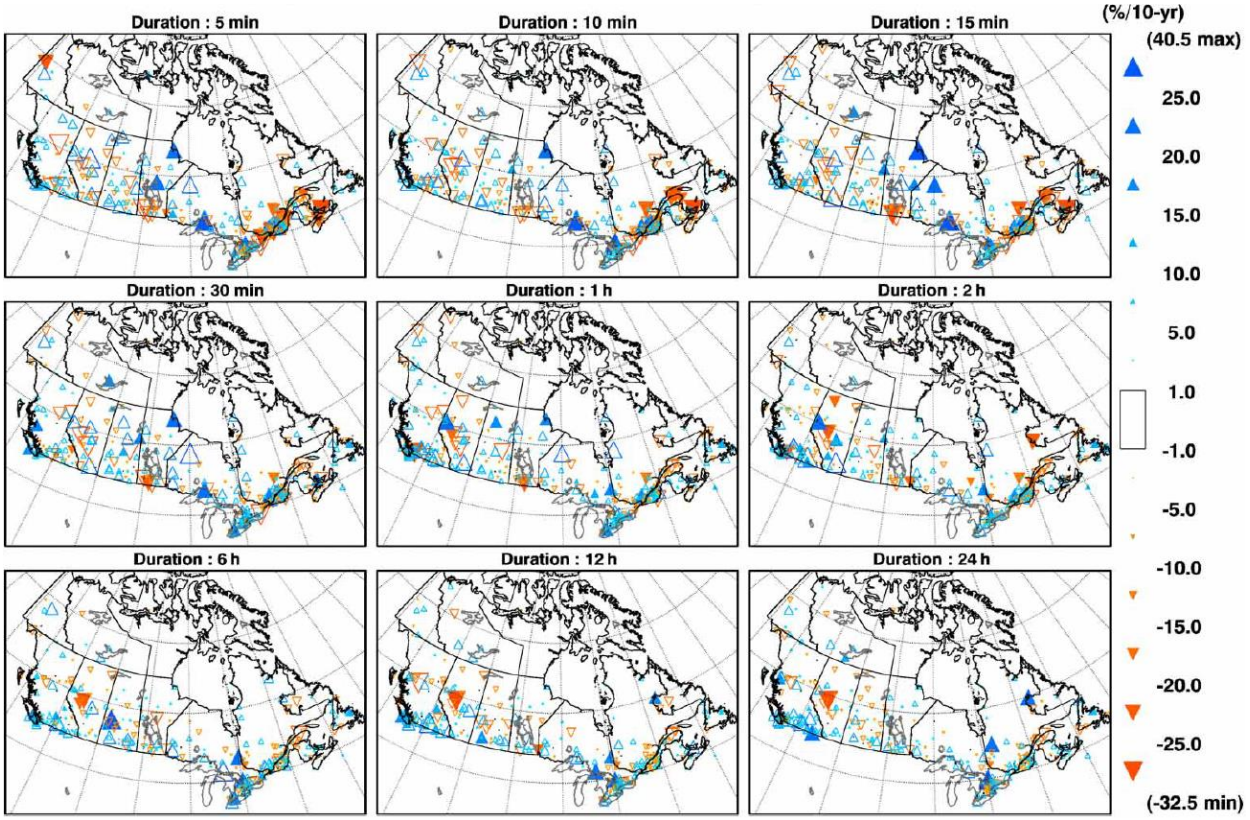


Figure 13. Tendances des pluies extrêmes aux stations météorologiques sur la période 1965-2005, où une station doit posséder au minimum 20 ans de données pour être considérée. Les tendances statistiquement significatives sont indiquées par un triangle plein (Shephard *et al.*, 2014).

Une étude récente a calculé une augmentation statistiquement significative des précipitations maximales 24h à l'horizon 2050, qui seront de 5 à 15 % plus intenses pour une période de retour de 2 ans et de 15 à 25 % plus intenses pour les périodes de retour de 10 et de 20 ans, dans la région de Québec (Mailhot *et al.*, 2011). Il s'agit de résultats cohérents avec plusieurs autres études, où il est généralement déterminé qu'une intensification de 2 à 20 % des précipitations extrêmes est attendue pour la vallée du Saint-Laurent à l'horizon 2050, selon la période de retour et la durée de l'évènement (Huard, 2011; Mladjic *et al.*, 2011). Ces résultats ont été obtenus en considérant le scénario d'émissions SRES A2 (Figure 9), qui suppose de fortes émissions futures (GIEC, 2007). Les résultats de Mailhot *et al.* (2011) et Mladjic *et al.* (2011) sont illustrés à la Figure 14 et à la Figure 15.

À Toronto, une autre étude a conclu à une augmentation de l'intensité maximale 24h de l'ordre de 11 à 22 % en 2050 (Wang *et al.*, 2014). Cette étude a procédé à une analyse à l'horizon 2030, où une intensification de 5 à 17 % est attendue. Il serait intéressant d'effectuer une analyse similaire pour la Ville de Québec.

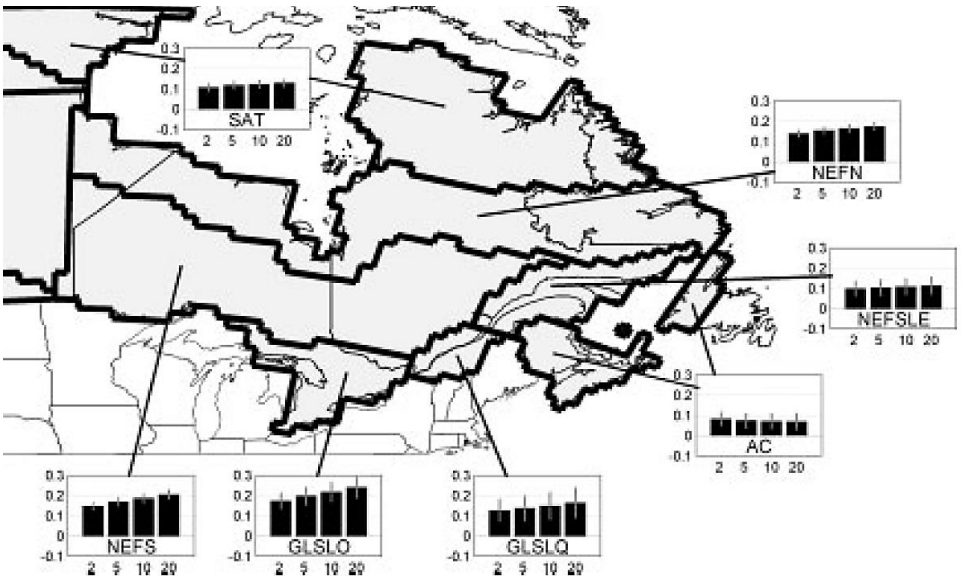


Figure 14. Changements projetés (%) aux précipitations maximales annuelles 24h (moyenne multi-modèles) entre l'horizon 2050 et la période de référence (pré-2000). L'histogramme indique la valeur de changement moyen (axe vertical), l'axe des x indique la période de retour et la barre verticale illustre un écart-type de variation (Mailhot *et al.*, 2011).

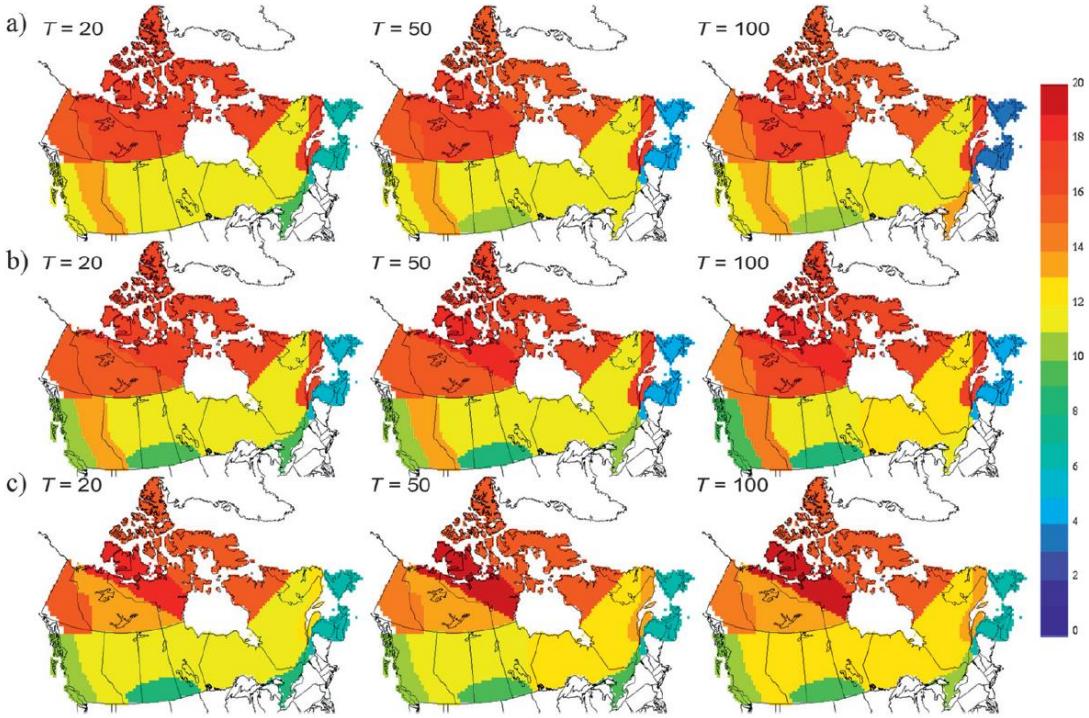


Figure 15. Changements prévus (%) aux précipitations extrêmes (a) 24h (b) 72h et (c) 7 jours à l'horizon 2050, par rapport à la période 1961-1990. La période de retour étudiée est de (gauche) 20 ans (milieu) 50 ans et (droite) 100 ans (Mladjic *et al.*, 2010).

4.4 AUTRES ASPECTS DE LA RESSOURCE EN EAU

4.4.1 URBANISATION DU TERRITOIRE

L'ampleur de l'impact de l'urbanisation d'un territoire, lorsque comparé à l'impact des changements climatiques, est dépendant de la localisation et de l'occupation actuelle du territoire. Compte-tenu de la croissance démographique rapide dans le bassin versant du lac Saint-Charles et la construction de plusieurs nouveaux quartiers dans des zones de contraintes naturelles (40 % des nouveaux bâtiments construits entre 2000 et 2006 se trouvent dans des pentes de 25 % et plus, dans une plaine inondable 0-20 ans, dans la bande de protection riveraine de 20 m autour des cours d'eau et/ou dans un milieu humide), il serait pertinent de procéder à une évaluation conjointe de l'impact de l'urbanisation du territoire et des changements climatiques (Roche, 2010).

Pour l'instant, seule l'étude de Cochand (2014) effectue une analyse semblable. Les différents scénarios d'urbanisation utilisés proviennent du document « Scénarios d'aménagement, des pistes de réflexion pour bâtir 2031 » de la CMQ et extrapolés pour 2080 (CMQ, 2006). Il est conclu que d'un point de vue annuel, l'urbanisation n'a qu'un faible impact sur la recharge des aquifères par rapport à l'impact des changements climatiques (de l'ordre de 5 % annuellement). Toutefois, le ruissellement additionnel dû à l'augmentation des surfaces imperméables pourrait accentuer les pointes de crues de 10 à 15 %, indépendamment de la période de l'année (Cochand, 2014).

4.4.2 QUALITÉ DE L'EAU

La qualité de l'eau du lac Saint-Charles, bien qu'essentielle à la question d'alimentation en eau potable future, ne constitue pas l'un des objectifs de recherche actuels. Il est toutefois utile de noter que les variations anticipées sur les températures et les précipitations peuvent affecter la qualité des plans d'eau (Magnuson *et al.*, 2000). D'une part, des étiages plus sévères peuvent diminuer la dilution (soit, augmenter la concentration) des polluants dans les cours d'eau, tandis que la baisse du niveau d'eau peut entraîner une hausse des températures de l'eau et favoriser la prolifération de différentes plantes et micro-organismes. D'autre part, des pluies plus intenses ou plus fréquentes peuvent augmenter le taux d'érosion des sols et augmenter l'apport de matières en suspension et de polluants (Bouchard Valentine, 2004; GIEC, 2007; Bird *et al.*, 2009; APEL, 2014).

Le lac demeure tout de même relativement bien protégé contre l'eutrophisation, en raison de l'important pourcentage de couvert forestier au nord du bassin, de la profondeur élevée du réservoir nord du lac et du taux de renouvellement élevé de l'eau dans le lac. D'ailleurs, en raison de la fonction principale du lac, le temps de résidence moyen du lac est très court, soit 22.7 jours pour le réservoir nord et 7.6 jours au sud. L'eau du lac est ainsi renouvelée complètement environ 16 fois par année. Ces aspects ne le protègent pas totalement, toutefois, puisque l'apparition de fleurs d'eau de cyanobactéries est récurrente depuis 2006. Pour l'instant, toutefois, la qualité de l'eau brute au niveau de la prise d'eau satisfait aux exigences de la règlementation (APEL, 2009; 2014; Roche, 2014).

Une étude complète de l'impact des changements climatiques sur la qualité de l'eau du lac Saint-Charles demanderait une évaluation des systèmes d'égouts actuels et futurs, ainsi que la production de scénarios de développement urbain associés à diverses réglementations possibles. Une telle étude se situe en-dehors du cadre actuel de recherche sur la ressource en eau des rivières Saint-Charles et Montmorency.

5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Objectif 1 : Inventaire des données disponibles

Dans le cadre de l'étude, les données d'observation disponibles sur les bassins versants des rivières Saint-Charles et Montmorency ont été répertoriées. En général, il peut être conclu que la couverture météorologique est typique des bassins versants québécois. Les stations météorologiques sont principalement situées dans les environs de la Ville de Québec, avec une seule station au nord du bassin versant.

Les stations hydrométriques localisées à l'embouchure des rivières Saint-Charles et Montmorency possèdent de longues séries de données, mais les autres stations du bassin ne sont en opération que depuis une dizaine d'années. Quant aux eaux souterraines, les études de Lamarche (2011) et du PACES (Talbot Poulin *et al.*, 2013) constituent des outils très utiles à la caractérisation des sols et des aquifères. Déjà, il a été démontré dans deux études que cette information peut être utilisée dans le cadre d'une modélisation hydrogéologique (Cochand, 2014; Graf, 2015).

Au cours de cette étude, il a été remarqué que l'ensemble des données disponibles ne sont pas toujours utilisées par les divers groupes de recherche. C'est notamment le cas lors de l'analyse des précipitations extrêmes par ECCC, où une période restreinte (1967-1999) est utilisée à la station Forêt Montmorency. D'une manière similaire à l'étude de Mailhot et Talbot (2011), il pourrait être pertinent d'effectuer une mise à jour de ces études avec la totalité des données disponibles sur le territoire. Cette information serait utile pour la rivière Montmorency dont les forts débits peuvent endommager la structure d'approvisionnement.

De plus, la DEH a récemment procédé à la reconstitution des apports au lac Saint-Charles depuis 2013 pour le compte de la Ville de Québec. Compte-tenu du court historique des stations hydrométriques sur les rivières Nelson et des Hurons et de la faible représentativité spatiale des stations météorologiques, ce type d'information pourrait s'avérer très utile au calage de modèles hydrologiques. Avant de procéder à un exercice similaire pour un historique plus long, il faudrait toutefois s'assurer de l'existence d'archives sur les données d'ouverture et de configuration des vannes, de même que sur les niveaux en amont et en aval du barrage Cyrille-Delage.

Objectif 2 : Modèles hydrologiques, études et changements climatiques

Parmi les études répertoriées, seules quelques-unes ont procédé à une analyse de l'impact des changements climatiques sur la ressource en eau des rivières Saint-Charles et Montmorency. Premièrement, s'il peut être noté que le manque de données spatialement distribuées est une entrave à la modélisation des bassins, il s'agit également d'un problème courant au Québec qui peut être contourné, entre autres, par l'utilisation de données interpolées sur grille telles que produites par RNCan et le MDDELCC. La présence du barrage Cyrille-Delage et de la prise d'eau de Château-d'Eau pose un défi similaire.

Un fort consensus existe entre les modèles quant à l'impact des changements climatiques sur les débits moyens et sur les étiages. Ainsi, aux horizons 2050 et 2080, on peut s'attendre à une diminution des débits moyens en été de l'ordre de 20 % en moyenne, accompagnée d'une baisse des niveaux piézométriques. Les étiages risquent également d'être plus sévères, avec des débits minimums de 1 à 50 % plus faibles en été par rapport à la période de référence (1971-2000). Par contre, un changement de -5 à +130 % des débits moyens est prévu en février, un mois actuellement problématique en raison des faibles débits. Dans tous ces cas, la confiance sur la direction du changement est élevée ou très élevée. Pour les crues printanières et estivales, l'impact des changements climatiques demeure incertain.

D'autres études, qui portent sur l'évolution des précipitations extrêmes, pointent également vers une intensification des précipitations maximales 24h de l'ordre de 5 à 25 % à l'horizon 2050. Pour l'instant, en raison de la résolution spatiale et temporelle des modèles de circulation globale et des modèles régionaux de climat, il n'est pas possible d'analyser l'impact des changements climatiques sur les précipitations d'une durée de moins de 6 à 12h. L'analyse des orages violents demeure donc difficile, surtout lorsque l'on considère que moins d'observations existent. Les analyses récentes, toutefois, concluent que le signal de changement des précipitations extrêmes, pour l'instant, demeure à l'intérieur de la variabilité naturelle de cet indicateur.

Afin de pouvoir répondre aux questionnements de la CMQ, à savoir si des problèmes d'approvisionnement en eau potable pourraient survenir d'ici 15 à 20 ans, il est recommandé d'effectuer des analyses similaires à celles faites par la DEH (CEHQ, 2013; 2015) et l'Université Laval (Cochand, 2014), mais aux horizons 2020 et 2030 plutôt que 2050 et 2080. Plusieurs modèles hydrologiques ont été recensés lors de l'étude et pourraient être utilisés à cette fin. Même si le risque de se retrouver dans le bruit naturel du climat est plus élevé, cette information demeurerait pertinente pour les décideurs.

6 RÉFÉRENCES

Allan, R.P., Soden, B.J. (2008). Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes. *Science*, 321(5895), p. 1481-1484.

APEL (2009). Étude limnologique du haut-bassin de la rivière Saint-Charles. *Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord*, Québec, 354 pp.

APEL (2014). Diagnose du lac Saint-Charles. *Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord*, 519 pp.

Arnold, J.G., Fohrer, N. (2005). SWAT 2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes*, 19(3), p. 563-572.

ASCE (2000). Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), p. 115-123.

Bergeron, O. (2016). Guide d'utilisation 2016 - Grilles climatiques quotidiennes du Programme de surveillance du climat du Québec, version 1.2. *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-74872-4 (PDF), 33 p.

Bird, D., Pannard, A., Prairie, Y., Chevalier, P. (2009). Changements climatiques au Québec méridional, Conséquences des changements climatiques sur le comportement de la prolifération des cyanobactéries au Québec. *Institut national de la santé publique du Québec*, 12 pp.

Bouchard Valentine, M. (2004). Floraisons de cyanobactéries au lac Saint-Augustin : dynamique à court terme et stratification. Mémoire de maîtrise, *Université Laval*, 140 pp.

Bourgeois, G., Therrien, J., Mercier, J.F., McNeil, E., Boudreault, A. (1998). Étude d'optimisation de la gestion de l'eau de la rivière Saint-Charles. Présenté à la Ville de Québec par le groupe conseil Génivar, 112 pp. + annexes.

Brodeur, C., Lewis, F., Huet-Alegre, E., Ksouri, Y., Leclerc, M.C., Viens, D. (2009). Portrait du bassin de la rivière Saint-Charles, 2e édition. *Conseil de bassin de la rivière Saint-Charles*. 216 pp. + annexes

Brodeur, C., Brassard, D., Dionne, N., Laberge, R., Labrecque, R., Trépanier, J., Turmel, P. (2012). Portrait des bassins versants de la Capitale. *Organisme des bassins versants de la Capitale*. Publié en mars 2012 – révision en continu.

Centre d'expertise hydrique du Québec (2013). Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*, 51 pp.

Centre d'expertise hydrique du Québec (2014). Plateforme de modélisation hydrologique du Québec méridional. Rapport technique, Québec, 20 pp. + annexes.

Centre d'expertise hydrique du Québec (2015). Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*, 81 pp.

CMQ (2006). Scénarios d'aménagement, des pistes de réflexion pour bâtir 2031. *Communauté métropolitaine de Québec*, 6 pp.

Cochand, F. (2014). Impact des changements climatiques et du développement urbain sur les ressources en eaux du bassin versant de la rivière Saint-Charles. Thèse de doctorat. *Université Laval*, 213 pp.

Emori, S., Brown, S.J. (2005), Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate. *Geophysical Research Letters*, 32, L17706.

Fortin, J., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., Villeneuve, J.-P. (2001). A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part I: Description of the model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 6(2), p. 91-99.

Gaborit, E., Pelletier, G., Vanrolleghem, P.A., Anctil, F. (2010). Simulation du débit de la rivière Saint-Charles, première source d'eau de la ville de Québec. *Revue canadienne de génie civil*, 37, p. 311-321.

Gerardin, V., Lachance, Y. (1997). Vers une gestion intégrée des bassins versants. Atlas du cadre écologique de référence du bassin versant de la rivière Saint-Charles, Québec, Canada. *Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec – Ministère de l'Environnement du Canada*, 58 pp.

Geza, M., McCray, J.E. (2008). Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management*, 88(3), p. 393–406.

GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, *GIEC*, Genève, Suisse. 103 pp.

GIEC (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*, Cambridge, 1552 pp.

Goderniaux, P., Brouyère, S., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Therrien, R., Orban P., Dassargues, A. (2009). Large scale surface–subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology*, 373(1-2), p. 122-138.

Graf, T. (2015). Physically-based Assessment of Intrinsic Groundwater Resource Vulnerability. Thèse de doctorat. *Université Laval*, 209 pp.

Hogg, W.D., Carr, D.A. (1985). Rainfall Frequency Atlas for Canada/Atlas de la fréquence des pluies au Canada, *Programme climatologique canadien*, Ministère des Approvisionnements et Services Canada, 17 p. + 6 annexes.

Huard, D. (2011). Extrêmes de précipitations en climat futur sur les régions agricoles du Québec. *Ouranos*, Rapport final du Volet Scénarios climatiques, 55 pp.

Huntington, T.G. (2006). Evidence for intensification of the global watercycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319, p. 83-95.

Hutchinson, M. F., McKenney, D.W., Lawrence, K., Pedlar, J.H., Hopkinson, R.F., Milewska, E., Papadopol, P. (2009). Development and testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum-Maximum Temperature and Precipitation for 1961-2003. *American Meteorological Society*, p. 725-741.

Institut de la statistique du Québec (2014). Évolution démographique des 10 principales villes du Québec (sur la base de 2011) selon leurs limites territoriales actuelles. *Site web*. Mise à jour le 6 mai 2014.

Jarrett P. (2010). IDF Curves: Current Status and Plans for the Future. *Journée-conférence de l'Association canadienne des ressources hydriques (ACRH)*, 6 mai 2010, Hôtel Holiday Inn Midtown, rue Sherbrooke, Montréal (Québec).

Klein Tank, A.M.G., Zwiers, F.W., Zhang, X. (2009). Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. *WMO-TD* , 1500, 52 pp.

Knutti, R. et Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3, p. 369-373.

Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Jimenez. B., Miller, K., Oki, T., Sen Z., Shiklomanov, I. (2008). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Science Journal*, 53(1), p. 3-10.

Lamarche, L. (2011). Évolution paléoenvironnementale de la dynamique quaternaire dans la région de Québec : application en modélisation tridimensionnelle et hydrogéologique. Thèse de doctorat. *INRS-ETE*, 147 pp. + annexes.

Li, Q., Unger, A.J.A., Sudicky, E.A., Kassenaar, D., Wexler, E.J., Shikaze, S. (2008). Simulating the multiseasonal response of a large-scale watershed with a 3D physically-based hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), p. 317-336.

Magnuson, J.J., Robertson, D.M., Benson, B.J., Wynne, R.H., Livingstone, D.M., Arai, T., Assel, R.A., Barry, R.G., Card, V., Kuusisto, E., Granin, N.G., Prowse, T.D., Stewart, K.M., Vuglinski. V.S. (2000). Historical trends in lake and river ice cover in the Northern Hemisphere, *Science*, 289, p. 1743-1746.

Mailhot, A., Beauregard, I., Talbot, G., Caya, D., Biner, S. (2011). Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *International Journal of Climatology*, 32(8), p. 1151-1163.

Mailhot A., Talbot G. (2011). Mise à jour des estimateurs Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et Hauteur-Durée-Fréquence (HDF) pour le sud-Québec, Tome I – Données et méthodes. Rapport de recherche No R-1259, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, 60 p.

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

Mekis, E., Vincent, L.A. (2011). An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation Dataset for Trend Analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 49(2), p. 163-177.

Meylan P., Favre, A.-C., Musy, A. (2008). Hydrologie fréquentielle. Une science prédictive. *Presses Polytechniques et universitaires romandes*, 174 pp.

Mladjic, B., Sushama, L., Khaliq, M.N., Laprise, R., Caya, D., Roy, R. (2011). Canadian RCM Projected Changes to Extreme Precipitation Characteristics over Canada. *Journal of Climate*, 24, 2565-2584.

Moon, J., Srinivasan, R., Jacobs, J.H. (2004). Stream flow estimation using spatially distributed rainfall in the Trinity river basin, Texas. *American Society of Agricultural Engineers*, 47(5), p. 1445-1451.

OBV Charlevoix-Montmorency (2014). Plan directeur de l'eau de la zone hydrique Charlevoix-Montmorency. Chapitre 2 – Bassin versant de la rivière Montmorency. *Organisme des bassins versants Charlevoix Montmorency*. Présenté au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 903 pp.

Ouranos (2015). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2015. Montréal, Québec, 114 p.

Perrin, C. (2002). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. *Houille Blanche*, 6/7(6-7), p. 84-91.

Poirier, C., Fortier Filion, T.-C., Turcotte, R. Lacombe, P. (2014). Reconstitution historique des apports verticaux (eaux de fonte et de pluie) de 1900 à 2010 – version 2012. *Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES)*, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique, CEHQ, ISBN 978-2-550-71155-1, 99 pp.

Quilbé, R., Rousseau, A.N., Moquet, J.S., Savary, S., Ricard, S., Garbouj, M.S. (2008). Hydrological response of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, p. 101-110.

Ricard, S., Bourdillon, R., Roussel, D., Turcotte, R. (2013). Global calibration of distributed hydrological models for large-scale applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(6), p. 719-721.

Roche (2010). État de la situation du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles. *Roche ltée, Groupe-conseil*. Présenté à la Communauté métropolitaine de Québec, 221 pp. + cartes et annexes.

Roche (2014). État de la situation du bassin versant de la prise d'eau de la rivière Saint-Charles. *Roche ltée, Groupe-conseil*. Présenté à la Communauté métropolitaine de Québec, 58 pp. + cartes et annexes.

Rousseau, A.N., Savary, S., Konan, B. (2008). Implantation du modèle HYDROTEL sur le bassin de la rivière Montmorency afin de simuler les débits observés et de produire des scénarios de crues du printemps pour l'année 2008. Présenté à la Ville de Québec par l'INRS-ETE, 54 pp.

Rousseau, A.N., Savary, S., Royer, A. (2010). Étude de risques de contamination de la prise d'eau de Château-d'Eau, bassin versant de la rivière Saint-Charles, Ville de Québec. Présenté à la Ville de Québec par l'INRS-ETE, 118 pp.

Rousseau, A.N., Savary, S., Foulon, E., Royer, A. (2014). Évaluation des apports des rivières Lorette et du Berger à la contamination bactériologique de la rivière Saint-Charles. Présenté à la Ville de Québec par l'INRS-ETE, 174 pp.

Salou, B.I.G. (2009). Estimation des apports au lac Saint-Charles à l'aide du modèle hydrologique SWAT. Mémoire de maîtrise sous la supervision de Geneviève Pelletier et François Anctil. *Université Laval*, 64 pp.

Savary, S., Rousseau, A.N., Quilbé, R. (2009). Assessing the effects of historical land cover changes on runoff and low flows using remote sensing and hydrological modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(6), p. 575-587.

Schroeder, P.R., Aziz, N.M., Lloyd, C.M., Zappi, P.A. (1994). The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model: User's guide for version 3. *EPA/600/R-94/168a*, *US. Environmental Protection Agency Office of Research and Development*, Washington, DC., 83 pp. + annexes.

Shephard, M.W., Mekis, E., Morris, R.J., Feng, Y., Zhang, X., Kilcup, K., Fleetwood, R. (2014). Trends in Canadian Short-Duration Extreme Rainfall: Including an Intensity-Duration-Frequency Perspective. *Atmosphere-Ocean*, 52(5), p. 398-417.

Talbot Poulin, M.C., Comeau, G., Tremblay, Y., Therrien, R., Nadeau, M.M., Lemieux, J.M., Molson, J., Fortier, R., Therrien, P., Lamarche, L., Donati-Daoust, F., Bérubé, S. (2013). Projet d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, Rapport final. *Département de géologie et de génie géologique, Université Laval*, 172 pp + cartes et annexes.

Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), p. 485-498.

Therrien, R., McLaren, R.G., Sudicky, E.A. et Panday, S.M. (2005). HydroGeoSphere. A three-dimensional numerical model describing fully-integrated subsurface and surface flow and solute transport. 343 pp.

Trenberth, K.E. (1999). Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change*, 42, p. 327-339.

Vincent, L.A., Mekis, E. (2006) Changes in Daily and Extreme Temperature and Precipitation Indices for Canada over the Twentieth Century. *Atmosphere-Ocean*, 44(2), p. 177-193.

ANNEXE A. NORMALES CLIMATIQUES

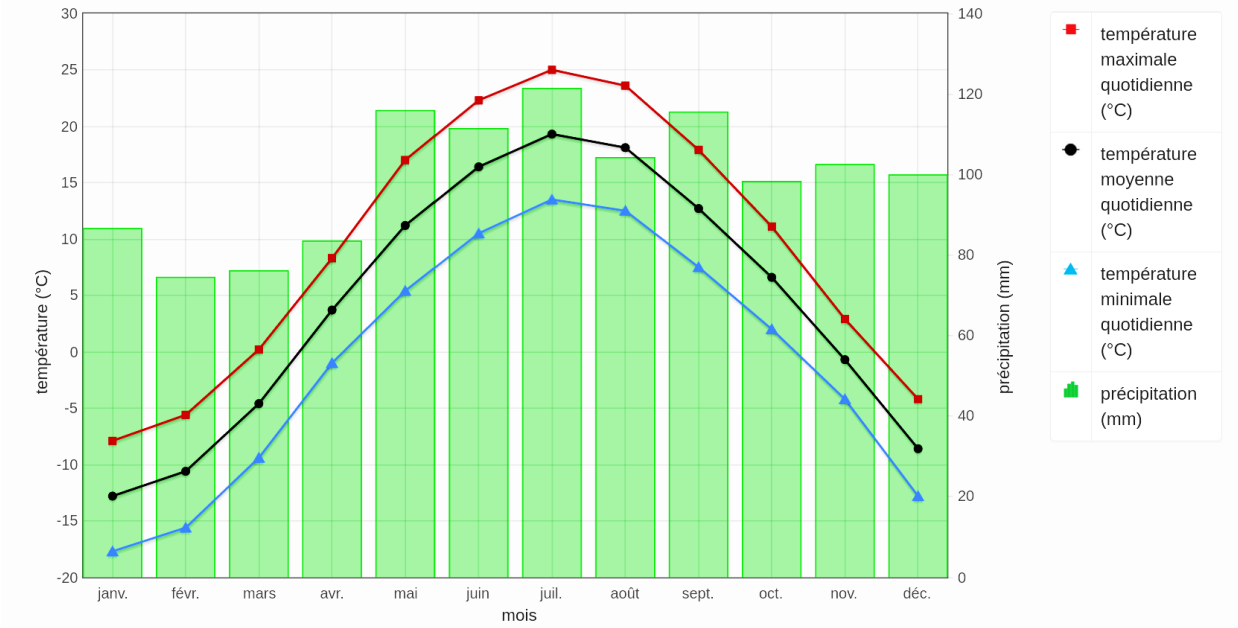


Figure A.1. Normales climatiques de 1981 à 2010 à la Station Aéroport Jean-Lesage (ECCC)

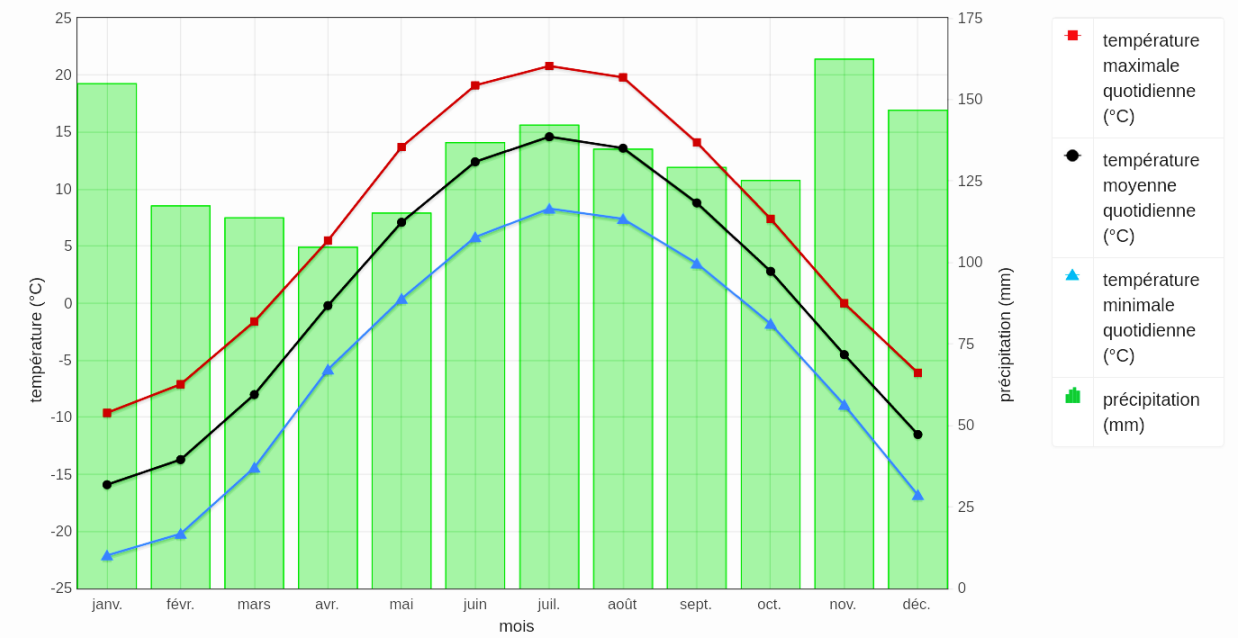


Figure A.2. Normales climatiques de 1981 à 2010 à la Station Forêt Montmorency (ECCC)

ANNEXE B. MODÈLES HYDROLOGIQUES

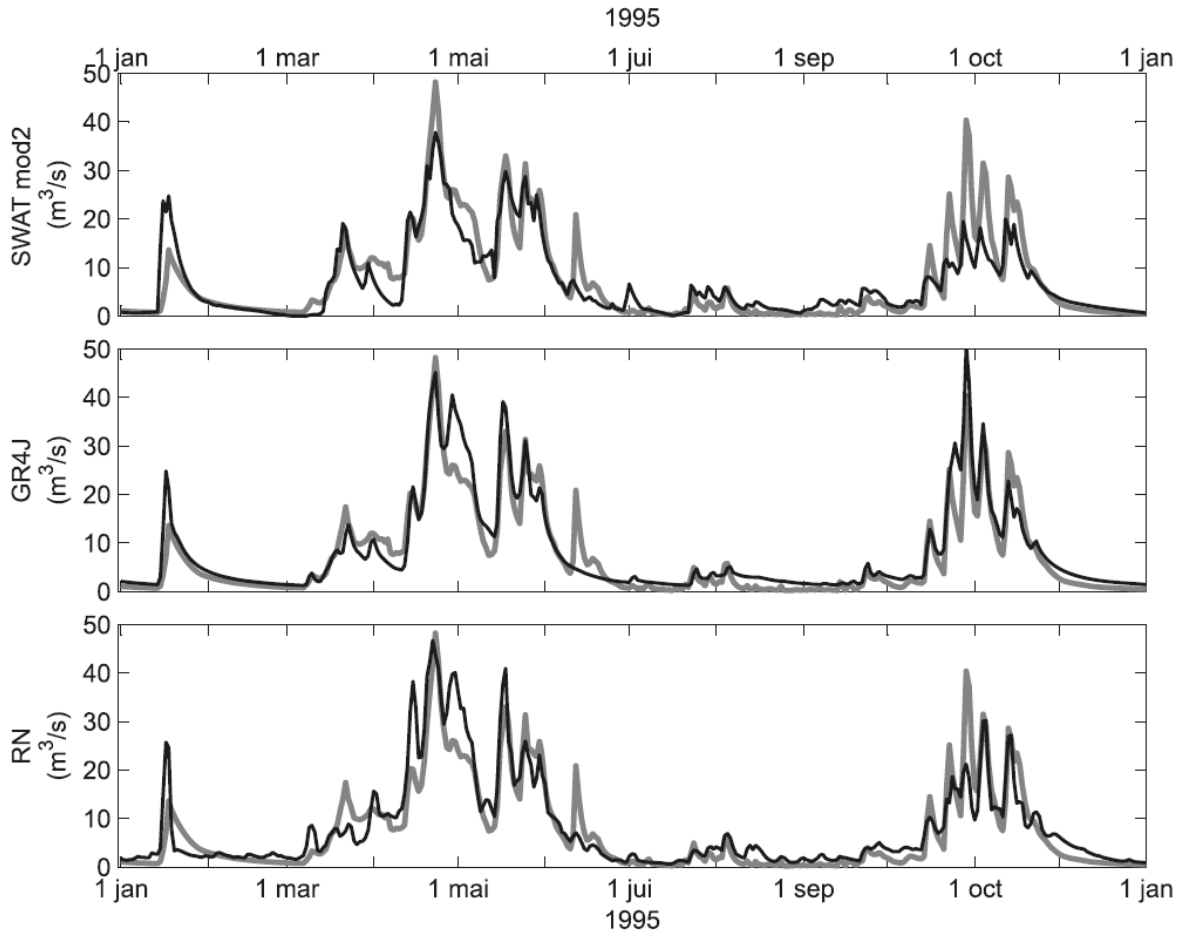


Figure B.1. Hydrogrammes simulés (noir) et observés (gris) avec les modèles SWAT, GR4J et le réseau de neurones pour la dernière année de la période de calage, illustrant la performance similaire d'un modèle complexe (SWAT) et des modèles simples (GR4J et RN) sur le bassin versant à l'étude (Gaborit *et al.*, 2010).

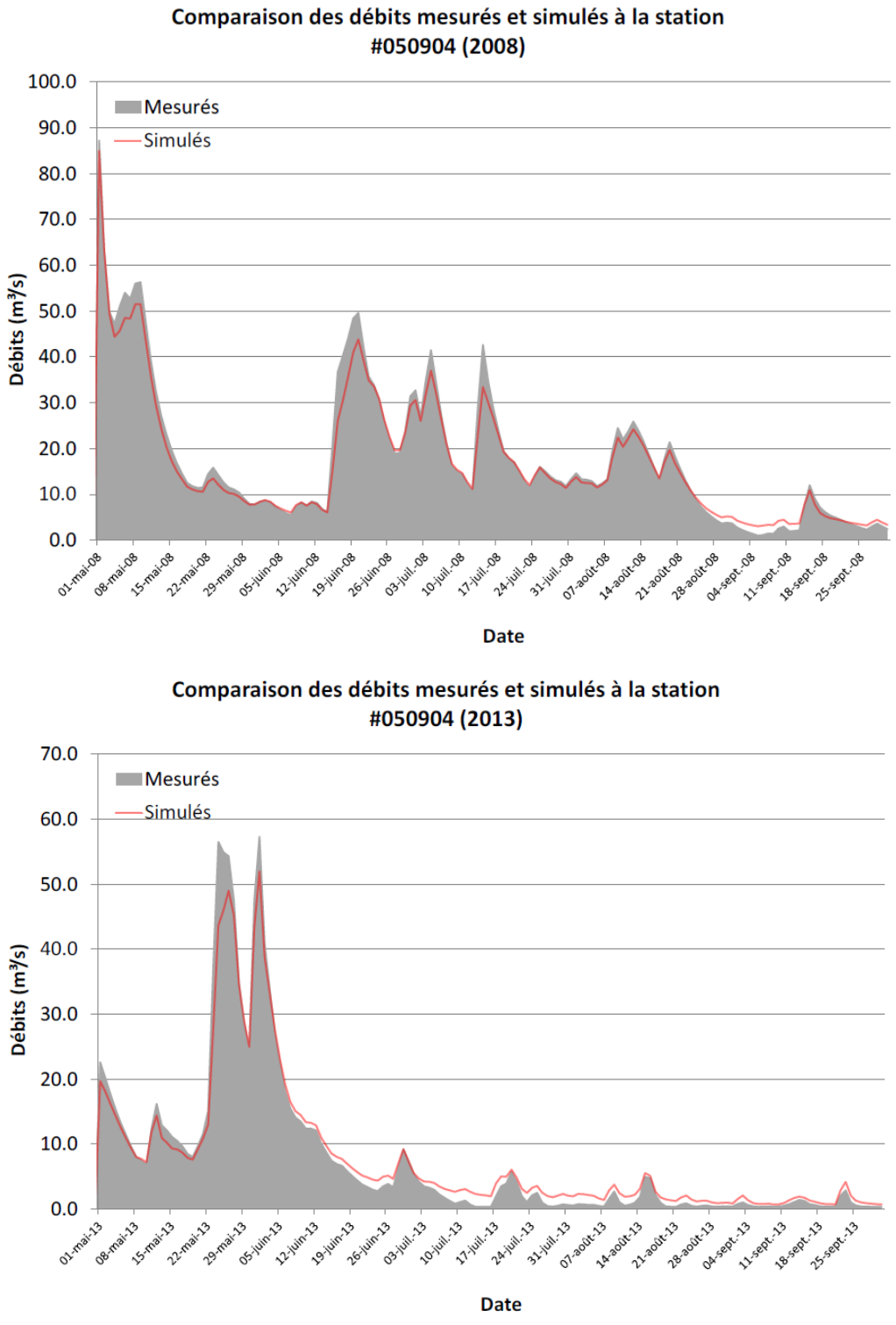


Figure B.2. Hydrogrammes simulés et observés à la station hydrométrique de la rivière Saint-Charles avec le modèle HYDROTEL (Rousseau *et al.*, 2014).

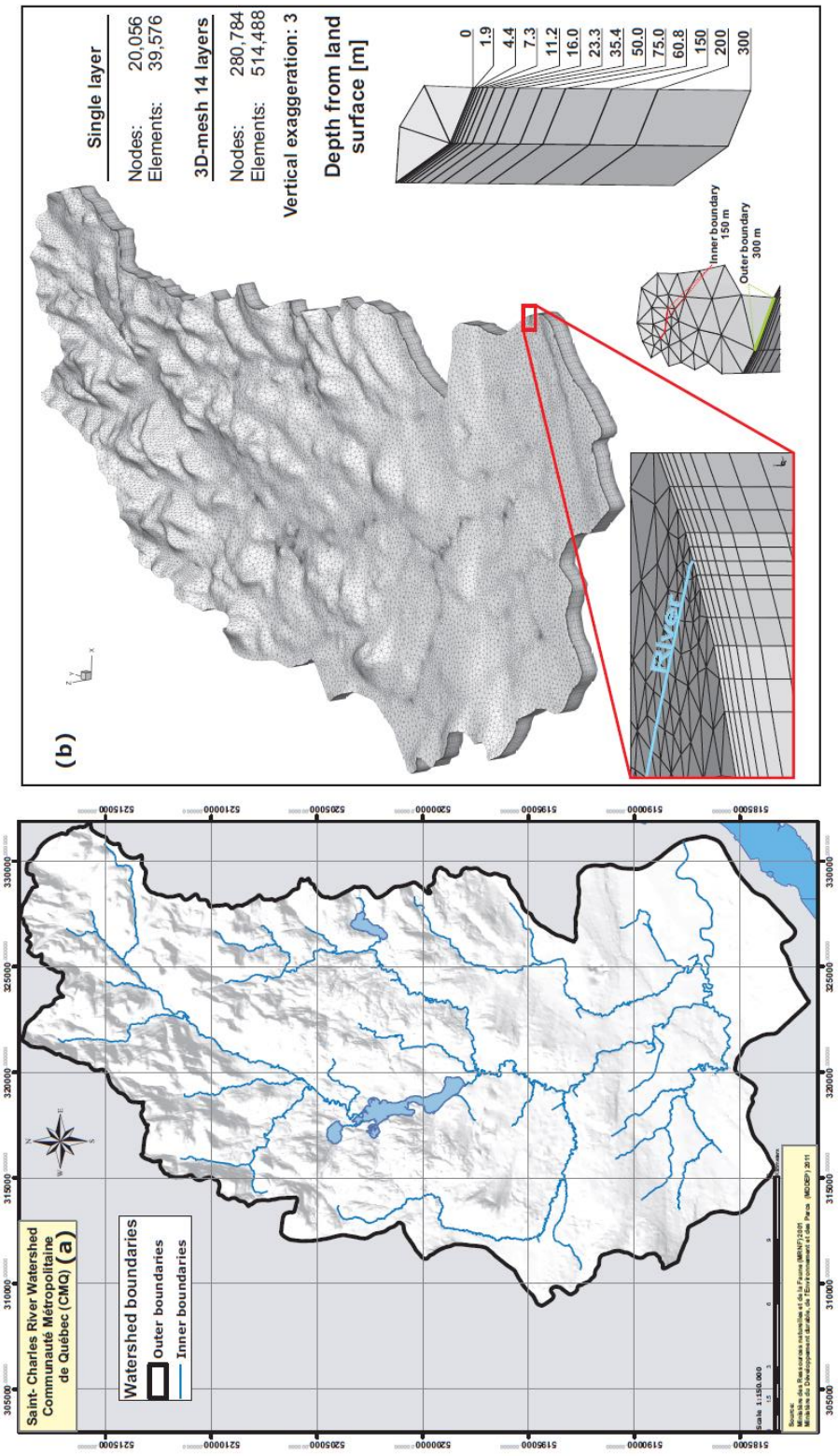


Figure B.3. Modèle HydroGeoSphere du bassin versant de la rivière Saint-Charles. L'illustration provint de Graf (2015), mais est valable pour le modèle de Cochand (2014).

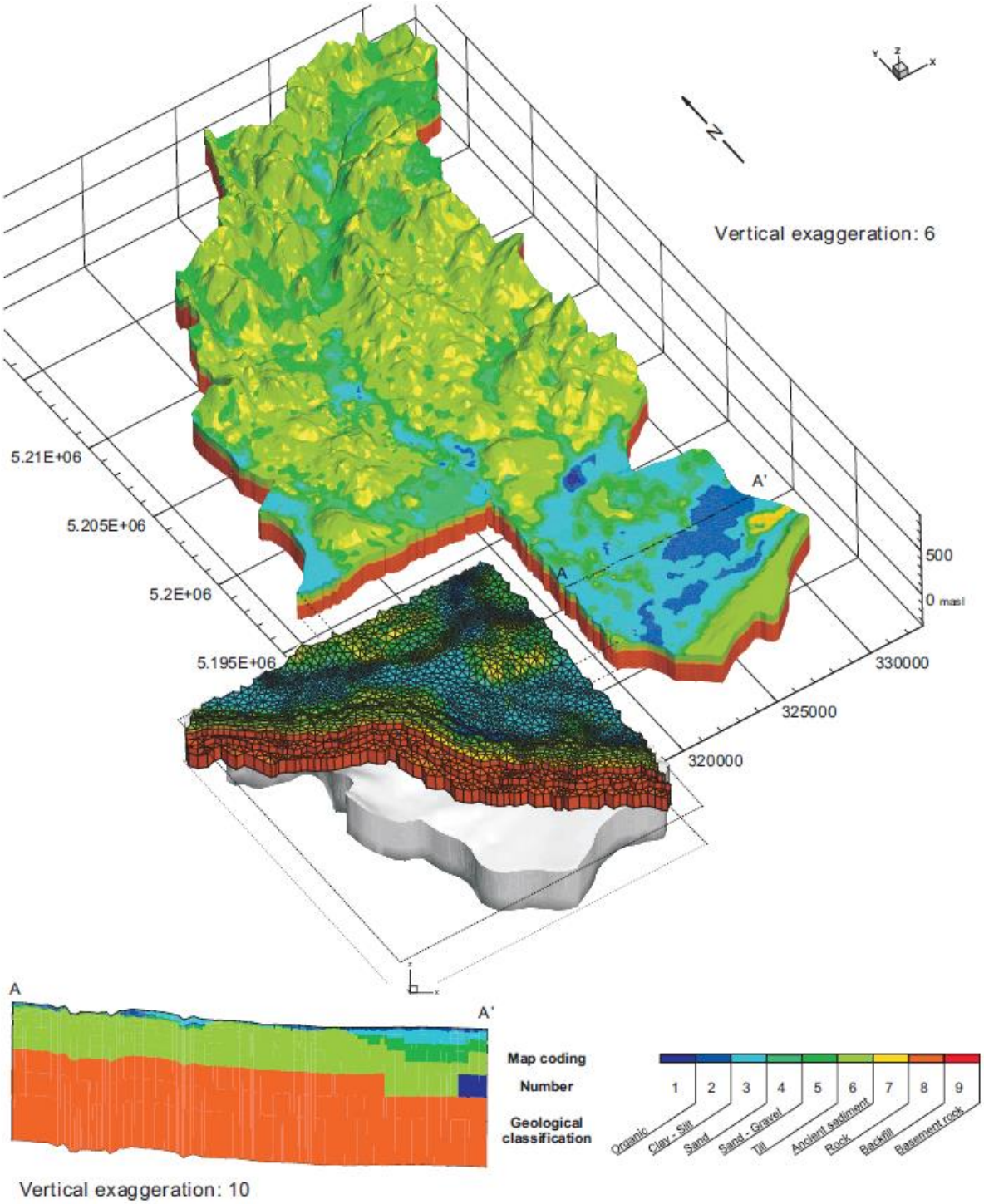


Figure B.4. Intégration des types de sol du modèle de Lamarche (2011) au modèle HydroGeoSphere. L'illustration provint de Graf (2015), mais est valable pour le modèle de Cochand (2014).

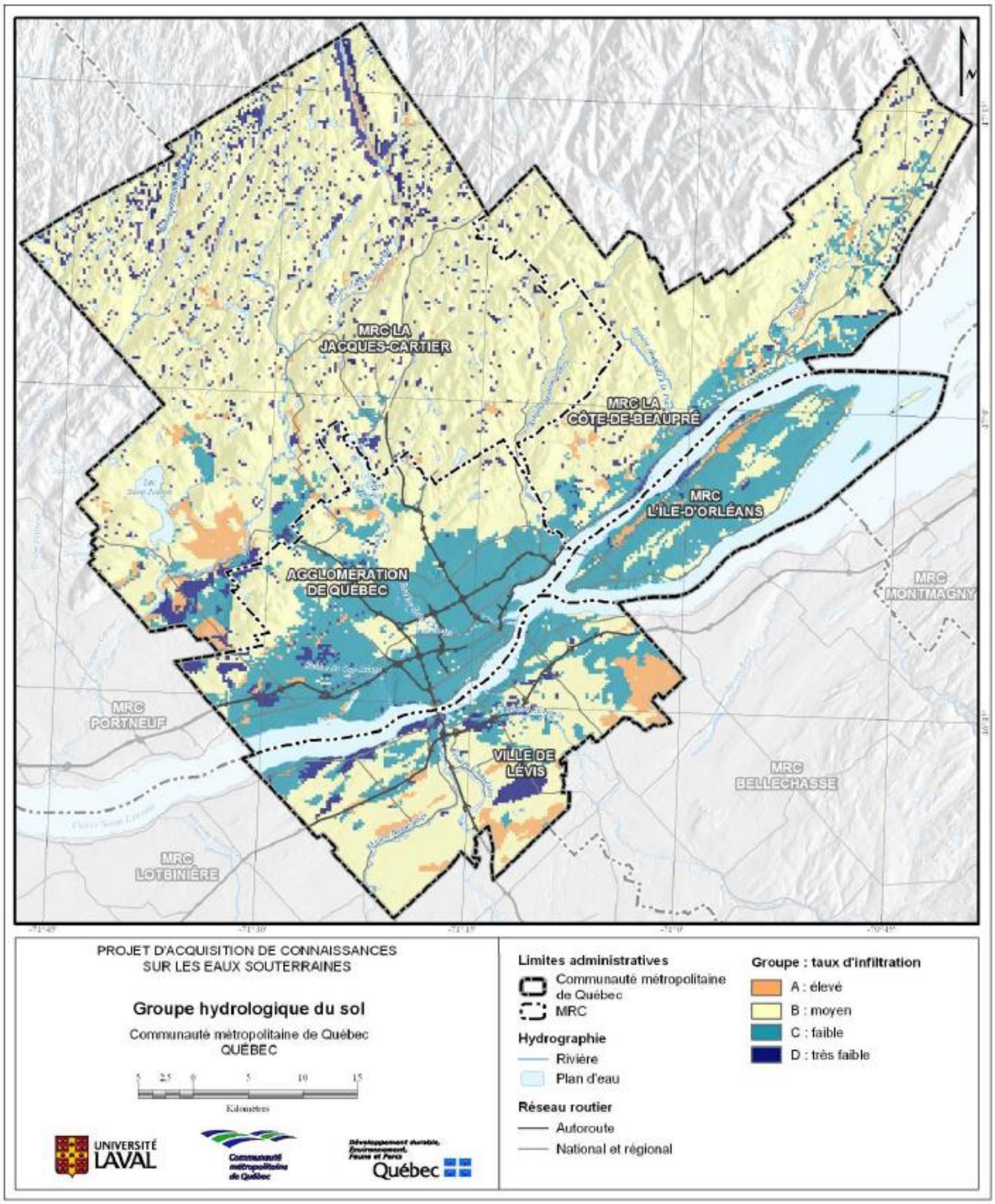


Figure B.5. Taux d'infiltration des sols selon le modèle HELP (Talbot Poulin *et al.*, 2013).

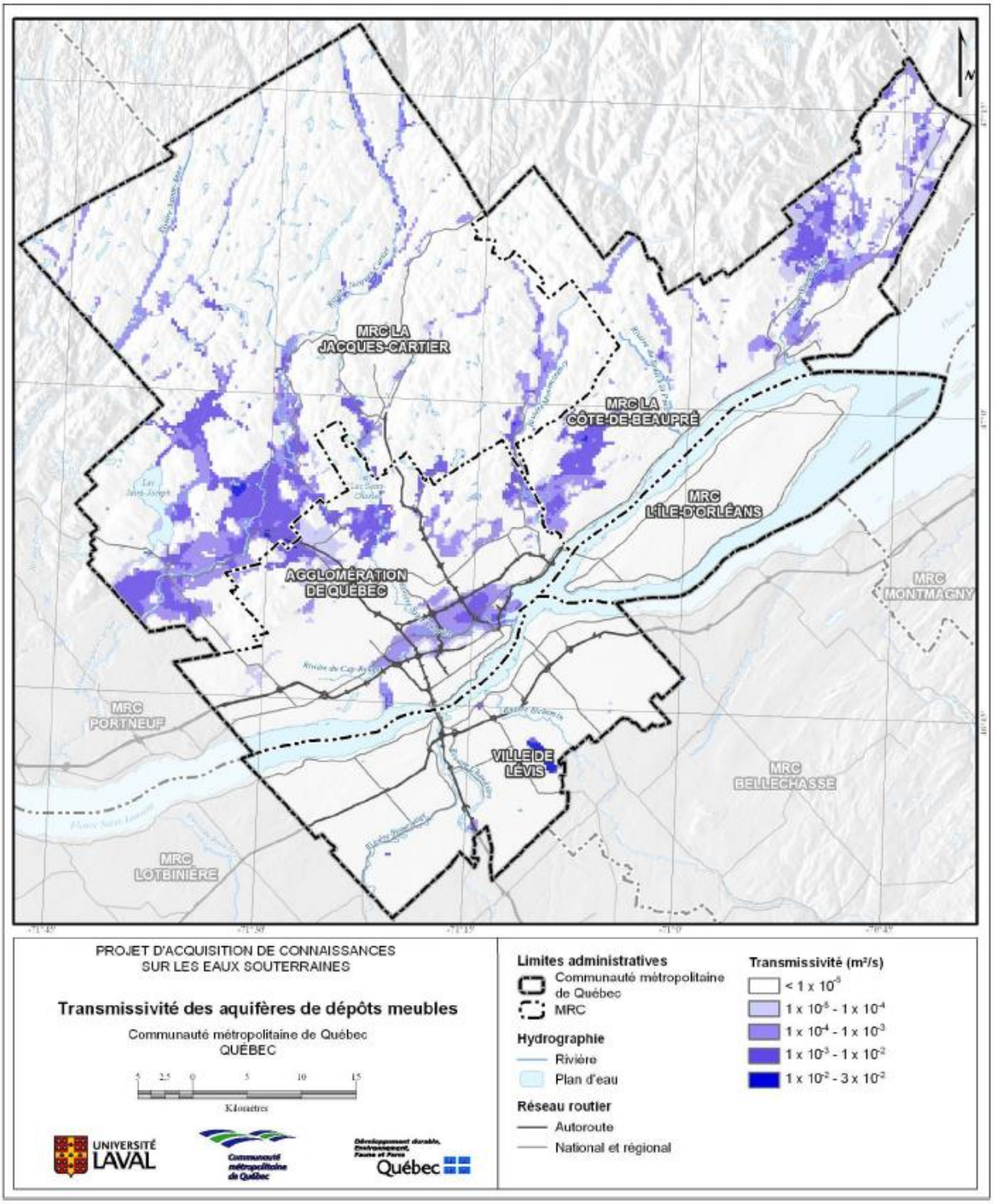


Figure B.6. Transmissivité des aquifères de dépôts meubles selon le modèle HELP (Talbot Poulin *et al.*, 2013).

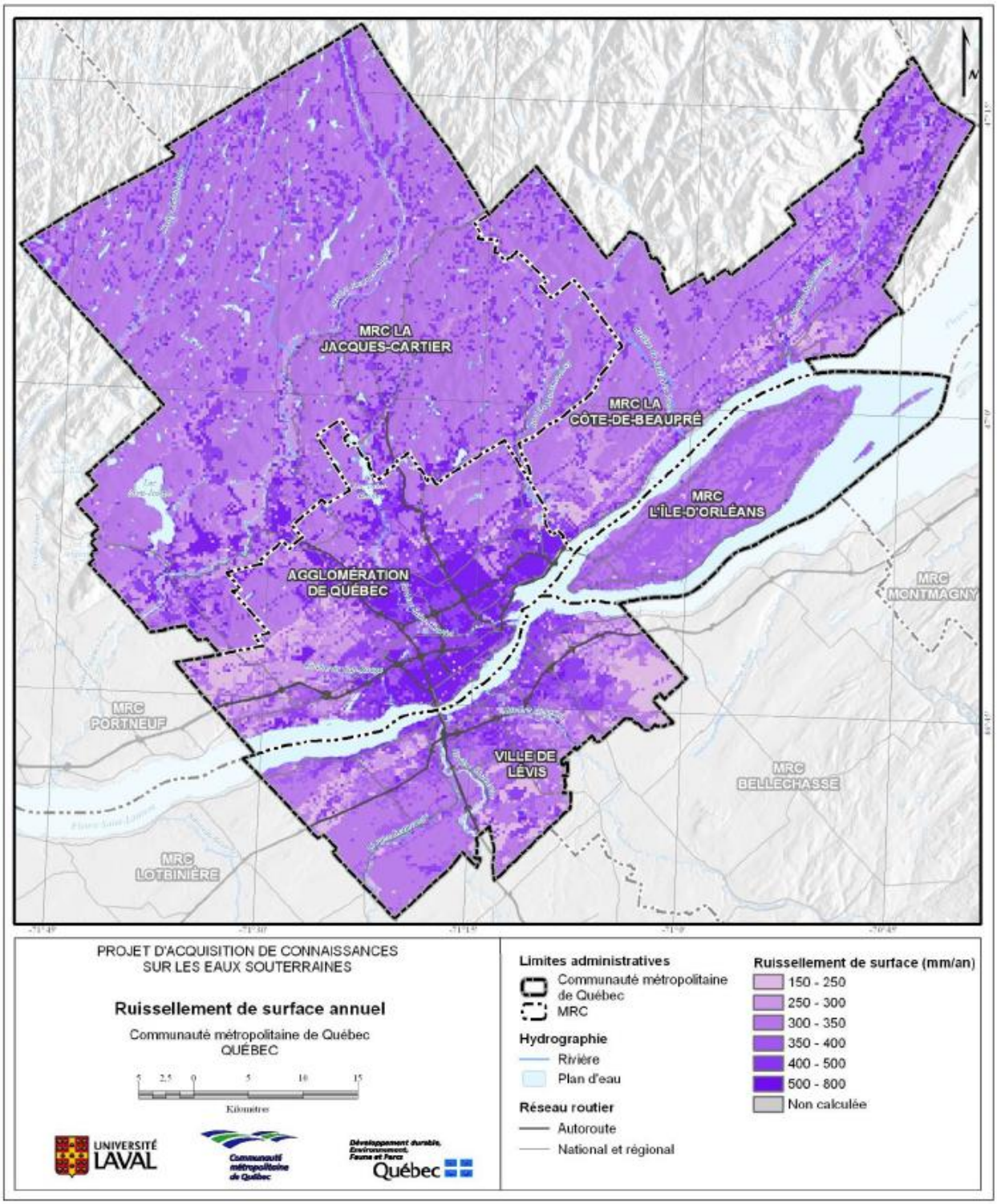


Figure B.7. Ruissellement de surface annuel selon le modèle HELP (Talbot Poulin *et al.*, 2013).

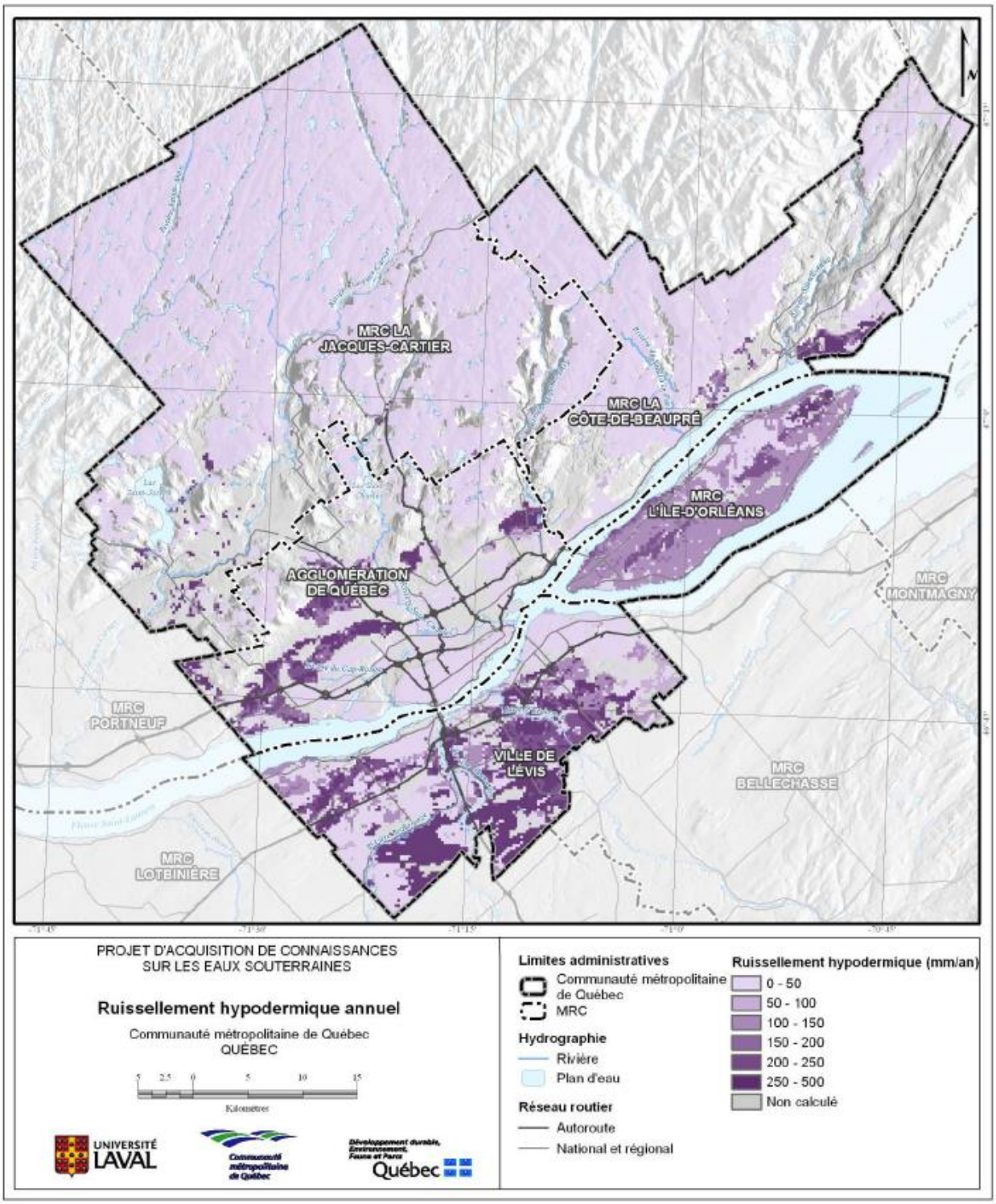


Figure B.8. Ruissellement hypodermique annuel selon le modèle HELP (Talbot Poulin *et al.*, 2013).

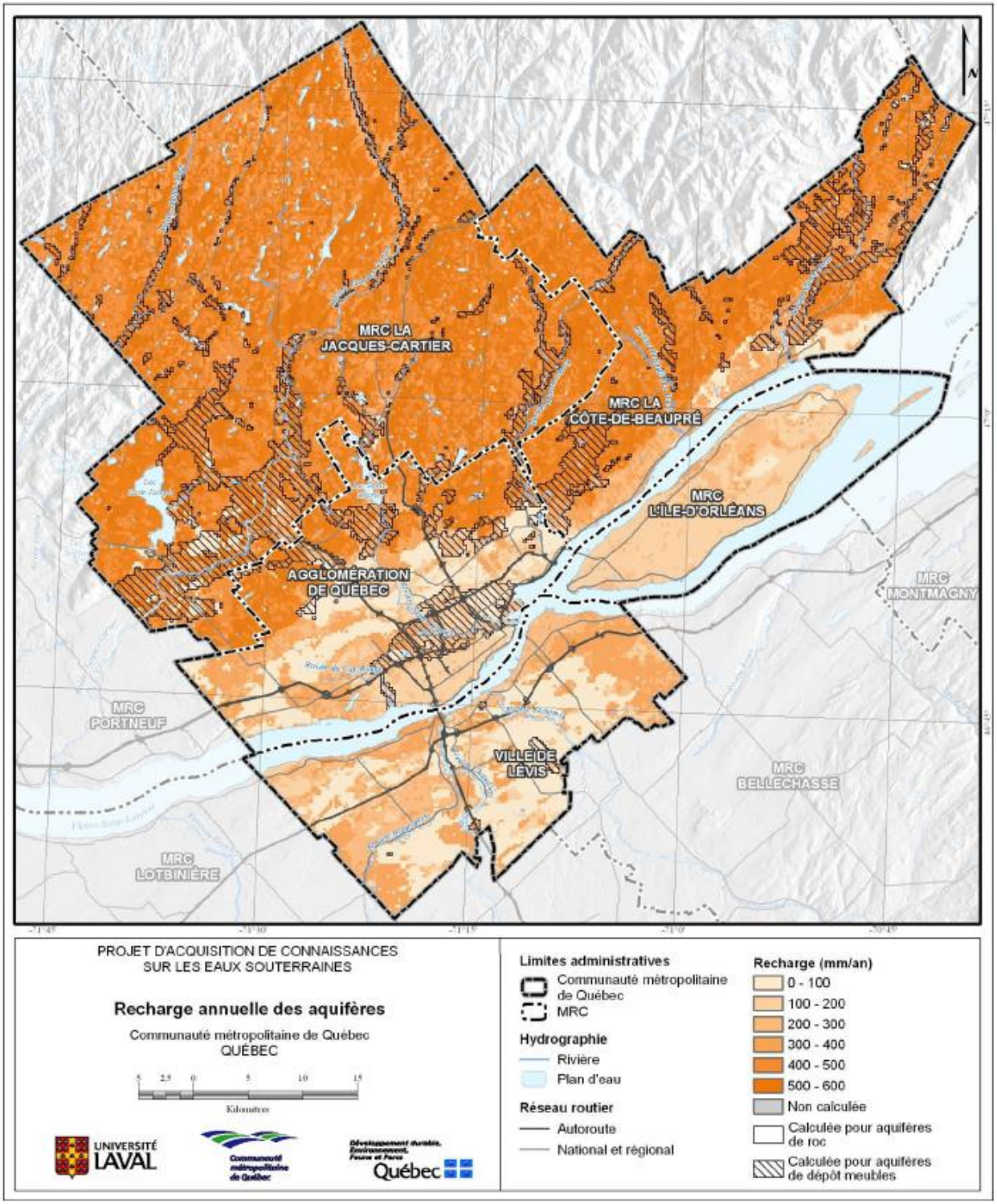


Figure B.9. Recharge annuelle de l'aquifère superficiel selon le modèle HELP (Talbot Poulin *et al.*, 2013).

ANNEXE C. ATLAS HYDROCLIMATIQUE

Tableau C.1. Changement au régime hydrique des rivières à l'horizon 2050 en hiver (CEHQ, 2013; 2015)

		Hiver					
		Atlas 2013			Atlas 2015		
	Rivières	Direction (Niveau de confiance)	Ampleur (%)	Dispersion (%)	Direction (Niveau de confiance)	Ampleur (%)	Dispersion (%)
Pointe des crues $Q_{1jour}max_{2ans}$	Saint-Charles	Modéré	-4,8	16,7	Modéré	-3,2	18,2
	Montmorency		-2,1	17,9		-3,1	19,0
	Jacques-Cartier		3,8	14,8		1,7	12,9
	Bras-du-Nord		-0,7	18,4		-2,4	11,5
	Sainte-Anne		0,3	18,9		-2,1	13,7
Pointe des crues $Q_{1jour}max_{20ans}$	Saint-Charles	Modéré	-3,7	19,1	Modéré	0,7	16,7
	Montmorency		-0,2	16,0		0,1	25,4
	Jacques-Cartier		4,6	17,5		5,2	15,9
	Bras-du-Nord		1,8	20,9		0,2	18,0
	Sainte-Anne		0,7	20,7		0,7	22,0
Volume des crues $Q_{14jours}max_{2ans}$	Saint-Charles	Élevé	-8,3	15,4	Élevé	-5,5	15,0
	Montmorency	Modéré	-3,8	16,7	Modéré	-2,7	13,2
	Jacques-Cartier		1,0	13,1		0,1	11,2
	Bras-du-Nord		-2,4	15,8	Élevé	-4,5	12,4
	Sainte-Anne		-1,5	16,2		-3,6	12,5
Volume des crues $Q_{14jours}max_{20ans}$	Saint-Charles	Élevé	-7,1	15,6	Élevé	-4,3	11,7
	Montmorency	Modéré	-2,5	14,0	Modéré	-1,8	17,5
	Jacques-Cartier		2,3	12,5		1,5	13,9
	Bras-du-Nord		-2,9	15,4		-2,2	15,1
	Sainte-Anne		-2,9	15,1		-2,9	17,1
Occurrence des crues J[$Q_{1jour}max$]	Saint-Charles	Très Élevé	-12.5 [jours]	11.1 [jours]	Très Élevé	-14 [jours]	9 [jours]
	Montmorency		-12 [jours]	10 [jours]		-14 [jours]	9 [jours]
	Jacques-Cartier		-11 [jours]	12 [jours]		-13 [jours]	12 [jours]
	Bras-du-Nord		-13.5 [jours]	9.5 [jours]		-13 [jours]	9 [jours]
	Sainte-Anne		-13 [jours]	8 [jours]		-13 [jours]	10 [jours]
Étiage $Q_{7jours}min_{2ans}$	Saint-Charles	-	-	-	Très Élevé	28,7	27,4
	Montmorency	-	-	-		12,4	8,4
	Jacques-Cartier	-	-	-		17,9	13,7
	Bras-du-Nord	-	-	-		8,8	7,5
	Sainte-Anne	-	-	-		11,0	9,3
Étiage $Q_{7jours}min_{10ans}$	Saint-Charles	-	-	-	Très Élevé	20,2	18,1
	Montmorency	-	-	-		9,3	7,9
	Jacques-Cartier	-	-	-		11,8	10,5
	Bras-du-Nord	-	-	-	Élevé	6,5	6,9
	Sainte-Anne	-	-	-		8,1	9,0
Étiage $Q_{30jours}min_{5ans}$	Saint-Charles	-	-	-	Très Élevé	42,3	39,3
	Montmorency	-	-	-		15,9	11,6
	Jacques-Cartier	-	-	-		23,8	21,3
	Bras-du-Nord	-	-	-		12,5	11,4
	Sainte-Anne	-	-	-		16,4	14,7
Débit moyen saisonnier Q_{moy}	Saint-Charles	Très Élevé	10,0	12,5	Très Élevé	10,9	10,0
	Montmorency		10,5	13,5		10,6	9,2
	Jacques-Cartier		9,4	12,6		9,7	9,5
	Bras-du-Nord		10,8	14,2	Élevé	8,1	9,9
	Sainte-Anne	Élevé	10,9	13,8		8,3	10,4

Tableau C.2. Changement au régime hydrique des rivières à l'horizon 2050 en été (CEHQ, 2013; 2015)

		Été et automne					
		Atlas 2013			Atlas 2015		
	Rivières	Direction (Niveau de confiance)	Ampleur (%)	Dispersion (%)	Direction (Niveau de confiance)	Ampleur (%)	Dispersion (%)
Pointe des crues $Q_{1jour}max_{2ans}$	Saint-Charles	Modéré	5,1	23,3	Modéré	3,4	16,7
	Montmorency		4,6	32,8		-1,0	20,1
	Jacques-Cartier		5,3	30,8		-0,3	22,0
	Bras-du-Nord		3,5	33,0		2,1	25,3
	Sainte-Anne		4,9	33,0		0,9	24,6
Pointe des crues $Q_{1jour}max_{20ans}$	Saint-Charles	Modéré	6,4	31,5	Élevé	8,1	18,0
	Montmorency		7,8	39,8	Modéré	3,1	18,4
	Jacques-Cartier		5,8	34,8		3,7	20,3
	Bras-du-Nord		8,0	40,7	Élevé	8,3	23,4
	Sainte-Anne		10,1	42,9		7,1	23,5
Volume des crues $Q_{14jours}max_{2ans}$	Saint-Charles	-	-	-	-	-	-
	Montmorency	-	-	-	-	-	-
	Jacques-Cartier	-	-	-	-	-	-
	Bras-du-Nord	-	-	-	-	-	-
	Sainte-Anne	-	-	-	-	-	-
Volume des crues $Q_{14jours}max_{20ans}$	Saint-Charles	-	-	-	-	-	-
	Montmorency	-	-	-	-	-	-
	Jacques-Cartier	-	-	-	-	-	-
	Bras-du-Nord	-	-	-	-	-	-
	Sainte-Anne	-	-	-	-	-	-
Occurrence des crues $J[Q_{1jour}max]$	Saint-Charles	-	-	-	-	-	-
	Montmorency	-	-	-	-	-	-
	Jacques-Cartier	-	-	-	-	-	-
	Bras-du-Nord	-	-	-	-	-	-
	Sainte-Anne	-	-	-	-	-	-
Étiage $Q_{7jours}min_{2ans}$	Saint-Charles	Très Élevé	-11,4	9,8	Très Élevé	-28,1	14,8
	Montmorency		-13,7	11,9		-18,7	12,3
	Jacques-Cartier		-13,1	12,1		-26,9	13,8
	Bras-du-Nord		-13,5	12,0		-18,8	12,5
	Sainte-Anne		-13,7	11,7		-19,3	12,3
Étiage $Q_{7jours}min_{10ans}$	Saint-Charles	-	-	-	Très Élevé	-23,5	14,4
	Montmorency	-	-	-		-17,2	12,5
	Jacques-Cartier	-	-	-		-20,8	11,5
	Bras-du-Nord	-	-	-		-17,3	12,1
	Sainte-Anne	-	-	-		-17,6	12,5
Étiage $Q_{30jours}min_{5ans}$	Saint-Charles	-	-	-	Très Élevé	-26,5	15,9
	Montmorency	-	-	-		-25,1	14,2
	Jacques-Cartier	-	-	-		-31,9	17,3
	Bras-du-Nord	-	-	-		-22,8	15,0
	Sainte-Anne	-	-	-		-23,1	15,0
Débit moyen saisonnier Q_{moy}	Saint-Charles	Modéré	-2,2	16,3	Élevé	-7,5	13,9
	Montmorency		-3,7	17,1		-10,2	14,8
	Jacques-Cartier		-3,2	18,3		-9,8	17,1
	Bras-du-Nord		-3,4	17,8		-8,8	18,6
	Sainte-Anne		-3,9	17,9		-9,5	18,7

Tableau C.3. Changement au débit saisonnier des rivières à l'horizon 2050 (CEHQ, 2013; 2015)

	Saint-Charles - Atlas 2013			Saint-Charles - Atlas 2015		
	Direction (Niveau de confiance)	Ampleur (%)	Dispersion (%)	Direction (Niveau de confiance)	Ampleur (%)	Dispersion (%)
Q_{moy1}	Très Élevé	61,5	48,1	Très Élevé	70,3	43,2
Q_{moy2}		57,6	39,2		68,0	58,2
Q_{moy3}		50,1	51,3		77,7	44,5
Q_{moy4}	Modéré	-9,6	40,9	Modéré	8,4	32,6
Q_{moy5}	Très Élevé	-21,0	16,0	Très Élevé	-33,2	15,2
Q_{moy6}	Élevé	-10,8	17,7	Élevé	-11,7	17,3
Q_{moy7}		-12,9	22,2		-16,3	22,2
Q_{moy8}		-17,6	27,8		-22,3	23,6
Q_{moy9}		-15,8	29,0		-27,9	23,8
Q_{moy10}		-12,1	25,0		-17,4	23,4
Q_{moy11}	Modéré	4,8	23,2	Modéré	1,9	20,5
Q_{moy12}	Très Élevé	38,1	29,8	Très Élevé	39,6	28,2

	Montmorency - Atlas 2013			Montmorency - Atlas 2015		
Q_{moy1}	Très Élevé	24,0	17,4	Très Élevé	10,0	10,3
Q_{moy2}		23,1	27,0		30,8	24,4
Q_{moy3}		43,1	62,5		67,8	85,2
Q_{moy4}		86,0	85,5		123,2	76,9
Q_{moy5}	Élevé	-20,0	34,2		-24,5	29,6
Q_{moy6}	Très Élevé	-20,7	18,4		-29,8	13,7
Q_{moy7}	Élevé	-15,0	20,4		-20,4	21,3
Q_{moy8}		-18,5	27,5		-24,8	22,3
Q_{moy9}		-16,2	27,4		-29,6	24,2
Q_{moy10}		-10,2	23,2	Élevé	-16,2	24,3
Q_{moy11}		9,1	23,2	Modéré	7,0	22,5
Q_{moy12}	Très Élevé	26,5	25,2	Très Élevé	35,4	23,1

	Sainte-Anne - Atlas 2013			Sainte-Anne - Atlas 2015		
Q_{moy1}	Très élevé	27,6	26,9	Très élevé	19,9	22,9
Q_{moy2}		31,4	34,1		31,4	32,3
Q_{moy3}		61,5	62,0		73,8	89,2
Q_{moy4}		41,4	77,2		72,9	61,8
Q_{moy5}	Élevé	-26,6	28,1		-27,4	26,9
Q_{moy6}		-17,6	19,1		-25,2	18,8
Q_{moy7}		-14,8	19,6	Élevé	-19,0	22,8
Q_{moy8}		-19,1	26,1	Très élevé	-23,3	21,9
Q_{moy9}		-18,0	27,1	Élevé	-29,0	26,4
Q_{moy10}		-12,4	24,1		-18,7	26,6
Q_{moy11}	Modéré	7,5	24,4	Modéré	4,0	29,0
Q_{moy12}	Très élevé	30,5	29,8	Très élevé	36,3	30,2

Tableau C.3. (suite) Changement au débit saisonnier des rivières à l'horizon 2050 (CEHQ, 2013; 2015)

	Jacques-Cartier - Atlas 2013			Jacques-Cartier - Atlas 2015		
	Direction (Niveau de confiance)	Ampleur (%)	Dispersion (%)	Direction (Niveau de confiance)	Ampleur (%)	Dispersion (%)
Q_{moy1}	Très Élevé	28,8	23,9	Très Élevé	33,8	22,0
Q_{moy2}		29,0	32,0		41,5	38,7
Q_{moy3}		50,6	50,1		85,4	75,5
Q_{moy4}		45,4	58,0		59,3	41,6
Q_{moy5}	Modéré	-2,4	36,0	Élevé	-14,6	20,8
Q_{moy6}	Très Élevé	-23,3	18,2	Très Élevé	-34,0	13,9
Q_{moy7}	Élevé	-14,2	21,2		-22,5	22,3
Q_{moy8}		-18,7	28,0		-27,7	25,0
Q_{moy9}		-14,6	26,9		-31,6	24,6
Q_{moy10}		-10,0	21,9	Élevé	-17,4	23,6
Q_{moy11}		9,6	23,4	Modéré	6,2	23,0
Q_{moy12}	Très Élevé	29,3	25,9	Très Élevé	40,6	24,9

	Bras-du-Nord - Atlas 2013			Bras-du-Nord - Atlas 2015		
Q_{moy1}	Très Élevé	26,2	27,3	Très Élevé	25,1	25,9
Q_{moy2}		29,8	32,6		28,9	30,0
Q_{moy3}		62,4	65,9		69,8	92,1
Q_{moy4}	Élevé	45,1	87,3		87,0	66,3
Q_{moy5}		-26,1	28,3		-28,5	27,1
Q_{moy6}		-17,8	19,9		-25,3	18,6
Q_{moy7}		-14,5	19,2	Élevé	-18,8	23,0
Q_{moy8}		-18,8	26,3	Très Élevé	-22,6	23,2
Q_{moy9}		-17,0	26,8		-27,6	27,1
Q_{moy10}		-11,2	23,3	Élevé	-17,3	26,3
Q_{moy11}		8,8	25,1	Modéré	6,3	28,4
Q_{moy12}	Très Élevé	32,3	30,0	Très Élevé	41,2	32,6

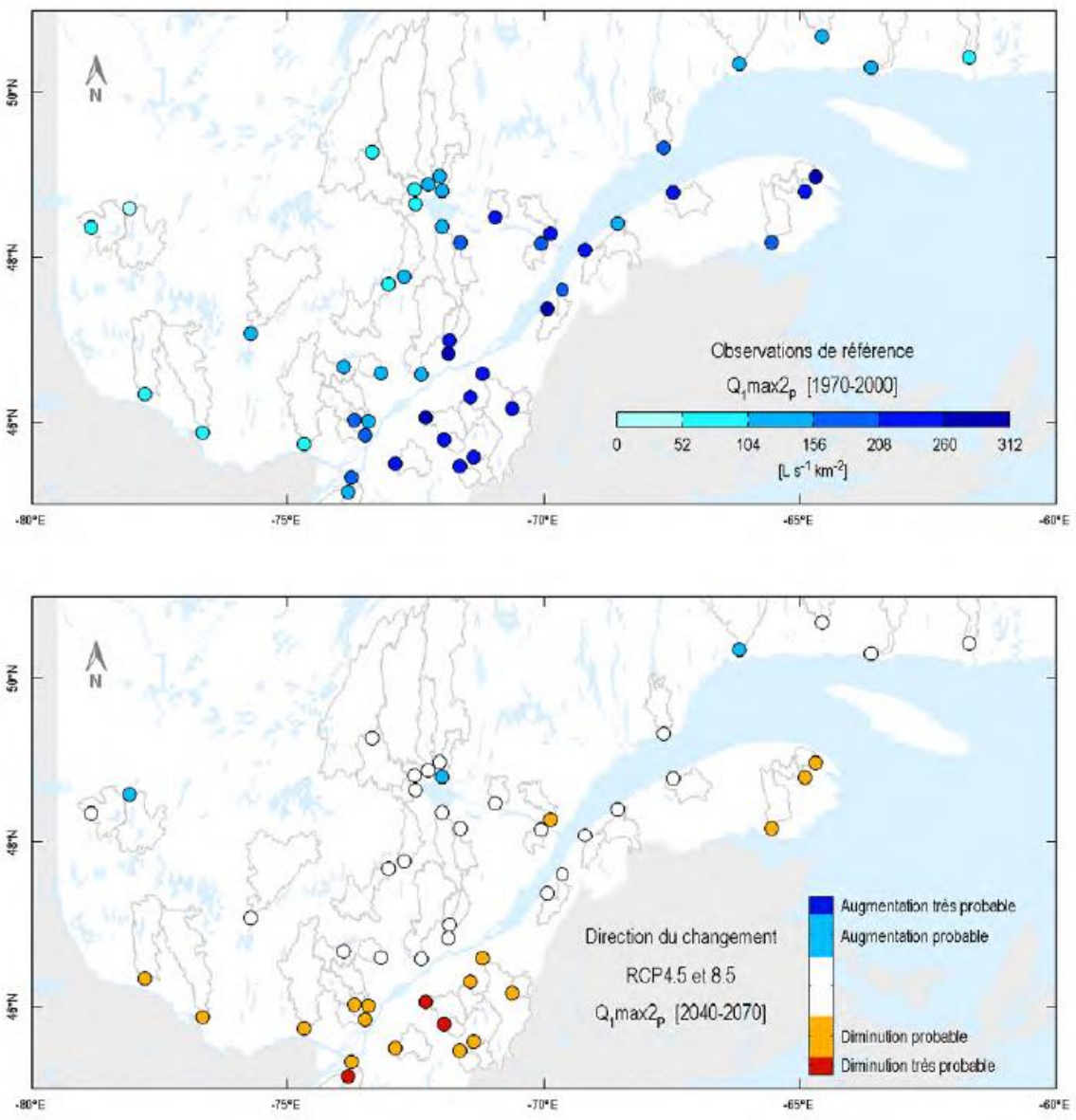


Figure C.1. Pointe des crues printanières, débit journalier, récurrence 2 ans (CEHQ, 2015).

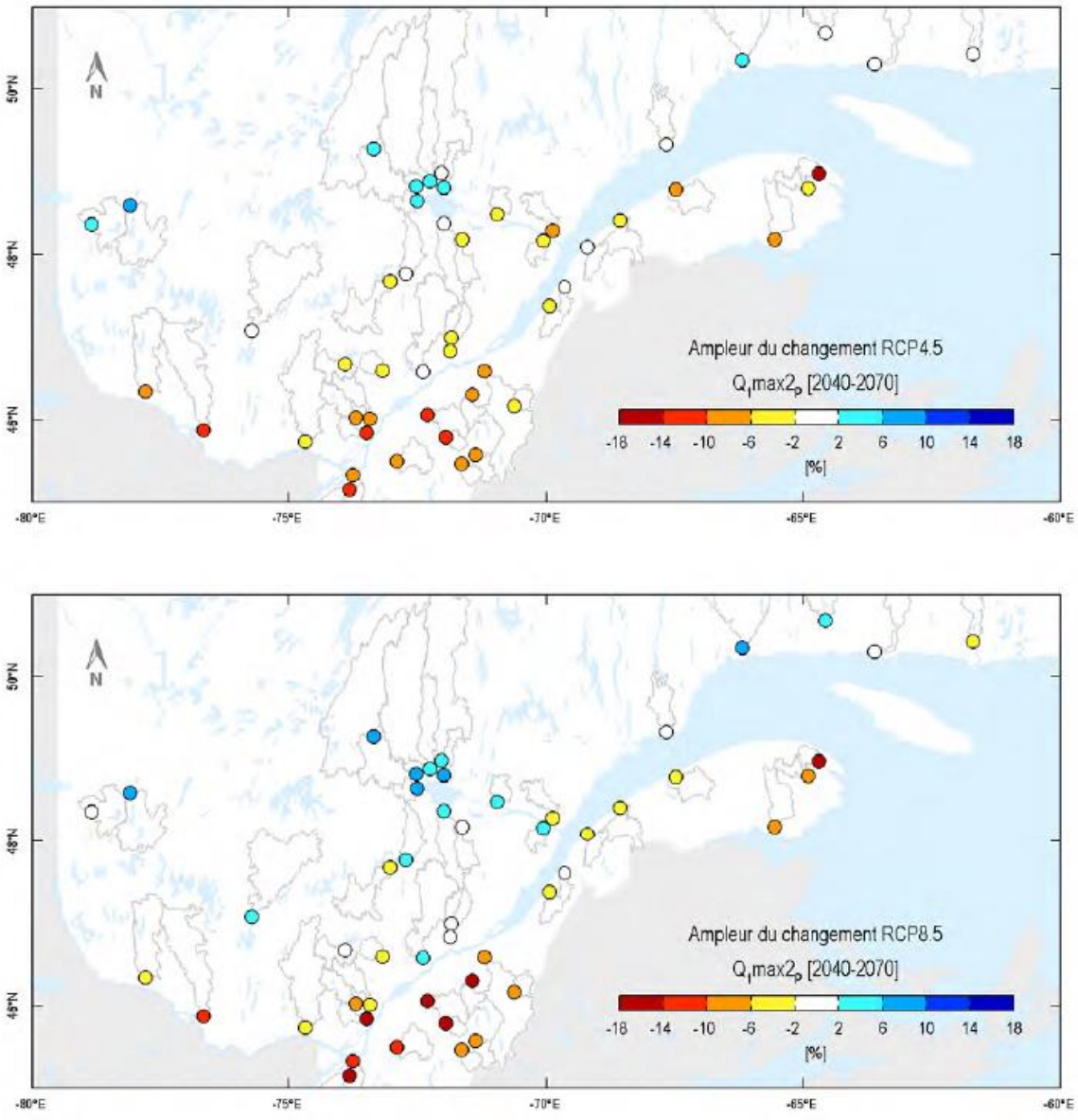


Figure C.1. (suite) Pointe des crues printanières, débit journalier, récurrence 2 ans (CEHQ, 2015).

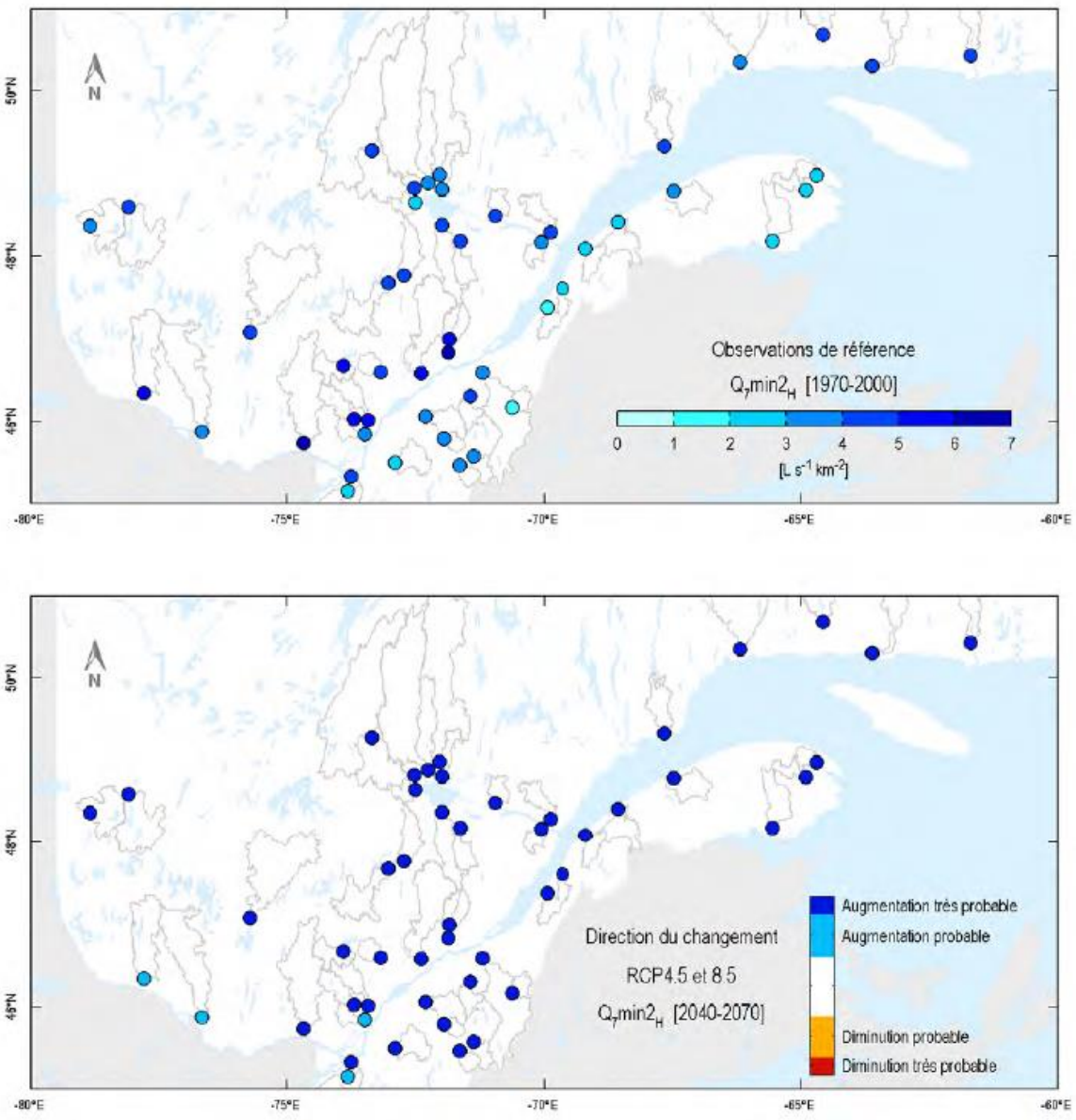


Figure C.2. Étiages hivernaux, débit moyen sur 7 jours, récurrence 2 ans (CEHQ, 2015).

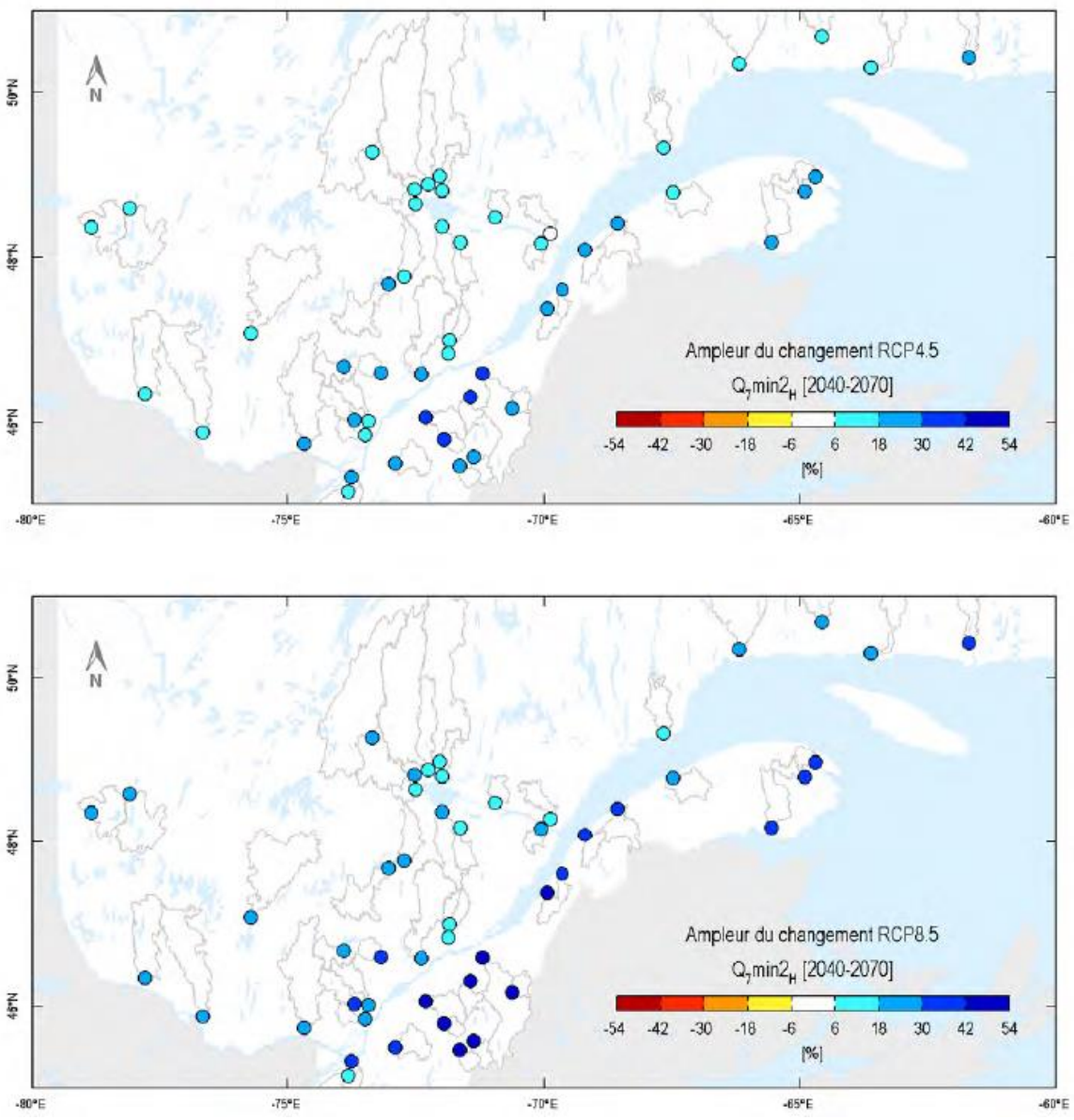


Figure C.2. (suite) Étiages hivernaux, débit moyen sur 7 jours, récurrence 2 ans (CEHQ, 2015).

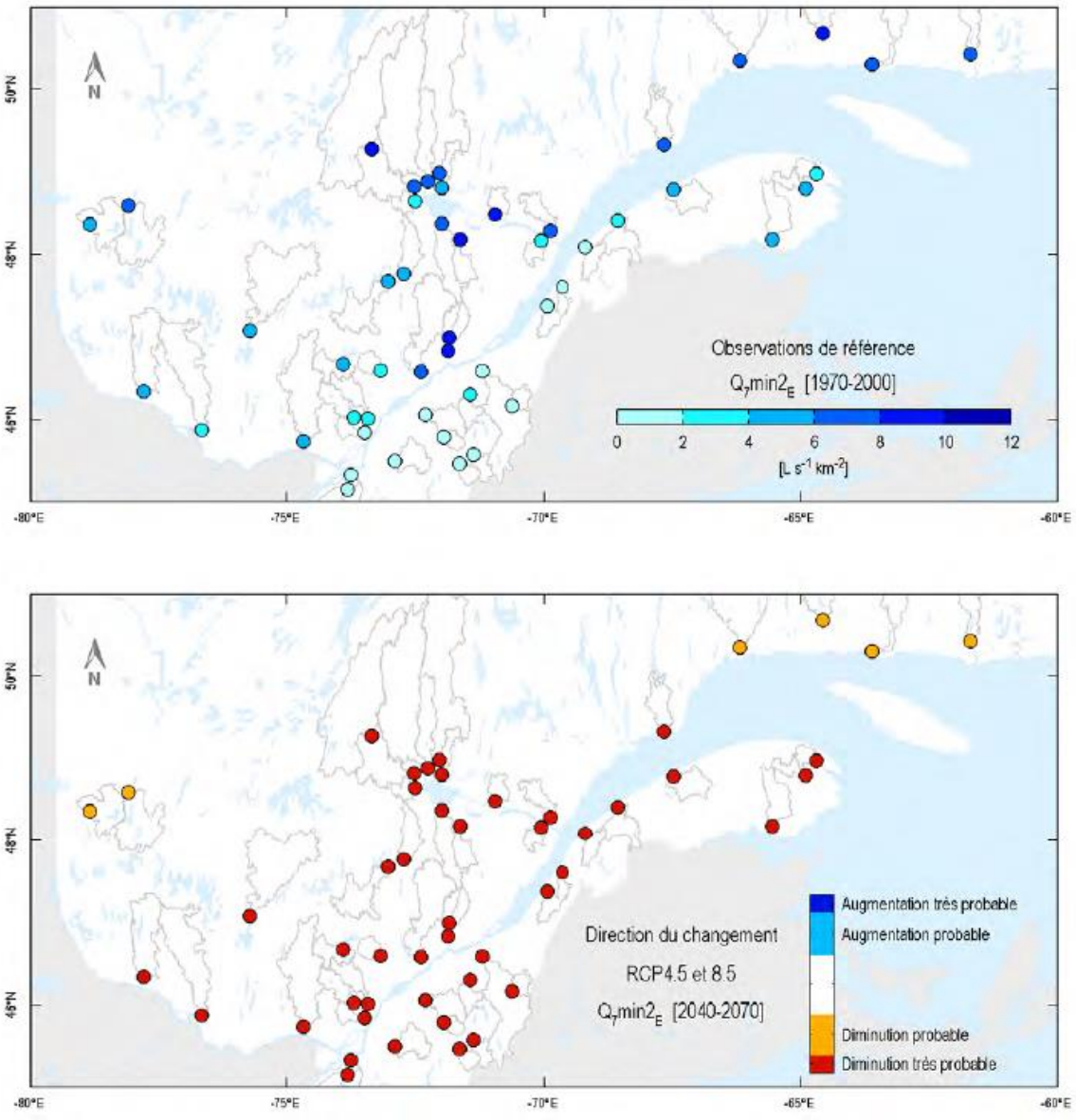


Figure C.3. Étiages estivaux, débit moyen sur 7 jours, récurrence 2 ans (CEHQ, 2015).

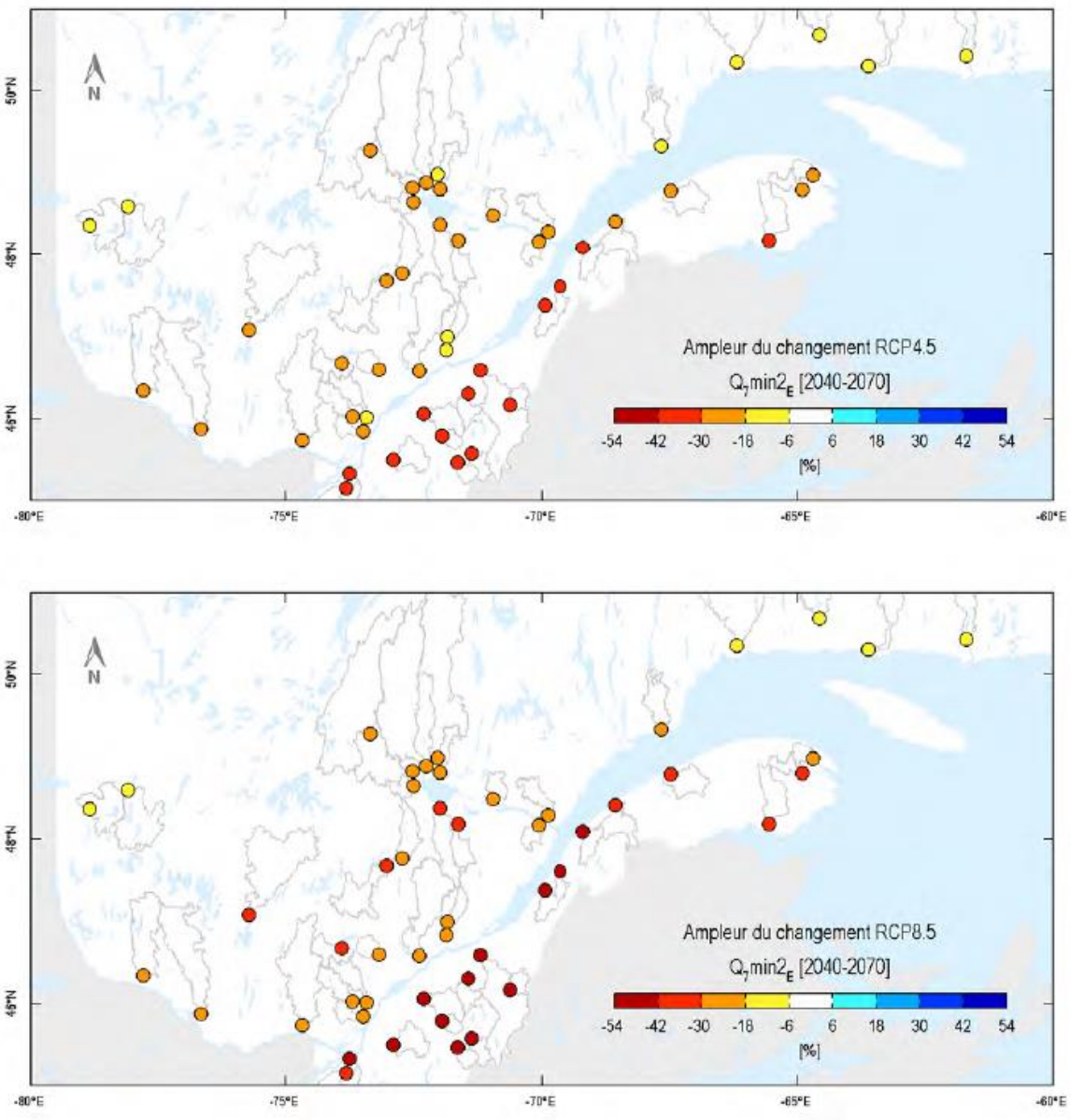


Figure C.3. (suite) Étiages estivaux, débit moyen sur 7 jours, récurrence 2 ans (CEHQ, 2015).

ANNEXE D. COURBES IDF

Numéro de la station : 7016294 **Nombre d'années disponibles :**29

Nom de la station : QUEBEC/JEAN LESAGE INTL A

Quantité de pluie par période de retour (mm) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

	Temps de retour					
Durée	**2 ans**	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**50 ans**	**100 ans**
10 minutes	10.5	13.9	16.0	18.1	20.8	22.8
	[9.3,11.9]	[12.3,15.7]	[14.2,18.2]	[16.0,20.5]	[18.2,23.6]	[19.8,25.9]
15 minutes	12.8	16.9	19.8	22.5	26.1	28.9
	[11.3,14.5]	[14.9,19.2]	[17.4,22.4]	[19.7,25.5]	[22.7,29.6]	[24.9,32.7]
30 minutes	16.9	22.6	26.5	30.2	35.1	38.9
	[14.8,19.3]	[19.8,25.7]	[23.1,30.1]	[26.3,34.3]	[30.3,39.9]	[33.3,44.2]
1 heure	21.5	28.9	34.0	39.0	45.7	50.9
	[18.8,24.6]	[25.3,33.0]	[29.6,38.8]	[33.8,44.5]	[39.4,52.1]	[43.6,57.9]
2 heures	25.8	34.2	40.1	46.1	54.3	60.8
	[22.8,29.4]	[30.1,39.0]	[35.2,45.7]	[40.3,52.4]	[46.9,61.7]	[52.1,69.1]
6 heures	35.9	47.3	55.4	63.5	74.6	83.4
	[31.8,41.0]	[41.8,54.2]	[48.7,63.4]	[55.5,72.6]	[64.5,85.1]	[71.4,95.0]
12 heures	43.0	56.5	65.9	75.3	87.9	97.8
	[38.2,48.8]	[50.0,64.0]	[58.0,74.6]	[65.8,85.1]	[76.1,99.1]	[83.8,110.3]
24 heures	53.4	69.6	80.2	90.4	103.6	113.4
	[47.6,60.1]	[61.9,78.4]	[71.1,90.4]	[79.8,102.0]	[90.6,116.9]	[98.5,128.4]

Intensité de pluie par période de retour (mm/heure) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

	Temps de retour					
Durée	**2 ans**	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**50 ans**	**100 ans**
10 minutes	63.0	83.1	96.3	108.8	124.7	136.6
	[55.9,71.5]	[73.8,94.2]	[85.2,109.0]	[95.8,123.3]	[109.1,141.7]	[118.6,155.5]
15 minutes	51.1	67.8	79.1	90.1	104.6	115.6
	[45.1,58.1]	[59.8,77.0]	[69.5,89.7]	[78.8,102.1]	[90.8,118.3]	[99.7,130.9]
30 minutes	33.8	45.2	52.9	60.4	70.3	77.8
	[29.7,38.6]	[39.6,51.5]	[46.2,60.2]	[52.5,68.7]	[60.6,79.8]	[66.6,88.4]
1 heure	21.5	28.9	34.0	39.0	45.7	50.9
	[18.8,24.6]	[25.3,33.0]	[29.6,38.8]	[33.8,44.5]	[39.4,52.1]	[43.6,57.9]
2 heures	12.9	17.1	20.1	23.0	27.2	30.4
	[11.4,14.7]	[15.1,19.5]	[17.6,22.8]	[20.1,26.2]	[23.5,30.9]	[26.1,34.5]
6 heures	6.0	7.9	9.2	10.6	12.4	13.9
	[5.3,6.8]	[7.0,9.0]	[8.1,10.6]	[9.3,12.1]	[10.7,14.2]	[11.9,15.8]
12 heures	3.6	4.7	5.5	6.3	7.3	8.2
	[3.2,4.1]	[4.2,5.3]	[4.8,6.2]	[5.5,7.1]	[6.3,8.3]	[7.0,9.2]
24 heures	2.2	2.9	3.3	3.8	4.3	4.7
	[2.0,2.5]	[2.6,3.3]	[3.0,3.8]	[3.3,4.2]	[3.8,4.9]	[4.1,5.3]

Figure D.1. Version numérique de la courbe IDF à l'aéroport Jean-Lesage (Mailhot et Talbot, 2011)

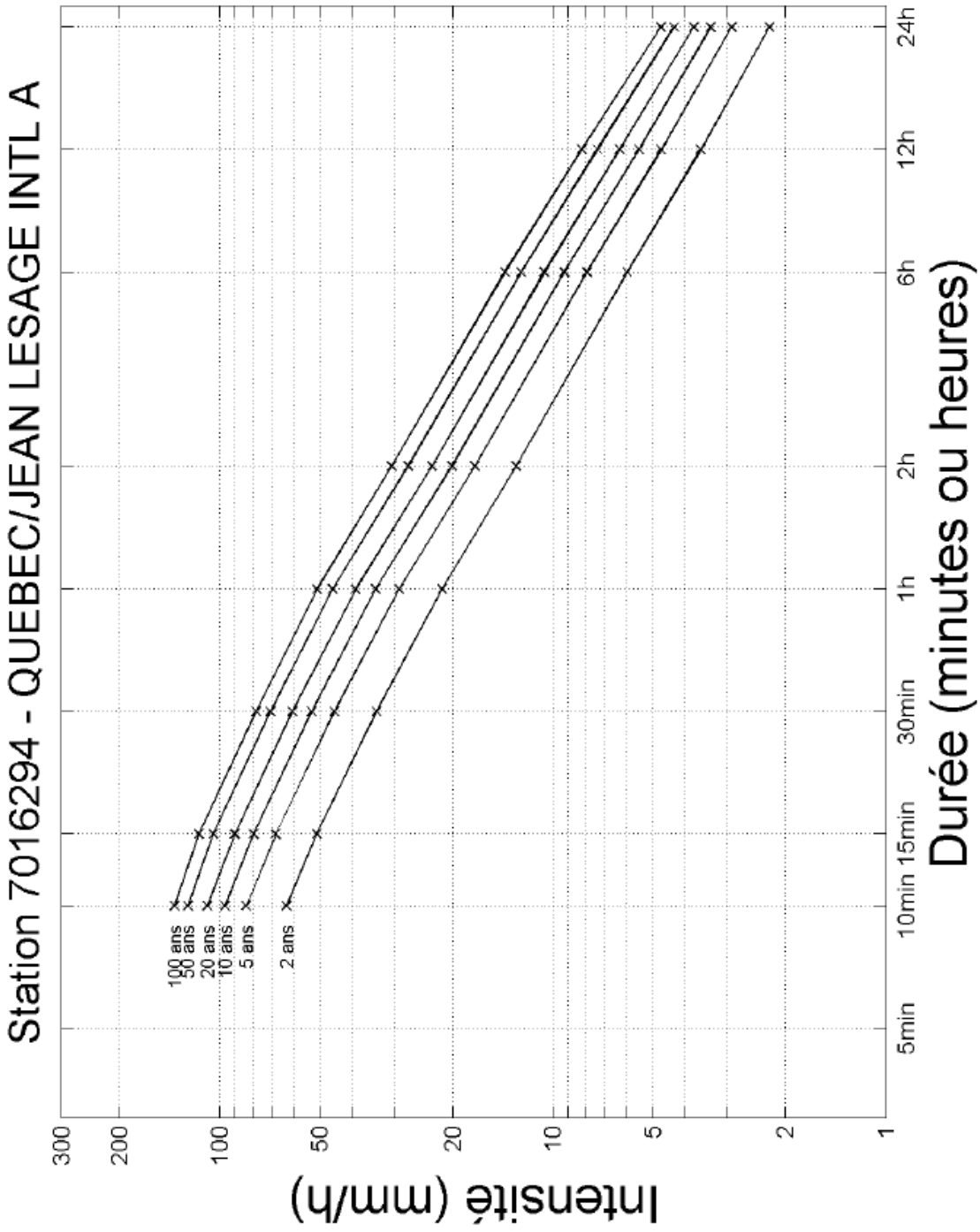


Figure D.2. Courbe IDF à l'aéroport Jean-Lesage (Mailhot et Talbot, 2011)

Numéro de la station : 7042388 **Nombre d'années disponibles :**31

Nom de la station : FORET MONTMORENCY

Quantité de pluie par période de retour (mm) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

	Temps de retour					
Durée	**2 ans**	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**50 ans**	**100 ans**
10 minutes	9.8	13.2	15.6	18.1	21.5	24.2
	[8.7,11.3]	[11.6,15.2]	[13.6,17.9]	[15.6,20.8]	[18.3,24.7]	[20.3,27.9]
15 minutes	12.6	16.7	19.5	22.2	25.8	28.5
	[11.1,14.3]	[14.7,18.9]	[17.1,22.0]	[19.5,25.1]	[22.4,29.1]	[24.6,32.2]
30 minutes	16.9	22.6	26.5	30.2	35.1	38.9
	[14.9,19.2]	[19.9,25.7]	[23.2,30.1]	[26.4,34.3]	[30.5,39.9]	[33.5,44.1]
1 heure	21.3	28.7	33.7	38.7	45.4	50.6
	[18.7,24.4]	[25.1,32.7]	[29.5,38.4]	[33.7,44.0]	[39.2,51.6]	[43.4,57.4]
2 heures	25.5	33.9	39.7	45.7	53.8	60.3
	[22.7,29.1]	[30.0,38.5]	[35.1,45.1]	[40.1,51.8]	[46.8,60.9]	[52.0,68.2]
6 heures	36.8	48.5	56.8	65.1	76.5	85.5
	[32.7,41.7]	[43.1,55.0]	[50.2,64.3]	[57.2,73.6]	[66.4,86.4]	[73.6,96.6]
12 heures	44.9	59.0	68.8	78.5	91.7	102.0
	[40.0,50.7]	[52.4,66.6]	[60.8,77.5]	[69.1,88.5]	[79.9,103.1]	[88.1,114.6]
24 heures	53.3	70.0	81.7	93.3	109.1	121.4
	[47.7,60.3]	[62.3,79.3]	[72.0,92.7]	[81.4,106.2]	[93.7,124.9]	[102.6,139.7]

Intensité de pluie par période de retour (mm/heure) avec intervalle de confiance de 95% (entre crochets)

	Temps de retour					
Durée	**2 ans**	**5 ans**	**10 ans**	**20 ans**	**50 ans**	**100 ans**
10 minutes	59.0	79.4	93.9	108.7	129.1	145.4
	[52.1,67.6]	[69.7,90.9]	[81.9,107.7]	[93.8,124.7]	[109.6,148.4]	[121.5,167.6]
15 minutes	50.3	66.8	77.9	88.7	103.0	113.9
	[44.6,57.1]	[59.0,75.7]	[68.5,88.2]	[77.8,100.3]	[89.5,116.4]	[98.2,128.8]
30 minutes	33.8	45.2	52.9	60.4	70.3	77.8
	[29.8,38.5]	[39.8,51.4]	[46.4,60.1]	[52.7,68.6]	[61.0,79.7]	[67.0,88.2]
1 heure	21.3	28.7	33.7	38.7	45.4	50.6
	[18.7,24.4]	[25.1,32.7]	[29.5,38.4]	[33.7,44.0]	[39.2,51.6]	[43.4,57.4]
2 heures	12.8	16.9	19.9	22.8	26.9	30.1
	[11.3,14.5]	[15.0,19.2]	[17.5,22.6]	[20.1,25.9]	[23.4,30.4]	[26.0,34.1]
6 heures	6.1	8.1	9.5	10.9	12.8	14.3
	[5.5,6.9]	[7.2,9.2]	[8.4,10.7]	[9.5,12.3]	[11.1,14.4]	[12.3,16.1]
12 heures	3.7	4.9	5.7	6.5	7.6	8.5
	[3.3,4.2]	[4.4,5.6]	[5.1,6.5]	[5.8,7.4]	[6.7,8.6]	[7.3,9.5]
24 heures	2.2	2.9	3.4	3.9	4.5	5.1
	[2.0,2.5]	[2.6,3.3]	[3.0,3.9]	[3.4,4.4]	[3.9,5.2]	[4.3,5.8]

Figure D.3. Version numérique de la courbe IDF à la station Forêt Montmorency (Mailhot et Talbot, 2011)

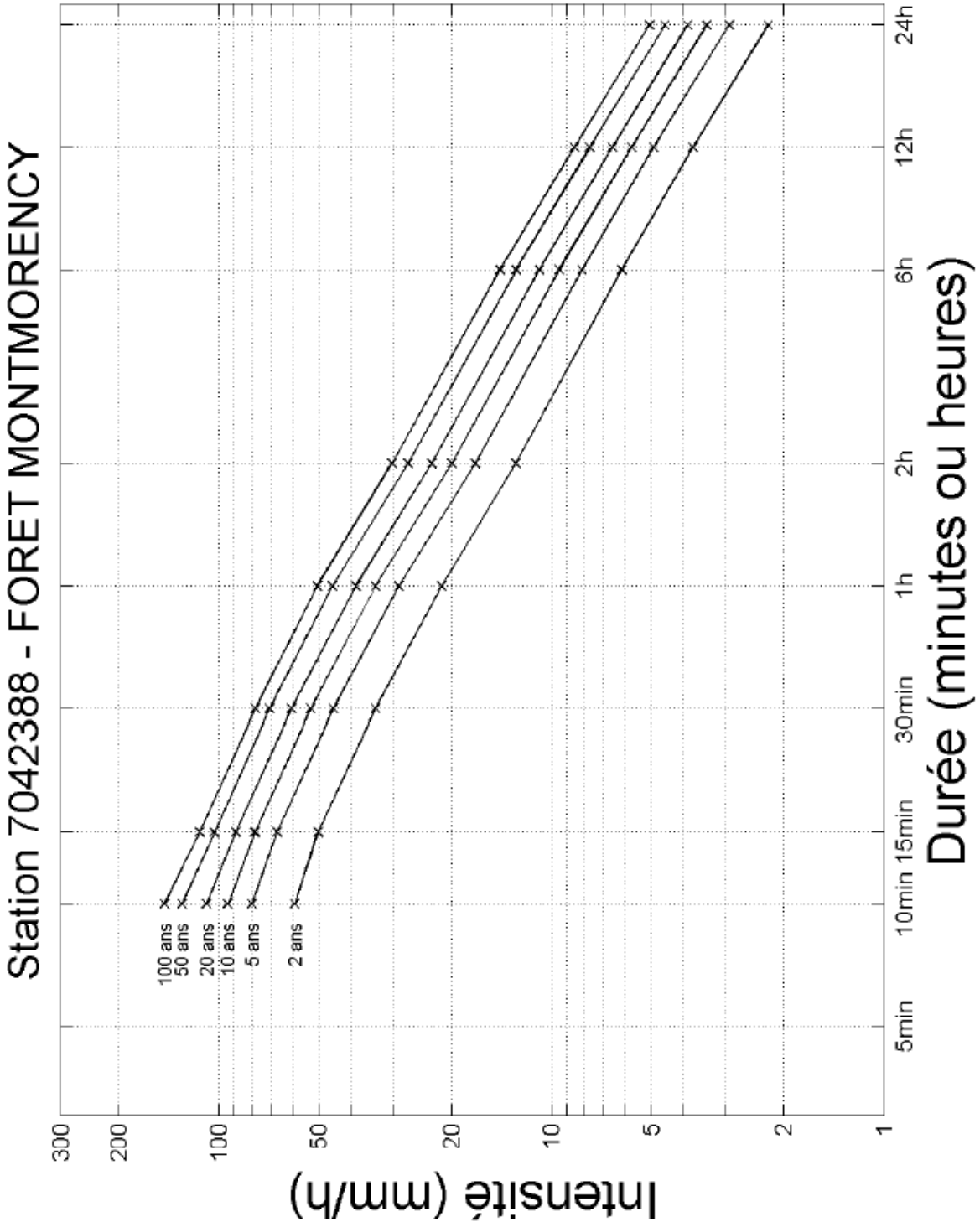


Figure D.4. Courbe IDF à la station Forêt Montmorency (Mailhot et Talbot, 2011)

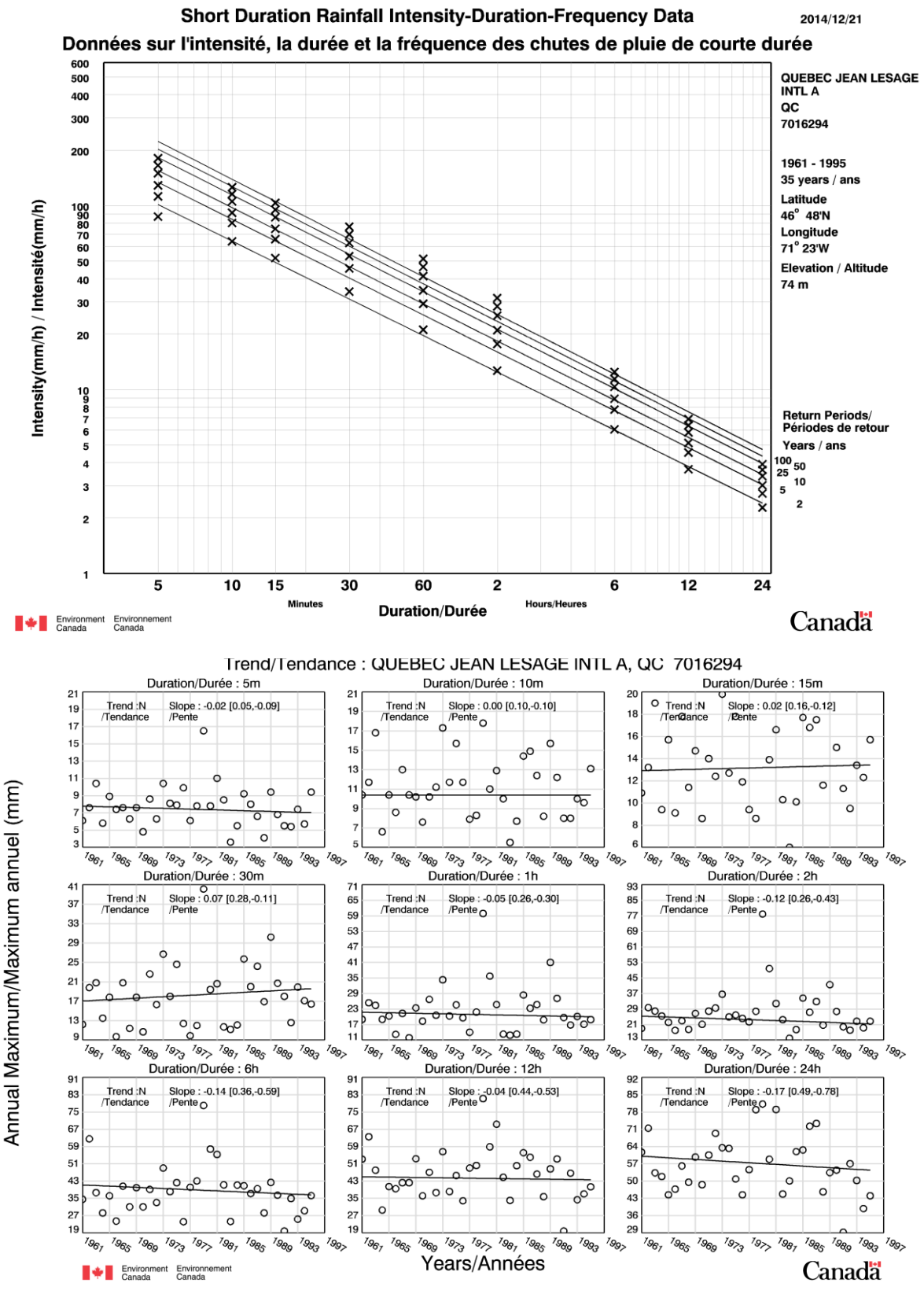


Figure D.5. Courbe IDF et analyse des tendances à l'aéroport Jean-Lesage (ECCC)

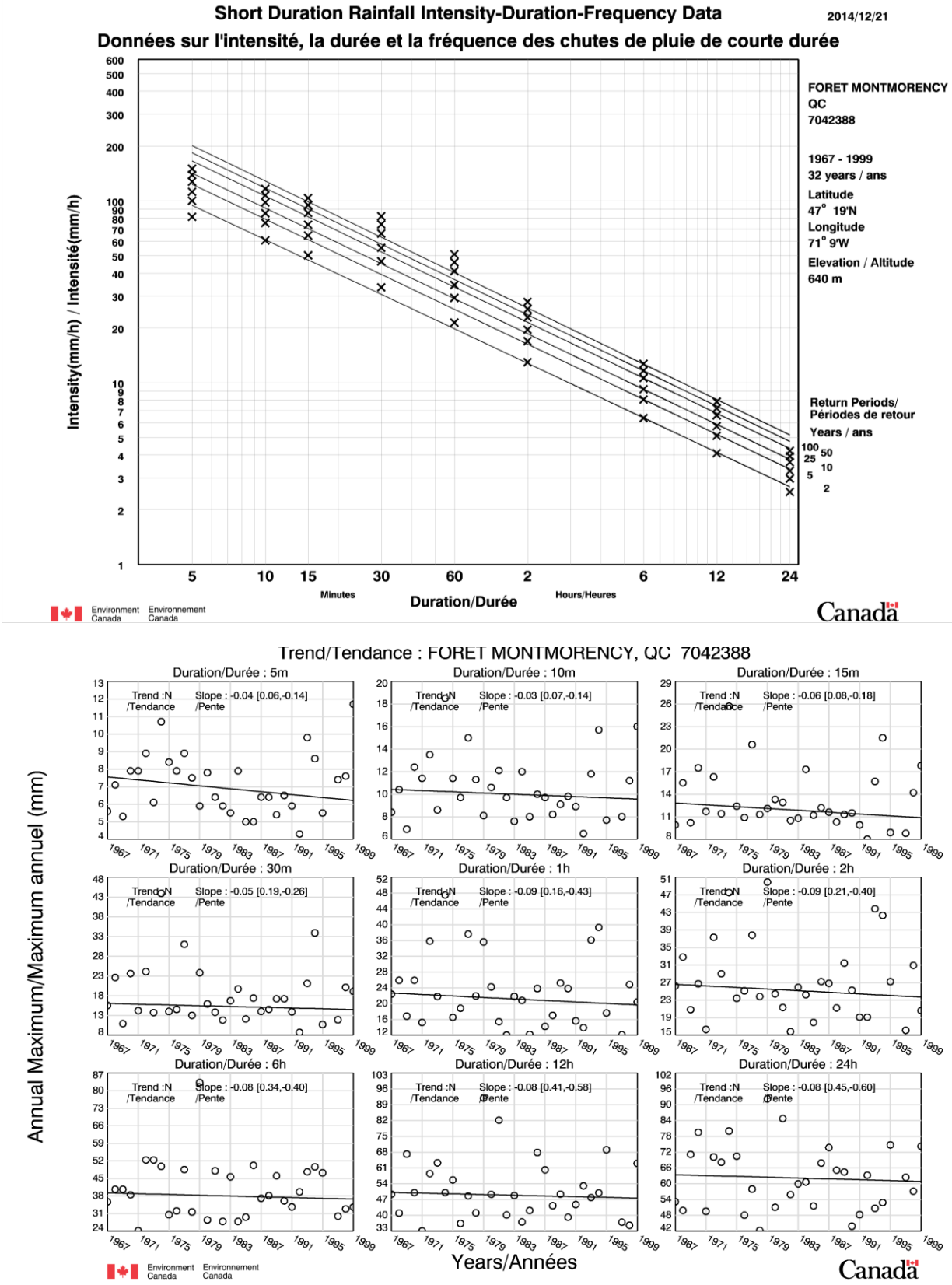


Figure D.6. Courbe IDF et analyse des tendances à la station Forêt Montmorency (ECCC)



550, rue Sherbrooke Ouest, 19ième étage
Montréal, Québec
H3A 1B9, Canada

Tel : 514-282-6464

Fax : 514-282-7131

www.ouranos.ca

Ouranos est né de la vision commune du Gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et d'Environnement Canada, avec le soutien financier de Valorisation-Recherche-Québec en 2001. Intégrant un réseau de quelque 450 scientifiques et professionnels issus de différentes disciplines, le consortium se concentre sur deux grands thèmes : la science du climat et les vulnérabilités, les impacts et l'adaptation. Sa mission est l'acquisition et le développement de connaissances sur les changements climatiques et leurs impacts ainsi que sur les vulnérabilités socioéconomiques et environnementales, de façon à informer les décideurs sur l'évolution du climat et à les conseiller pour identifier, évaluer, promouvoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation locales et régionales.