

Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes
Intensité-Durée-Fréquence (IDF) aux horizons 2040-2070 et
2070-2100 pour l'ensemble du Québec
PHASE II

Alain Mailhot, G  r  my Panthou, Guillaume Talbot

INRS-Eau, Terre et Environnement

Travail réalisé pour le
Ministère des Transports du Québec

Rapport de recherche R1515

Version finale

16 septembre 2014

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
1 Introduction	1
2 Considérations générales	3
3 Revue de littérature : projections des pluies extrêmes	7
4 Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes IDF au Québec	17
5 Conclusions et perspectives	21
Références	25

Liste des figures

3.1	Cartes des régions utilisées par Mailhot <i>et al.</i> (2012)	10
3.2	Cartes des régions utilisées par Mladjic <i>et al.</i> (2011)	12
4.1	Cartes des régions utilisées pour les majorations des courbes IDF	18

Liste des tableaux

3.1	Augmentations projetées pour les intensités de durées 6, 12 et 24 heures selon Mailhot <i>et al.</i> (2012)	11
3.2	Augmentations projetées pour les maxima annuels quotidiens de périodes de retour 20, 50 et 100 ans pour les régions couvrant en tout ou en partie le Québec selon Mladjic <i>et al.</i> (2011)	11
3.3	Comparaison des augmentations pour les intensités de durée 24 heures et de période de retour 20 ans pour les différentes régions du Québec selon Mailhot <i>et al.</i> (2012) et Mladjic <i>et al.</i> (2011)	13
3.4	Études recensées sur les projections des pluies extrêmes en climat futur	15
4.1	Majorations recommandées pour les diverses régions du Québec à l’horizon 2050 . .	18

Chapitre 1

Introduction

Le présent rapport rend compte des travaux réalisés pour le compte du *Ministère des Transport du Québec* dans le cadre d'un mandat visant trois objectifs : 1) la mise à jour des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) utilisées par le Ministère ; 2) la mise à jour de certains paramètres du *Manuel de conception des ponts* ; et 3) la formulation de recommandations sur les majorations à appliquer aux courbes IDF en climat futur afin de tenir compte des changements climatiques. Le projet a été divisé en deux phases, la première couvrant les deux premiers objectifs alors que la deuxième phase concerne le troisième objectif. Le présent rapport concerne la dernière phase du mandat à savoir qu'il rend compte des recommandations à appliquer aux courbes IDF pour les horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec.

L'approche retenue dans le cadre de ce mandat a été de procéder à une revue de littérature des travaux visant à établir des projections sur les pluies extrêmes. La revue de littérature a, dans un premier temps, porté sur les études à l'échelle globale, avec une emphase sur les régions couvrant en tout ou en partie l'est du Canada, pour, dans un deuxième temps, s'attarder aux études portant plus spécifiquement sur l'est du Canada et le Québec. Cette revue de littérature a par la suite permis d'établir les valeurs recommandées dans ce rapport.

Le présent document est organisé comme suit. Le Chapitre 2 présente un certain nombre de concepts de base et la terminologie utilisés en sciences du climat nécessaire pour comprendre comment sont établies les projections climatiques actuelles. Le Chapitre 3 décrit les projections les plus récentes d'études issues de simulations de modèles globaux ou régionaux du climat. Dans le cas des études à l'échelle globale, les résultats portant plus spécifiquement sur le Québec et l'est du Canada sont présentés. Enfin, le Chapitre 4 présente les valeurs recommandées pour les hausses des courbes IDF à considérer en climat futur pour le Québec. Le rapport se termine par une conclusion (Chapitre 5) où sont discutées les principales hypothèses et incertitudes associées aux projections climatiques actuelles.

Chapitre 2

Considérations générales

Le cinquième rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (*International Panel on Climate Change* - IPCC- IPCC (2013) ; à noter que l'acronyme anglais IPCC sera utilisée dans ce document) confirme les principales conclusions des précédents rapports alertant la communauté internationale sur les possibles impacts du réchauffement climatique causés par l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère terrestre. Un des impacts projeté est une augmentation des pluies extrêmes en réponse à l'augmentation des températures. Ainsi il est indiqué en page 72 du rapport ci-haut cité que : "there is some new limited direct evidence for an anthropogenic influence on extreme precipitation (...) and high confidence that the intensity of extreme precipitation events will increase with warming, at a rate well exceeding that of the mean precipitation." (IPCC, 2013).

Plusieurs études suggèrent en effet que les intensités des pluies extrêmes devraient augmenter plus rapidement que les intensités moyennes (Allen & Ingram, 2002; Pall *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2007; Gutowski *et al.*, 2007; O'Gorman & Schneider, 2009). L'argument proposé pouvant expliquer ce point est que l'intensité moyenne est contrôlée par la quantité d'énergie disponible alors que les intensités de pluies extrêmes seraient fonctions de l'humidité contenue dans l'atmosphère. Trenberth *et al.* (2003) suggèrent que l'augmentation de l'intensité des pluies extrêmes devrait suivre l'augmentation de la capacité atmosphérique à contenir de la vapeur d'eau qui augmente approximativement à un taux de $7 \text{ \%} \cdot \text{K}^{-1}$ (équation de Clausius-Clapeyron, C-C).

Ainsi une hausse des intensités de pluie extrêmes est attendue dans de nombreuses régions du monde ce qui implique une nécessaire mise à jour des outils de gestion et de conception des ouvrages et infrastructures hydrauliques et notamment des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). Des disparités régionales sont cependant attendues et c'est pourquoi il est important d'actualiser ces outils en fonction de la région considérée.

D'autres études, plus théoriques, vont dans le même sens et montrent que la sensibilité des pluies extrêmes au changement climatique pourrait être d'autant plus forte que la durée des événements est courte (Lenderink & van Meijgaard, 2008; Haerter *et al.*, 2010; Utsumi *et al.*, 2011; Loriaux *et al.*, 2013; Singleton & Toumi, 2013). Ce constat semble être aussi valide au Canada (Panthou *et al.*, 2014).

La revue de littérature qui suit recense les études permettant d’extraire une information quantitative concernant la projection des augmentations des pluies extrêmes à l’échelle globale puis plus précisément pour le Québec (Chapitre 3). Cette revue de littérature ne recense que les études utilisant des projections climatiques issues de modèles du climat (globaux ou régionaux). Les études basées sur des approches de descente d’échelle statistique (*statistical downscaling*) qui utilisent des liens statistiques pour passer de la résolution spatiale relativement grossière des modèles de climat à des échelles spatiales plus fines, ne sont pas considérées dans ce qui suit.

Les facteurs et paramètres suivants doivent être précisés lorsque l’on réfère à une projection donnée :

- *Scénario d’émission de Gaz à Effet de Serre (GES)* : Plusieurs scénarios ont été proposés par le passé. Les plus souvent mentionnés sont les scénarios SRES A1, A1B et A2 utilisés dans le quatrième rapport de l’IPCC (Nakicenovic & Swart, 2000). Ces scénarios précisent l’évolution future des émissions de GES pour le XXI^e siècle. Le scénario SRES A2 est celui où les émissions seront les plus importantes alors que le scénario A1 celui où les émissions seront les moins importantes, le scénario A1B se situant entre les deux. Plus récemment de nouveaux scénarios ont été proposés dans le cadre du dernier rapport de l’IPCC (Moss *et al.*, 2010; IPCC, 2013). Ces scénarios, appelés *Representative Concentration Pathway* (ou RCP), sont les scénarios RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5. Les chiffres identifiant les scénarios RCP correspondent au changement de forçage radiatif (associé aux concentrations de GES présents dans l’atmosphère) prévu pour 2100 par rapport à l’ère pré-industrielle (en Wm^{-2} ; cf. Figure 5a de Moss *et al.*, 2010). Le forçage associé au scénario RCP8.5 est légèrement plus important que celui associé au scénario SRES A2, celui du scénario RCP4.5 comparable au scénario SRES B1, celui du scénario SRES A1B compris entre les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et enfin le forçage associé au scénario RCP2.6 est plus important que celui associé au scénario SRES B1.
- *Modèles climatiques et protocole de simulation* : Il existe deux types de modèles climatiques à savoir les modèles globaux et les modèles régionaux. Les modèles globaux considèrent l’ensemble de la Terre et simulent donc les principaux processus en jeu dans l’évolution du climat. Compte tenu des temps de calcul importants en jeu, leurs résolutions spatiales et temporelles demeurent relativement grossières, généralement de l’ordre de plusieurs centaines de kilomètres et de la journée dans plusieurs cas. Les modèles régionaux, quant à eux, comme leur dénomination l’indique, simulent une région, appelée le domaine de simulation (p. ex. l’Amérique du Nord pour le *Modèle Régional Canadien du Climat* - MRCC) et présentent une résolution spatiotemporelle plus fine et donc plus appropriée pour l’étude des extrêmes de précipitations. Outre le modèle comme tel, plusieurs autres paramètres du protocole de simulation doivent être précisés lorsque l’on réfère à une simulation donnée : le pilote dans le cas d’un modèle régional (le pilote identifie la source des données qui alimente le modèle régional aux frontières du domaine de simulation; il peut s’agir d’un modèle global ou d’une réanalyse), les résolutions spatiales et temporelles des modèles global et régional (si il y a lieu),

le domaine de simulation (s'il y a lieu), le nombre de simulations réalisé (dans le cas où plusieurs conditions initiales sont considérées), le scénario de GES (voir paragraphe précédent) et la période couverte par la simulation. Dans le cas d'analyse multi-modèles, qui consiste à combiner les résultats de plusieurs modèles, les résultats seront évidemment fonction des modèles considérés, de leurs caractéristiques et de la façon dont ces résultats sont combinés (p. ex. les résolutions spatiales peuvent différer d'un modèle à l'autre).

- *Traitements statistiques réalisés sur les sorties de modèles* : Plusieurs indices et traitements statistiques des résultats des modèles sont possibles. Ainsi ce sous-item regroupe, notamment, les indices utilisés, les échelles spatiale et temporelle considérées (analyse aux points de grille, analyse régionale, séries journalières, etc.), les éléments de la méthode utilisée (p. ex. séries des maxima annuels, la distribution statistique utilisée).

Chapitre 3

Revue de littérature : projections des pluies extrêmes

Les études suivantes ont été sélectionnées en fonction de deux critères : (i) l'accès à une information chiffrée sur l'évolution des extrêmes de pluie ; (ii) ces études doivent couvrir en tout ou en partie le Québec ou une région proche. Certaines de ces études sont régionales (i.e. qu'elles ne considèrent qu'une région) alors que d'autres sont planétaires. Dans ce dernier cas, une brève description des projections à l'échelle globale est présentée suivie d'une description des résultats concernant plus spécifiquement les régions couvrant en tout ou en partie le Québec.

Il convient de noter que plusieurs études ont examiné également les modifications appréhendées des courbes IDF en climat futur dans différentes régions du monde. On peut mentionner à titre d'exemples : en Espagne (Rodríguez *et al.*, 2014), au Danemark (Grum *et al.*, 2006; Madsen *et al.*, 2009) ou encore aux États-Unis (Zhu, 2013). Ces études suggèrent, de façon générale, que les pluies extrêmes seront effectivement plus intenses en climat futur et que les augmentations relatives des intensités seront globalement plus importantes pour les courtes durées. Bien qu'intéressantes, ces études ne seront pas discutées plus avant dans le cadre de ce document, les articles consultés et cités touchant plus spécifiquement la région du Québec et de l'est du Canada.

L'étude de Kharin *et al.* (2007) utilise un ensemble de 14 modèles climatiques globaux (Tableau 1 de l'étude ; les modèles considérés sont ceux de l'ensemble *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3* - CMIP3 - excluant les modèles GISS AOM et MIROC3.2(hires)) pour analyser l'évolution de l'intensité journalière de précipitation ayant une période de retour 20 ans. Trois périodes de 20 ans sont considérées : 1981-2000 (période de référence), 2046-2065 et 2081-2100. Les différentes simulations ont été réalisées en utilisant les concentrations observées de GES pour le XX^e siècle et trois scénarios d'émission pour le XXI^e siècle : SRES A1, A1B et A2 (Nakicenovic & Swart, 2000). La résolution spatiale diffère selon le GCM allant de 1.125 ° à 5 ° (résolution médiane aux alentours de 2.8 °). À l'échelle mondiale et en comparaison avec la période 1981-2000, la médiane de l'ensemble des 14 modèles climatiques suggère une hausse des intensités journalières de période de retour de 20 ans comprise entre 7.4% (B1) et 10.5% (A1B) pour la période 2046-2065 et comprise

entre 10.8% (B1) et 19.4% (A2) pour la période 2081-2100. Concernant plus spécifiquement la région Nord Américaine et la région Arctique, région recouvrant des parties du Québec, les augmentations des intensités pour la période 2046-2065 sont comprises entre 5 et 20 % (selon le scénario de GES) et entre 10 et 40 % pour la période 2081-2100 (voir la Figure 15 de Kharin *et al.*, 2007).

Kharin *et al.* (2013) proposent une actualisation de l'étude de Kharin *et al.* (2007) en utilisant les sorties de l'ensemble *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Toutes les simulations utilisent le même forçage radiatif pour la période historique (1850-2005) et trois scénarios d'émission pour le futur (RCP2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5). Le nombre de modèles contenu dans l'ensemble diffère selon le scénario : 22 modèles pour le scénario RCP2.6, 31 modèles pour le scénario RCP4.5 et 29 modèles pour le scénario RCP8.5. Un certain nombre d'améliorations sont présentes dans les modèles CMIP5 en comparaison à ceux de l'ensemble CMIP3. Premièrement, un plus grand nombre de processus sont pris en compte (p. ex. cycle du carbone terrestre et océanique, végétation dynamique). Ces modèles bénéficient aussi de résolutions plus fines. Ainsi la résolution horizontale varie de 0.5625 ° à 3.75 ° (résolution médiane aux alentours de 2 °). À l'échelle mondiale et en comparaison avec la période 1986-2005, la moyenne de l'ensemble CMIP5 montre une hausse des intensités journalières de période de retour de 20 ans de l'ordre de 5.8% (RCP2.6), 7.3%(RCP4.5) et 11.0% (RCP8.5) pour la période 2046-2065 et de 5.7% (RCP2.6), 9.6%(RCP4.5) et 22.0% (RCP8.5) pour la période 2081-2100 (c.f. Fig. S13 du *Supplementary Material*). Pour la région Amérique du Nord, en fonction du scénario RCP (RCP2.6, RCP 4.5 ou RCP 8.5), des hausses des intensités comprises entre 5 et 25% sont prévues pour 2046-2065 et comprises entre 5 et 40 % pour la période 2081-2100 (c.f. Fig. S16 des du *Supplementary Material*). On remarque que cette actualisation prévoit une hausse similaire à celle prévue par l'étude de 2007 sauf pour le scénario RCP2.6 pour lequel les augmentations des intensités demeurent relativement faibles (on rappelle que le scénario RCP2.6 est un scénario plus optimiste que tous les scénarios SRES utilisés dans l'étude de 2007).

Sillmann *et al.* (2013) ont analysé l'évolution de différents indices de température et de précipitations extrêmes à partir des sorties de l'ensemble CMIP5. Trois scénarios de forçage radiatif sont considérés : RCP2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5. Les régions considérées dans le cadre de cette étude sont celles définies par Giorgi & Francisco (2000) (voir la Figure 1 et Tableau 2 de cet article). Deux zones sont pertinentes pour la présente revue de littérature. La première, appelée *East Canada - Greenland*, couvre la partie nord-est de l'Amérique du nord et est comprise entre les 50° N. et nord du 85° de latitude nord et les longitudes 103° O. et 10° O., alors que la seconde, appelée *East North America*, couvre la région est de l'Amérique du Nord (sud du 50° N. et nord du 25° N. et 85° 85 O. et 60° O.). Divers indices associés aux précipitations sont estimés. L'indice RX5DAY (maximum annuel de précipitation cumulée sur cinq jours) montre une hausse comprise entre 5 et 40% (fonction du scénario d'émission de GES, les hausses augmentant en fonction du forçage radiatif) pour la période 2081-2100 en comparaison avec la période 1981-2000 pour la région *East Canada - Greenland* alors que des augmentations de l'ordre de 5 à 20% sont mentionnées pour la région *East North America*. D'autres indices de précipitations extrêmes sont également considérés (p. ex. indice R10mm qui correspond au nombre de jours où le cumul journalier dépasse 10 mm et l'indice R95p qui correspond

au pourcentage du cumul annuel apporté par les pluies journalières dont le cumul dépasse le 95e percentile) mais ne sont pas présentés ici. A noter que seule la période 2081-2100 est considérée dans le cadre de cette étude et que les régions considérées débordent très largement le territoire du Québec et peuvent être difficilement considérées comme représentatives des valeurs régionales.

Le rapport spécial de l'IPCC de 2012 (IPCC, 2012) concerne l'adaptation aux événements climatiques extrêmes. Dans ce cadre, une actualisation des travaux de Kharin *et al.* (2007) a été effectuée. Les 14 modèles de l'ensemble CMIP3 ont été considérés, la différence avec l'étude de Kharin *et al.* (2007) concernant le post-traitement des simulations et en particulier le calcul de l'évolution du niveau de retour 20 ans pour les différentes régions du monde (voir les Annexes 3.A.5 et 3.A.7 de ce rapport). Les résultats concernant les intensités des pluies de période de retour 20 ans pour la zone *East Canada - Greenland* (voir paragraphe précédent) suggèrent des hausses comprises entre 10 et 20% pour la période 2046-2065 (en comparaison avec la période 1981-2000) et entre 10 et 30% à l'horizon 2100 pour les scénarios SRES A1B, B1 et A2 (voir Chapitre 3, Figure 3.7a, p.145).

Le dernier rapport de l'IPCC (IPCC, 2013) n'apporte pas d'information supplémentaire en terme d'augmentation des intensités des pluies extrêmes dans le futur par rapport aux études de Kharin *et al.* (2007) et Kharin *et al.* (2013).

Mailhot *et al.* (2007) ont utilisé les simulations du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC, version 3.7.1) pour le sud du Québec. Ce modèle régional a été piloté à ses frontières par le Modèle de Circulation Générale Canadien (MCGC, version 2). Les simulations du MRCC ont été réalisées à une résolution horizontale de 45 km (vrai à 60 °N) couvrant l'Amérique du Nord (Canada, États-Unis et une partie du Mexique), ce qui représente 201×193 points de grille. La discrétisation temporelle est de 15 minutes. Pour sa part, le modèle global a une résolution horizontale de 1.875 °. Le scénario utilisé pour simuler la période future est le scénario SRES A2. Ces auteurs comparent les différents niveaux de retour obtenus ($2 \text{ ans} < T < 50 \text{ ans}$) pour deux périodes (2041-2070 et 1961-1990) pour différentes durées (2, 6, 12 et 24 heures). Les résultats (cf. Figure 5 de Mailhot *et al.*, 2007) montrent une augmentation des intensités pour la période 2041-2070 comprise entre 5 et 15% avec des incertitudes plus importantes pour les plus grandes périodes de retour.

L'étude de Mailhot *et al.* (2012) représente l'analyse la plus complète des projections climatiques de pluies extrêmes pour le Canada publiée à ce jour. Ces auteurs ont analysé les projections de précipitations extrêmes pour le Canada à partir d'un ensemble de 15 simulations du *North American Regional Climate Change Assessment Program* (NARCCAP ; Mearns *et al.*, 2012). Cet ensemble de simulations visait à produire des simulations régionales à l'échelle de l'Amérique du Nord combinant différents modèles régionaux et globaux. Onze de ces simulations étaient représentatives de la période 1971-2000 et quatre simulations étaient représentatives de la période future 2041-2070. Six modèles régionaux différents sont considérés pilotés par les réanalyses ou des modèles globaux. Les simulations en climat futur utilisent le scénario SRES A2. Puisque les différents modèles régionaux utilisent des grilles différentes, une grille de référence commune de résolution 50 km a été utilisée et les résultats des différentes simulations projetés sur cette grille. Des résultats pour l'ensemble du Canada divisé pour l'occasion en 14 régions climatiques sont présentés. Cinq de ces régions se

trouvent en tout ou en partie au Québec : la région *Southern Arctic Tundra* (SAT) couvre la partie nord du Québec au delà du 55°N ; la région *Northeastern Forest (North)* (NEFN) couvre la partie du Québec située approximativement entre le 52°N et le 55°N ; la région *Northeastern Forest (South)* (NEFS) couvre la partie sud-ouest excluant le corridor de la plaine et du golfe du St-Laurent ; la région *Northeastern Forest (St Lawrence Estuary)* (NEFSLE) couvre la Gaspésie, la Côte-Nord et la Basse-Côte-Nord ; enfin la région *Great Lakes St-Lawrence (Quebec)* (GLSLQ) couvre la partie sud du Québec autour du St-Laurent depuis l'Ontario jusqu'au Bas-St-Laurent. La Figure 3.1 présente une carte localisant ces régions. A noter que les résultats des régions *Great Lakes St-Lawrence (Ontario)* (GLSLO) et *Atlantic Canada* (AC) sont également présentés puisque limitrophe au territoire du Québec. Les séries des maxima annuels (MA) ont été construites pour les durées 6, 12, 24, 72 et 120 heures et les intensités de périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans ont été considérées.

Les hausses estimées à partir de ces travaux sont présentées au Tableau 3.1. Ces hausses varient selon la région, la durée et la période de retour considéré. Les écart-types présentés à ce tableau sont associés aux variations (incertitudes) des estimations provenant des différentes simulations. A noter que toutes les simulations analysés indiquent des augmentations des maxima annuels de pluie en climat futur. Les variations projetées sont comprises, toutes régions, durées et périodes de retour confondues, entre 10 % et 24%.

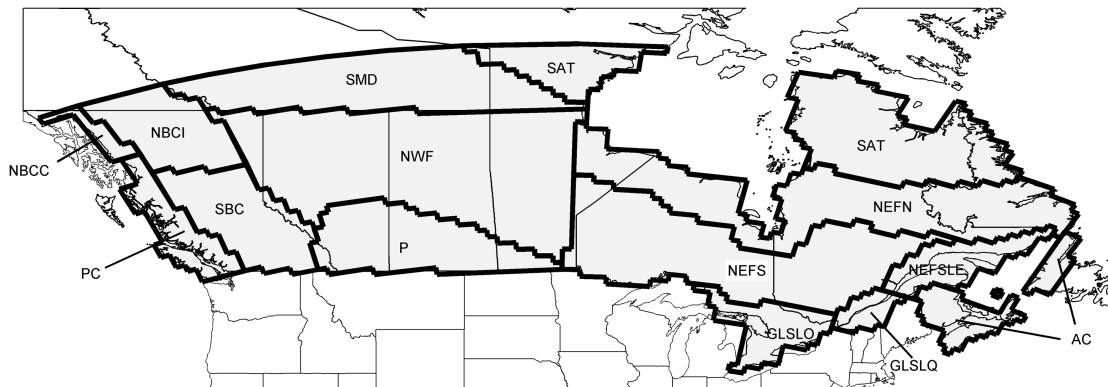


Figure 3.1: Cartes des régions utilisées par Mailhot *et al.* (2012) (NBCC : *North British Columbia (Coast)*; PC : *Pacific Coast*; NBCI : *North British Columbia (Inland)*; SBC : *South British Columbia*; SMD : *South Mackenzie District*; NWF : *Northwestern Forest*; P : *Prairies*; SAT : *Southern Arctic Tundra*; NEFN : *Northeastern Forest (North)*; NEFS : *Northeastern Forest (South)*; NEFSLE : *Northeastern Forest (St Lawrence Estuary)*; GLSLO : *Great Lakes St-Lawrence (Ontario)*; GLSLQ : *Great Lakes St-Lawrence (Quebec)*; AC : *Atlantic Canada*) (carte tirée de Mailhot *et al.*, 2012).

Mladjic *et al.* (2011) ont considéré dix simulations du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC, version de 4e génération) piloté par le Modèle Global Canadien du Climat Version III (CGCM3). Cinq de ces simulations couvrent la période 1961-1990 et cinq la période 2041-2070. Le scénario SRES A2 a été considéré dans ce dernier cas. Les cinq simulations correspondent à

Tableau 3.1: Augmentations projetées pour les intensités de durées 6, 12 et 24 heures (les plages de valeurs définissent les valeurs estimées pour les périodes de retour 2 et 20 ans, les augmentations les plus importantes étant enregistrées pour la période de retour 20 ans) pour les régions couvrant en tout ou en partie le Québec (Figure 3.1). Les valeurs entre parenthèses sont les écarts-types des différentes estimations issues des simulations. Les valeurs retenues dans la colonne 'Toutes durées confondues' sont les valeurs minimales et maximales des fourchettes estimées pour chaque durée et l'écart-type maximal de toutes les durées (valeurs tirées de Mailhot *et al.*, 2012).

Région	6 heures	12 heures	24 heures	Toutes durées confondues
SAT	0.13 - 0.14 (0.02)	0.12 - 0.13 (0.02)	0.11 - 0.13 (0.02)	0.11 - 0.14 (0.02)
NEFN	0.15 - 0.19 (0.02)	0.15 - 0.19 (0.02)	0.14 - 0.17 (0.02)	0.14 - 0.19 (0.02)
NEFS	0.15 - 0.20 (0.03)	0.15 - 0.21 (0.02)	0.15 - 0.20 (0.02)	0.15 - 0.21 (0.03)
NEFSLE	0.10 - 0.11 (0.04)	0.10 - 0.12 (0.04)	0.10 - 0.11 (0.04)	0.10 - 0.12 (0.04)
GLSLQ	0.13 - 0.17 (0.09)	0.12 - 0.16 (0.08)	0.13 - 0.16 (0.07)	0.12 - 0.17 (0.09)
GLSLO	0.19 - 0.24 (0.07)	0.19 - 0.23 (0.06)	0.17 - 0.24 (0.05)	0.17 - 0.24 (0.06)
AC	0.10 - 0.13 (0.04)	0.09 - 0.11 (0.04)	0.07 - 0.08 (0.04)	0.07 - 0.13 (0.04)

Tableau 3.2: Augmentations projetées pour les maxima annuels journaliers de périodes de retour 20, 50 et 100 ans pour les régions couvrant en tout ou en partie le Québec (Figure 3.2). Les valeurs retenues dans la colonne 'Toutes périodes de retour confondues' sont les valeurs minimales et maximales des fourchettes estimées pour chaque période de retour (valeurs tirées de Mladjic *et al.*, 2011).

Région	20 ans	50 ans	100 ans	Toutes périodes de retour confondues
East Arctic (North)	0.16 - 0.18	0.16 - 0.18	0.16 - 0.18	0.16 - 0.18
Northeast Forest (West)	0.11 - 0.13	0.11 - 0.13	0.11 - 0.13	0.11 - 0.13
Northeast Forest (East)	0.16 - 0.18	0.16 - 0.18	0.16 - 0.18	0.16 - 0.18
Great Lakes	0.10 - 0.11	0.12 - 0.13	0.13 - 0.14	0.10 - 0.14
Canadian Maritimes	0.07 - 0.09	0.04 - 0.06	0.00 - 0.02	0.00 - 0.09

cinq réalisations possibles (membres) du modèle CGCM3. Le domaine de simulation du MRCC est l'Amérique du Nord mais l'étude porte plus spécifiquement sur l'analyse des maxima annuels de durées 1, 3 et 5 jours sur le territoire canadien. Les régions définies par Plummer *et al.* (2006) sont utilisées dans cette étude (voir Figure 3.2). Trois périodes de retour sont considérées à savoir 20, 50 et 100 ans. Le Tableau 3.2 présente un résumé des hausses estimées pour les régions couvrant en tout ou en partie le Québec (seuls les résultats pour la durée 1 jour sont présentés).

L'examen des Figures 3.1 et 3.2 montrent que les correspondances suivantes peuvent être établies entre les régions utilisées par Mailhot *et al.* (2012) et Mladjic *et al.* (2011) : 1) *Southern Arctic Tundra* $\approx$ *East Arctic (North)*; 2) *Northeastern Forest (St Lawrence Estuary)* $\approx$ *Northeast Forest East*; 3) *Northeastern Forest (North)* + *Northeastern Forest (South)* $\approx$ *Northeast Forest (West)*; 4) *Great Lakes St-Lawrence (Quebec)* + *Great Lakes St-Lawrence (Ontario)* $\approx$ *Great Lakes* 5) *Atlantic Canada* $\approx$ *Canadian Maritimes*. Le Tableau 3.3 présente une comparaison des valeurs obtenues par Mailhot *et al.* (2012) et Mladjic *et al.* (2011) basée sur ces correspondances pour les maxima

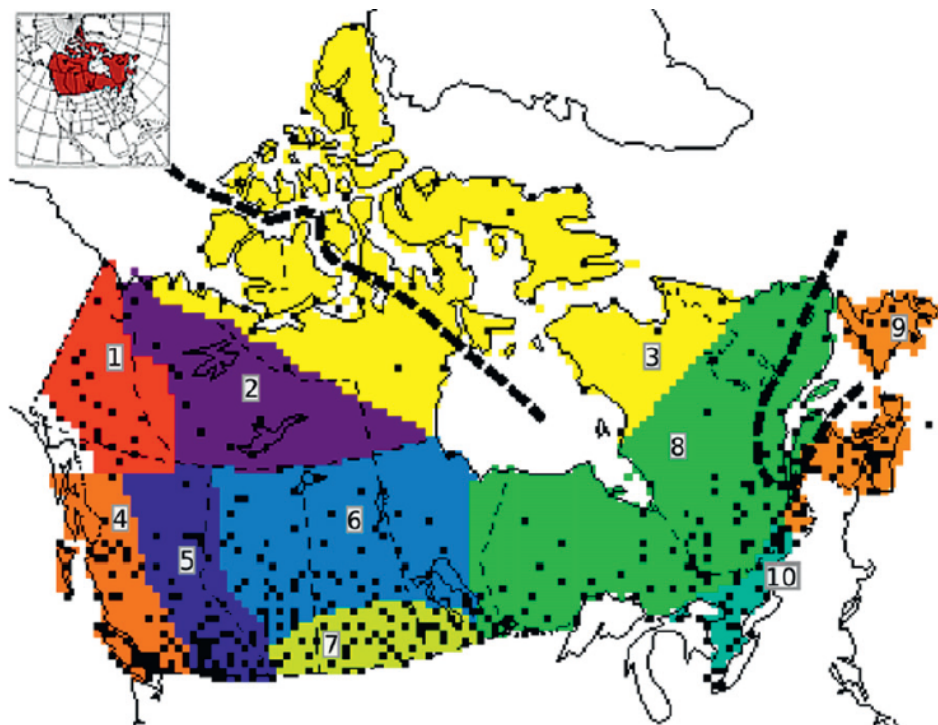


Figure 3.2: Cartes des régions utilisées par Mladjic *et al.* (2011) (1 : Yukon Territory ; 2 : Mackenzie Valley ; 3 : East Arctic ; 4 : West Coast ; 5 : Western Cordillera ; 6 : Northwest Forest ; 7 : Northern Plains ; 8 : Northeast Forest ; 9 : Canadian Maritimes ; 10 : Great Lakes). La région East Arctic est subdivisée en East Arctic 1 située au nord de la ligne en tiret et East Arctic 2 située au sud. De même la région Northeast Forest est divisé en Northeast Forest West située à l'ouest de la ligne pointillée et la région Northeast Forest East située à l'est de cette même ligne. (carte tirée de Mladjic *et al.*, 2011).

annuels de pluie de durée 24 heures et de période de retour 20 ans. Il faut noter que les intervalles présentés pour les estimations provenant de Mailhot *et al.* (2012) correspondent aux écarts-types des valeurs issues des différents simulations. L'examen de ce tableau montre que, bien que les valeurs soient similaires, les intervalles proposées pour plusieurs régions de ne recoupent pas. Rappelons que ces valeurs proviennent de modèles différents et qu'à ce titre il n'est guère étonnant qu'elles soient différentes.

Monette *et al.* (2012) ont également utilisé les séries du NARCCAP pour établir les augmentations de pluies extrêmes à l'échelle de 21 bassins se trouvant au nord du St-Laurent au Québec (à une exception près pour le bassin de la rivière des Outaouais qui couvre en partie l'Ontario). Les deux périodes considérées sont 1971-2000 et 2041-2070 et le scénario d'émission de GES considéré est le scénario SRES A2. Les séries des maxima annuels de durées 1, 3, 5, 7 et 10 jours ont été construites et analysées. Les intensités des pluies correspondant aux périodes de retour 10, 30 et 50 ans ont été estimées pour chacun de ces bassins. Un examen des résultats de Monette *et al.* (2012) suggère des augmentations de l'ordre de 15% à 25% pour l'ensemble des bassins, des durées et des périodes de retour considérés (il demeure toutefois difficile d'extraire des valeurs précises de l'article en question). Aucune structure spatiale particulière n'est cependant perceptible (p. ex.

Tableau 3.3: Comparaison des augmentations pour les intensités de durée 24 heures et de période de retour 20 ans pour les différentes régions du Québec selon Mailhot *et al.* (2012) et Mladjic *et al.* (2011).

Région Mailhot <i>et al.</i> (2012)	Région Mladjic <i>et al.</i> (2011)	Hausse Mailhot <i>et al.</i> (2012)	Hausse Mladjic <i>et al.</i> (2011)
<i>Southern Arctic Tundra</i>	<i>East Arctic (North)</i>	0.11 - 0.15	0.16 - 0.18
<i>Northeastern Forest (St Lawrence Estuary)</i>	<i>Northeast Forest East</i>	0.07 - 0.15	0.16 - 0.18
<i>Northeastern Forest (North) + Northeastern Forest (South)</i>	<i>Northeast Forest West</i>	0.15 - 0.22	0.11 - 0.13
<i>Great Lakes St-Lawrence (Quebec) + Great Lakes St-Lawrence (Ontario)</i>	<i>Great Lakes</i>	0.09 - 0.29	0.10 - 0.11
<i>Atlantic Canada</i>	<i>Canadian Maritimes</i>	0.03 - 0.11	0.07 - 0.09

augmentations plus importantes au sud ; voir Figure 6 de cet article).

L'étude réalisée par Das *et al.* (2013) concerne la ville de London en Ontario, ville située dans le bassin supérieur de la rivière Thames. Ces auteurs ont utilisé les résultats de 27 simulations issues de 11 modèles globaux différents utilisant divers scénarios d'émissions (principalement SRES A1B, B1, A2). Deux périodes ont été considérées à savoir les périodes 1961-1990 et 2071-2100. Ces auteurs recommandent une augmentation des valeurs des courbes IDF (pour les durées comprises entre 1h et 24h) de l'ordre de 30% à l'horizon 2071-2100.

Toreti *et al.* (2013) ont proposé une analyse de l'évolution des intensités des pluies journalières de période de retour 50 ans à partir de huit modèles globaux (résolution 1.5 °) pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (simulations provenant de l'ensemble CMIP5). Les régions considérées par ces auteurs sont celles également utilisées dans le rapport spécial de l'IPCC de 2012 (IPCC, 2012) et par Sillmann *et al.* (2013). Les intervalles indiqués dans ce qui suit correspondent aux valeurs minimales et maximales des hausses moyennes régionales projetées par les différents modèles considérés. En comparaison avec la période 1966-2005, pour la région *East Canada - Greenland* une hausse comprise entre 10 et 40% est attendu pour la période 2020-2059 et entre 10 et 70% pour la période 2060-2099 tout scénario de forçage confondu (cf. Figure 4 de l'article). Dans ce dernier cas, les hausses projetées varient sensiblement selon le scénario de forçage considéré : de 10 à 45% pour le scénario RCP4.5 et de 25 à 70% pour le scénario RCP8.5. Pour la région *East North America*, les hausses projetées pour la période 2020-2059 sont de 0 à 28% (tout scénario de forçage confondu ; les valeurs médianes des hausses pour cette région sont d'environ 20% tant pour le scénario RCP4.5 que pour le scénario RCP8.5) alors que ces mêmes hausses sont de 10 à 25% pour le scénario RCP4.5 et de 10 à 48% pour le scénario RCP8.5. Les valeurs médianes correspondantes sont de 20% pour le scénario RCP4.5 et de 32% pour le scénario RCP8.5.

Hassanzadeh *et al.* (2014) ont analysé la modification des courbes IDF pour la ville de Saskatoon en utilisant des sorties du modèle global canadien (MCGC) et différents scénarios d'émission (SRES A1B, B1, A2). Pour la période future (2010-2100 en comparaison avec la période 1961-1990), une hausse des intensités est globalement attendue mais les résultats présentés ne permettent pas de dégager des conclusions nettes quant aux hausses projetées.

Le Tableau 3.4 récapitule les différentes augmentations prévues en retenant (lorsque possible et à moins d'indication contraire) une période située autour de 2050.

Tableau 3.4: Études recensées sur les projections des pluies extrêmes en climat futur

Référence	Période future (Période de référence)	Scénario(s)	Modèles ou ensembles de modèles considérés	Durée(s)	Variable étudiée ^a	Région ^b	Hausse projetée
Kharin <i>et al.</i> (2007)	2046-2065 (1981-2000)	B1, A1B, A2	CMIP3	Journalier	N_{r20}	Amérique du Nord	entre 5 et 15%
Mailhot <i>et al.</i> (2007)	2041-2070 (1961-1990)	A2	MRCC	2h, 6h, 12h, 24h	$N_{r2}, N_{r5}, N_{r10}, N_{r25}, N_{r50}$	Sud Québec	entre 5 et 15%
Mladjic <i>et al.</i> (2011)	2041-2070 (1971-2000)	A2	MRCC	1, 5 et 10 jours	$N_{r10}, N_{r50}, N_{r100}$	Québec	entre 7 et 18% (1 jour, période de retour 20 ans ; voir Tableau 3.2)
Mailhot <i>et al.</i> (2012)	2041-2070 (1971-2000)	A2	NARCCAP	6h, 12h, 24h, 72h, 120h	$N_{r2}, N_{r5}, N_{r10}, N_{r20}$	Québec	entre 10 et 24% (voir Tableau 3.1)
Monette <i>et al.</i> (2012)	2041-2070 (1971-2000)	A2	NARCCAP	1, 2, 3, 5, 7 et 10 jours	$N_{r10}, N_{r30}, N_{r50}$	Québec	entre 15 et 25%
IPCC (2012)	2046-2065 (1981-2000)	B1, A1B, A2	CMIP3	Journalier	N_{r20}	<i>East Canada - Greenland</i>	entre 10 et 20%
Das <i>et al.</i> (2013)	2071-2100 ^c (1961-1990)	B1, A1B, A2	11 GCM	1h-24h	Courbes IDF	London (Ontario)	30%
Kharin <i>et al.</i> (2013)	2046-2065 (1986-2005)	RCP : 2.6, 4.5, 8.5	CMIP5	Journalier	N_{r20}	Québec	entre 10 et 20% pour scénario RCP4.5
Sillmann <i>et al.</i> (2013)	2081-2100 ^d (1981-2000)	RCP : 2.6, 4.5, 8.5	CMIP5	5 jours	Indice RX5DAY ^e	<i>East Canada - Greenland et East North America</i>	entre 5 et 40% pour <i>East Canada - Greenland</i> et entre 5 et 20% pour <i>East North America</i>
Toreti <i>et al.</i> (2013)	2020-2059 (1966-2005)	RCP : 2.6, 4.5, 8.5	CMIP5	Journalier	N_{r50}	<i>East Canada Greenland et East North America</i>	entre 10 et 40% pour <i>East Canada - Greenland</i> et entre 0 et 28% pour <i>East North America</i>

- a. N_{rX} correspond au maximum annuel de période de retour $T = X$ ans
b. Région où s'applique les hausses indiquées à la colonne 'Hausse projetée'
c. Seule période considérée dans le cadre de cette étude
d. Seule période considérée dans le cadre de cette étude
e. Maximum annuel de précipitation cumulée sur cinq jours

Chapitre 4

Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes IDF au Québec

Les résultats présentés au Chapitre 3 montrent que, globalement, les hausses projetées pour les pluies extrêmes au Québec à l’horizon 2050 varient selon les études mais sont toutes de l’ordre de 10 à 25%. Deux études (Mailhot *et al.*, 2012; Mladjic *et al.*, 2011) présentent un intérêt particulier dans le cadre du présent mandat puisqu’elles proposent une analyse portant plus spécifiquement sur le territoire du Québec, ce qui explique la présentation plus détaillée de ces études au Chapitre 3. Les autres références consultées présentent globalement un portrait assez similaire de la situation (voir Tableau 3.4). À noter, qu’à défaut de valeurs disponibles pour l’horizon 2070-2100, les valeurs recommandées dans ce qui suit s’appliquent à la période 2040-2070. De même, compte tenu des variations rapportées entre les différentes projections d’augmentations, aucune distinction ne sera apportée en fonction de la durée ou de la période de retour. Les valeurs recommandées dans ce qui suit s’appliquent donc indistinctement de la durée et de la période de retour considérées (ce point sera discuté plus avant au Chapitre 5).

La démarche retenue pour fixer les valeurs recommandées a consisté à reprendre les valeurs de Mailhot *et al.* (2012) et Mladjic *et al.* (2011) pour les différentes régions du Québec et à retenir une valeur représentative de la médiane la plus élevée proposée par ces deux études. Pour l’occasion, le Québec a été subdivisé en cinq régions inspirées des régions de Mailhot *et al.* (2012) (Figure 4.1) :

- A : Région nord (nord du 55° N)
- B : Région comprise entre le 51° N et le 55° N
- C : Région sud-est du Québec (estuaire du St-Laurent)
- D : Région ouest du Québec au sud du 51° N)
- E : Région du sud du Québec

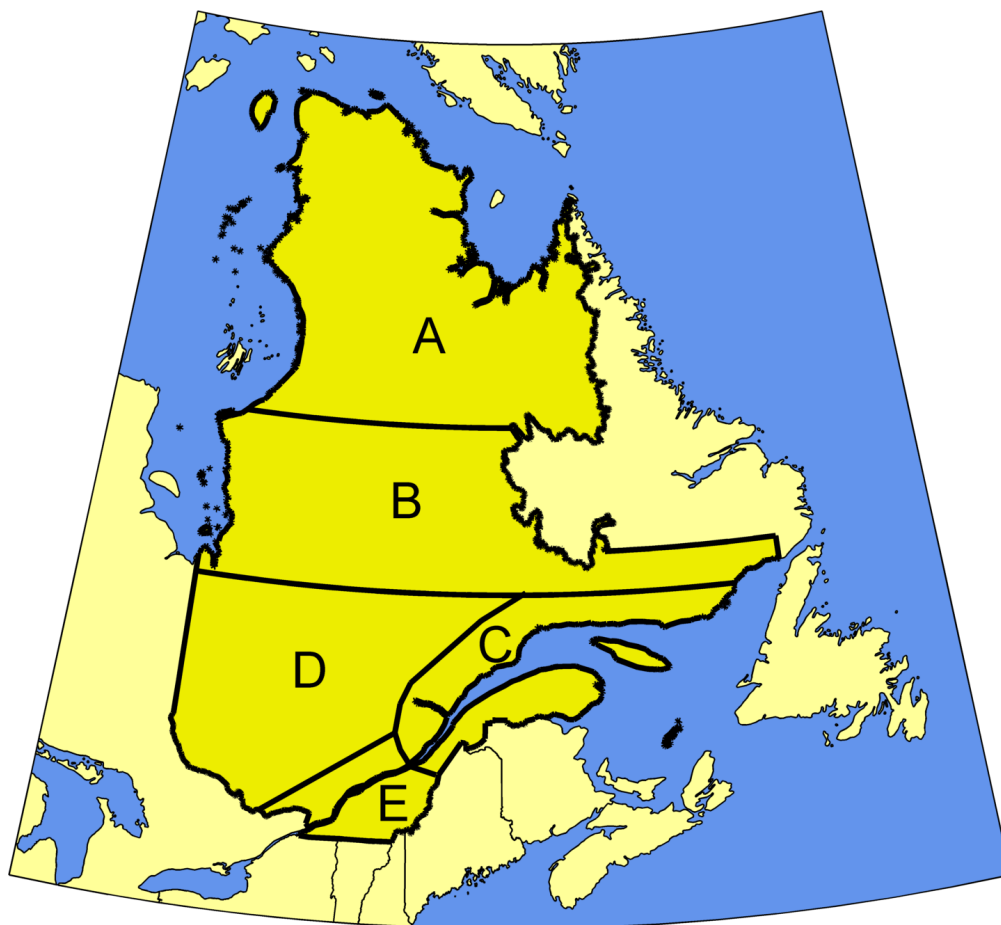


Figure 4.1: Cartes des régions utilisées pour les majorations des courbes IDF

Tableau 4.1: Majorations recommandées pour les diverses régions du Québec à l'horizon 2050 (voir la carte de la Figure 4.1 pour les délimitations de ces régions).

Région	Augmentation recommandée
A - Région au nord du 55° N	18 %
B - Région comprise entre le 51° N et le 55° N	18 %
C - Estuaire du St-Laurent	18 %
D - Région ouest du Québec au sud du 51° N)	18 %
E - Région sud du Québec	20 %

Le Tableau 4.1 présente les majorations recommandées en fonction des différentes régions. Pour la région du sud du Québec (région E de la Figure 4.1), la hausse recommandée est plus élevée que celles proposées dans les deux études mentionnées plus haut afin de tenir compte des hausses très significatives projetées pour la région limitrophe de l’Ontario (région *Great Lakes St-Lawrence (Ontario)*, GLSLO ; voir Tableau 3.1). Il faut bien comprendre que les différences de majorations entre les différentes régions rapportées dans le Tableau sont représentatives des projections actuellement disponibles.

Chapitre 5

Conclusions et perspectives

Une hausse des intensités des pluies intenses est appréhendée en climat futur, résultat de l’augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l’atmosphère terrestre. Ces hausses significatives doivent être prises en compte dans un contexte de conception d’ouvrages hydrauliques dont les durées de vie utiles sont comparables à l’échelle temporelle pendant laquelle ces modifications aux pluies extrêmes se manifesteront. C’est pourquoi le *Ministère des Transports du Québec* a mandaté l’INRS afin de formuler des recommandations quant aux majorations à appliquer aux courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) en climat futur afin de tenir compte des changements climatiques au Québec. Une revue de la littérature scientifique a donc été conduite et les recommandations établies sur la base des études actuellement disponibles. Le territoire québécois a été subdivisé en cinq régions et le Tableau 4.1 rend compte des majorations proposées aux courbes IDF actuelles. Ces majorations s’appliquent à toutes les durées et périodes de retour.

Il est important de mentionner que les valeurs recommandées reposent sur les projections actuellement disponibles et que, compte tenu de l’évolution rapide des connaissances et du nombre croissant de projections disponibles, elles devront sans doute faire l’objet de révision périodiques. A cet égard, un certain nombre de points importants doivent être également soulignés :

- *Résolution spatiale et temporelles des modèles climatiques* : Les résolutions spatiale et temporelle actuelles des modèles climatiques (autant globaux que régionaux) ne permettent pas d’établir de projections fiables pour les courtes durées (moins de 3 heures) ou à des échelles spatiales fines (la résolution spatiale des modèles régionaux est de l’ordre actuellement de 45 km). Les majorations proposées ont été établies en comparant des quantiles de différentes durées en climat futur et en climat historique pour des durées généralement égale ou plus grandes à 1 jour sur diverses régions climatiques (la seule étude au Québec où les durées de moins d’un jour sont considérées est celle de Mailhot *et al.*, 2012; pour des projections à l’échelle infra-journalières ailleurs dans le monde voir également Grum *et al.*, 2006; Larsen *et al.*, 2009). Les majorations proposées sont donc ‘extrapolées’ aux durées plus petites à défaut d’avoir une information pertinente à ce sujet. Il faut garder à l’esprit que les augmentations des intensités des pluies extrêmes rapportées dans ces études pourraient en effet sous-estimer

les augmentations pour les plus courtes durées et aux échelles spatiales plus fines. D'autres projections devraient être disponibles sous peu permettant d'investiguer les pluies intenses de plus courtes durées et à plus fine résolution spatiale. A titre d'exemple, des simulations du MRCC à 15 km de résolution spatiale sont actuellement en cours dont l'analyse devraient nous permettre d'en savoir davantage sur les modifications projetées aux plus fines échelles temporelles.

- *Principales sources d'incertitudes* : Plusieurs sources d'incertitudes sont à considérer lors de l'interprétation et de l'utilisation des séries de modèles climatiques et de toute information qui en découle. Généralement, trois grandes sources d'incertitudes sont identifiées (Hawkins & Sutton, 2009; Deser *et al.*, 2012a,b) : 1) les incertitudes associées aux modèles climatiques (résolutions spatiale et temporelle, représentations approximatives ou incomplètes de certains processus, paramétrisations, etc.) qui font en sorte que différents modèles climatiques soumis au même forçage donneront des réponses différentes ; 2) les incertitudes liées à la variabilité naturelle (ou variabilité interne) du climat i.e. la variabilité naturelle du système climatique en l'absence de tout forçage ; 3) les incertitudes quant aux émissions futures des GES. (Hawkins & Sutton, 2009) ont montré que, pour les températures, mais ce résultat vaut sans doute pour les précipitations, les incertitudes sur les scénarios de GES dominant à long terme (i.e. pour les projections à la fin du XXI^e siècle) alors que les deux autres types d'incertitudes dominant à court terme. Par ailleurs, si les incertitudes relatives aux émissions futures et aux modèles sont en principe 'réductibles', i.e. qu'elles pourront être éventuellement réduites, il en va autrement pour les incertitudes liées à la variabilité naturelle. En effet, dans ce cas, bien que ces incertitudes puissent être évaluées (p. ex. à travers la réalisation de plusieurs simulations utilisant différentes conditions initiales ; voir Lucas-Picher *et al.*, 2008), elles demeurent intrinsèquement irréductibles.

La prise en compte des incertitudes associées aux modèles se fait en combinant les résultats de simulations de plusieurs modèles (comme par exemple pour les études de Kharin *et al.*, 2007, 2013; Sillmann *et al.*, 2013; Mailhot *et al.*, 2012). Dans le cas des incertitudes provenant de la variabilité naturelle, tel que mentionné plus haut, elles sont évaluées en générant plusieurs simulations à partir de conditions initiales différentes (Lucas-Picher *et al.*, 2008) telle que dans l'étude de Mladjic *et al.* (2011) où cinq simulations pilotées chacune par un membre (simulations avec conditions initiales différentes) sont analysées. Enfin les incertitudes associées aux scénarios d'émission de GES sont estimées en considérant plusieurs scénarios possibles telles que dans les études de Kharin *et al.* (2007, 2013) et Sillmann *et al.* (2013). Il faut noter finalement que, compte tenu des temps de calculs importants, le nombre de simulations de modèles régionaux du climat actuellement disponibles demeurent encore modeste et qu'il reste difficile d'apprécier les incertitudes liées à la variabilité naturelle et aux types de modèles. Les ensembles de modèles globaux (tel CMIP5) permettent une investigation des incertitudes liées au modèles dans ce cas mais le faible nombre de simulations disponibles pour les modèles régionaux ne permet pas encore une analyse approfondie. Le programme *Coordinated Re-*

gional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) pourrait apporter des réponses à cet égard puisque ce projet vise à réaliser plusieurs simulations à partir de modèles régionaux sur plusieurs domaines dont l'Amérique du Nord.

- *Recommandations à l'horizon 2070-2100* : Les projections recensées basées sur des simulations de modèles régionaux ne présentent pas de résultats à l'horizon 2070-2100 bien que les simulations couvrent souvent la période jusqu'à la fin du XXI^e siècle. Dans ce cas, tel qu'expliqué au paragraphe précédent, les émissions de GES sont déterminants quant à l'évolution future des extrêmes de pluie. Pour les études utilisant les modèles globaux les résultats rapportées sont : +5 % à 22% selon le modèle et le scénario de GES pour Kharin *et al.* (2007) (période 2081-2100) ; de l'ordre de 10% à 20% pour le scénario RCP4.5 selon Kharin *et al.* (2013) (période 2081-2100) ; le rapport spécial de l'IPCC de 2012 (IPCC, 2012) suggère des augmentations des intensités des pluies de période de retour 20 ans pour la zone *East Canada - Greenland* entre 10 et 30% à l'horizon 2100 pour les scénarios SRES A1B, B1 et A2 ; Sillmann *et al.* (2013) rapportent des hausses de l'indice RX5day comprise entre 5 et 20% selon le scénario de forçage climatique à l'échelle annuelle pour la région *East North America* alors que les valeurs correspondantes pour la région *East Canada - Greenland* sont de 5 à 40% ; enfin Toreti *et al.* (2013) suggèrent des hausses de 10 à 45% pour le scénario RCP4.5 et de 25 à 70% pour le scénario RCP8.5 alors que pour la région *East North America*, les hausses projetées pour cette même période sont de 10 à 25% pour le scénario RCP4.5 et de 10 à 48% pour le scénario RCP8.5 (les valeurs médianes correspondantes sont de 20% pour le scénario RCP4.5 et de 32% pour le scénario RCP8.5). Ces derniers résultats sont très révélateurs et montrent bien que les hausses projetées dépendent fortement du forçage considéré (scénario RCP) et que la variabilité des résultats selon les modèles augmentent sensiblement pour à l'horizon 2100. Ces diverses considérations et les incertitudes importantes associées aux projections à l'horizon 2070-2100 suggèrent de considérer, pour le moment, les mêmes majorations à l'horizon 2070-2100 que celle proposés à l'horizon 2040-2070 (Tableau 4.1). Ces valeurs devront cependant être revues à la lumière des nouvelles projections disponibles sous peu et de l'évolution effective des émissions de GES dans les décennies à venir.
- *Majorations en fonction de la période de retour* : Les résultats des différentes études recensées montrent que les résultats peuvent varier en fonction de la période de retour (voir par exemple Mailhot *et al.*, 2012). Cependant ces variations sont généralement faibles et peu significatives en regard des autres incertitudes en jeu ce qui explique qu'il est recommandé d'utiliser les majorations proposées pour toutes les périodes de retour généralement considérées en conception hydraulique.

Références

- Allen MR & Ingram WJ (2002). Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6903):224–232.
- Das S, Millington N & Simonovic S (2013). Distribution choice for the assessment of design rainfall for the city of London (Ontario, Canada) under climate change. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(2):121–129. DOI :10.1139/cjce-2011-0548.
- Deser C, Knutti R, Salomon S & Phillips A (2012a). Communication of the role of natural variability in future north american climate. *Nature Climate Change*, 2(November):775–779. DOI :10.1038/NCLIMATE1562.
- Deser C, Phillips A, Bourdette V & Teng H (2012b). Uncertainty in climate change projections : the role of internal variability. *Climate Dynamics*, 38(3-4):527–546. DOI :10.1007/s00382-010-0977-x.
- Giorgi F & Francisco R (2000). Uncertainties in regional climate change prediction : a regional analysis of ensemble simulations with the HADCM2 coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, 16(2-3):169–182.
- Grum M, Jorgensen AT, Johansen RM & Linde JJ (2006). The effect of climate change on urban drainage : an evaluation based on regional climate model simulation. *Water Science & Technology*, 54(6-7):9–15. DOI :10.2166/wst.2006.592.
- Gutowski WJ, Takle ES, Kozak KA, Patton JC, Arritt RW & Christensen JH (2007). A possible constraint on regional precipitation intensity changes under global warming. *Journal of Hydrometeorology*, 8(6):1382–1396. DOI :10.1175/2007JHM817.1.
- Haerter JO, Berg P & Hagemann S (2010). Heavy rain intensity distributions on varying time scales and at different temperatures. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 115(D17102). DOI :10.1029/2009JD013384.
- Hassanzadeh E, Nazemi A & Elshorbagy A (2014). Quantile-based downscaling of precipitation using genetic programming : Application to IDF curves in Saskatoon. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(5):943–955. DOI :10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000854.
- Hawkins E & Sutton R (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8):1095–1107. DOI :10.1175/2009bams2607.1.
- IPCC (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.

- IPCC (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*. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kharin V, Zwiers F, Zhang X & Hegerl G (2007). Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate*, 20(8):1419–1444. DOI :10.1175/JCLI4066.1.
- Kharin VV, Zwiers FW, Zhang X & Wehner M (2013). Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Climatic Change*, 119(2):345–357. DOI :10.1007/s10584-013-0705-8.
- Larsen AN, Gregersen IB, Christensen OB, Linde JJ & Mikkelsen PS (2009). Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change. *Water Science & Technology*, 60(9):2205–2216. DOI :10.2166/wst.2009.650.
- Lenderink G & van Meijgaard E (2008). Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8):511–514. DOI :10.1038/ngeo262.
- Loriaux JM, Lenderink G, De Roode S & Siebesma AP (2013). Understanding convective extreme precipitation scaling using observations and an entraining plume model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 70(11):3641–3655. DOI :10.1175/JAS-D-12-0317.1.
- Lucas-Picher P, Caya D, de Elia R & Laprise R (2008). Investigation of regional climate models’ internal variability with a ten-member ensemble of 10-year simulations over a large domain. *Climate Dynamics*, 31(7-8):927–940. DOI :10.1007/s00382-008-0384-8.
- Madsen H, Arnbjerg-Nielsen K & Mikkelsen P (2009). Update of regional intensity-duration-frequency curves in Denmark : Tendency towards increased storm intensities. *Atmospheric Research*, 92(3):343–349. DOI :10.1016/j.atmosres.2009.01.013.
- Mailhot A, Beauregard I, Talbot G, Caya D & Biner S (2012). Future changes in intense precipitation over Canada assessed from multi-model NARCCAP ensemble simulations. *International Journal of Climatology*, 32(8):1151–1163. DOI :10.1002/joc.2343.
- Mailhot A, Duchesne S, Caya D & Talbot G (2007). Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, 347(1-2):197–210. DOI :10.1016/j.jhydrol.2007.09.019.
- Mearns LO, Arritt R, Biner S, Bukovsky MS, McGinnis S, Sain S, Caya D, Correia, James J, Flory D, Gutowski W, Takle ES, Jones R, Leung R, Moufouma-Okia W, McDaniel L, Nunes AMB, Qian Y, Roads J, Sloan L & Snyder M (2012). The North American Regional Climate Change Assessment Program Overview of Phase I Results. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(9): 1337–1362.
- Mladjic B, Sushama L, Khaliq MN, Laprise R, Caya D & Roy R (2011). Canadian RCM projected changes to extreme precipitation characteristics over Canada. *Journal of Climate*, 24(10):2565–2584. DOI :10.1175/2010jcli3937.1.

- Monette A, Sushama L, Khaliq MN, Laprise R & Roy R (2012). Projected changes to precipitation extremes for northeast Canadian watersheds using a multi-RCM ensemble. *Journal of Geophysical Research*, 117. DOI :10.1029/2012JD017543.
- Moss R, Edmonds J, Hibbard K, Manning M, Rose S, van Vuuren D, Carter T, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl G, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith S, Stouffer R, Thomson A, Weyant J & Wilbanks T (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282):747–756. DOI :10.1038/nature08823.
- Nakicenovic N & Swart R (2000). Special report on emissions scenarios. *Special Report on Emissions Scenarios, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, Cambridge University Press, Cambridge, UK, July 2000, 612 pp.*
- O’Gorman PA & Schneider T (2009). The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(35):14773–14777. DOI :10.1073/pnas.0907610106.
- Pall P, Allen MR & Stone DA (2007). Testing the Clausius-Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO₂ warming. *Climate Dynamics*, 28(4):351–363. DOI :10.1007/s00382-006-0180-2.
- Panthou G, Mailhot A, Laurence E & Talbot G (2014). Relationship between surface temperature and extreme rainfalls : a multi-timescale and event-based analysis. *Journal of Hydrometeorology*. Accepté pour publication.
- Plummer DA, Caya D, Frigon A, Côté H, Giguère M, Paquin D, Biner S, Harvey R & de Elia R (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate*, 19(13):3112–3132.
- Rodríguez R, Navarro X, Casas M, Ribalaygua J, Russo B, Pouget L & Redano A (2014). Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona (Spain). *International Journal of Climatology*, 34(3):643–654. DOI :10.1002/joc.3712.
- Sillmann J, Kharin VV, Zwiers FW, Zhang X & Bronaugh D (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble : Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 118(6):2473–2493. DOI :10.1002/jgrd.50188.
- Singleton A & Toumi R (2013). Super-Clausius-Clapeyron scaling of rainfall in a model squall line. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(671):334–339. DOI :10.1002/qj.1919.
- Sun Y, Solomon S, Dai A & Portmann R (2007). How often will it rain? *Journal of Climate*, 20(19):4801–4818. DOI :10.1175/JCLI4263.1.
- Toreti A, Naveau P, Zampieri M, Schindler A, Scoccimarro E, Xoplaki E, Dijkstra HA, Gualdi S & Luterbacher J (2013). Projections of global changes in precipitation extremes from Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 models. *Geophysical Research Letters*, 40(18):4887–4892. DOI :10.1002/grl.50940.
- Trenberth K, Dai A, Rasmussen R & Parsons D (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9):1205–1217. DOI :10.1175/BAMS-84-9-1205.

- Utsumi N, Seto S, Kanae S, Maeda EE & Oki T (2011). Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? *Geophysical Research Letters*, 38(L16708):1–5. DOI :10.1029/2011GL048426.
- Zhu J (2013). Impact of climate change on extreme rainfall across the United States. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(10):1301–1309. DOI :10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000725.