

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT

Outils facilitant les analyses des risques aux infrastructures posés par le climat

PAR
Alain MAILHOT
Guillaume TALBOT
Samuel BOLDUC

RAPPORT FINAL

DÉCEMBRE 2024

Table des matières

Remerciements	v
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xi
Abréviation	xiii
1 - Introduction	1
2 - Fiches techniques	3
3 - Considérations générales	5
3.1 Ensemble CMIP6	5
3.2 Ensemble CORDEX.....	6
3.3 Période de référence et périodes futures.....	7
3.4 Grille commune	7
4 - Précipitations extrêmes en climat futur	9
4.1 Ensemble CMIP6	9
4.1.1 Variations futures des MAP aux points de grille des modèles	9
4.1.2 Variations futures des MAP aux points de la grille commune	12
4.1.3 Variabilité inter-modèle des MAP	15
4.2 Ensemble CORDEX.....	18
4.2.1 Variations futures des MAP aux points de grille des modèles	18
4.2.2 Variations futures des MAP aux points de la grille commune	20
4.2.3 Variabilité inter-modèle des MAP	21
5 - Relations température-précipitation	25
5.1 Représentation mathématique de la relation T-P	25
5.2 Évolution future des températures moyennes annuelles	26

5.3 Coefficients de scaling aux points de grille des modèles	30
5.4 Coefficients de scaling aux points de la grille commune	32
5.5 Impact de la durée et de la période de retour	35
5.6 Régionalisation des coefficients de scaling	40
5.7 Facteurs de majoration en fonction de la durée et de la période de retour	42
6 - Procédure d'estimation des maxima annuels de précipitation en climat futur	45
6.1 Principe général	45
6.2 Sélection de l'horizon futur, de la période de référence et du scénario de forçage radiatif	45
6.3 Estimation du coefficient de scaling α_j	46
6.4 Estimation de la variation de température moyenne annuelle $\Delta T_{jH, H1, S}$	46
6.5 Intensités des maxima annuels de précipitation en climat de référence	47
6.6 Comparaison des variations des MAP simulés et des variations des MAP estimés à partir l'approche proposée	47
7. Exemple d'application	51
8. Conclusion	53
Références	59
ANNEXE A – Fiches techniques	61
ANNEXE B - Modèles et simulations de l'ensemble CMIP6 sélectionnés	107

Remerciements

Des remerciements sont adressés aux membres du comité consultatif : Maeva Ambros (CERIU), Nathalie Bleau (Ouranos), Marie-Ève Boucher (Ville de Québec), Catherine Dubois (Société québécoise des infrastructures), Alexis Dufour et Jean-Philippe Martin (Hydro-Québec), Josée Emond et Daniel Lavallée (Ministère des transports et de la mobilité durable), Guy Félio (Consultant), Réjean Fortin (Ville de l'Anse-St-Jean), François Groux (Fluvio), Annie Lamalice (Infrastructure Canada), Emma Poirier (CLIMATlantic), Gilles Rivard (Lasalle | NHC).

Des remerciements sont également adressés à ceux et celles ayant participé à la rédaction des fiches thématiques et aux différentes rencontres tout au long du projet : Justine Beudart (CERIU), Ursule Boyer-Villemare, Éline Brière et Catherine Frizzle (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs), Léa Braschi (CBCL), Clara Champalle et Isabelle Charron (Ouranos), Pascal Lavoie (Infrastructure Canada), Pascal Marceau (MSP), Adrian Prado (ClimAtlantic).

Liste des figures

- Figure 3.1 - Grille commune couvrant le Canada ($1^\circ \times 1^\circ$). Seuls les points de grille terrestres sont représentés. 8
- Figure 4.1 - Distributions (box-plots) des variations relatives des MAP 1 jour – 2 ans (MAP futur – MAP référence)/MAP référence) aux différents points de grille des modèles pour les simulations utilisant le : a) SSP-4.5 ; b) SSP-8.5. A noter les échelles des x différentes des Figures 4.1a et 4.1b. 11
- Figure 4.2 - Distributions (box-plots) des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans aux points de grille des différents modèles entre la période 1950-1979 et la période de référence (1980-2009). [(MAP P1 – MAP référence)/MAP référence]. 12
- Figure 4.3 - Distributions (box plots) des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans simulées par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune entre les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 pour les SSP-4.5, SSP-7.0 et SSP-8.5 et entre la période 1980-2009 et la période 1950-1979. 14
- Figure 4.4 - Distributions (box plots) des variations relatives des MAP de durées 1 jour à 5 jours (abscisses) et de période de retour 2 à 20 ans (box-plots) simulées par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune entre la période future 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 pour le SSP-8.5. 14
- Figure 4.5 - Cartes des variations relatives normalisées des MAP 1 jour - 2 ans aux points de la grille commune pour les périodes 2020-2039 (1^e colonne), 2040-2069 (2^e colonne) et 2070-2099 (3^e colonne) et les SSP-4.4 (1^e ligne), SSP-7.0 (2^e ligne) et SSP-8.5 (3^e ligne). Les variations normalisées sont définies comme les différences entre les valeurs aux points de grille et la médiane sur l'ensemble des points de grille (ces dernières sont indiquées entre parenthèses au-dessus des cartes). 15
- Figure 4.6 - Distributions (box plots) des ET des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans entre les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 simulées par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune. 16
- Figure 4.7 - Distributions (box plots) des CV des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans entre les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 simulées par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune. 17
- Figure 4.8 - Cartes des CV des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans aux points de la grille commune simulés par l'ensemble CMIP6 pour les périodes 2020-2039 (1^e colonne), 2040-2069 (2^e colonne) et 2070-2099 (3^e colonne) et les SSP-4.5 (1^e ligne), SSP-7.0 (2^e ligne) et SSP-8.5 (3^e ligne). 18
- Figure 4.9 - Distributions (box-plots) des variations relatives (MAP futur – MAP référence)/MAP référence) aux différents points de grille des : a) MAP 1 heure – 2 ans pour les cinq modèles CORDEX avec des séries de précipitations horaires ; b) MAP 1 jour – 2 ans pour les sept simulations CORDEX avec des précipitations horaires ou aux trois heures (Tableau 3.2). Toutes ces simulations utilisent le scénario RCP-8.5. 19
- Figure 4.10 - Distributions (box plots) des variations relatives entre les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 [MAP futur – MAP référence]/MAP référence] des MAP 1 heure - 2 ans (en bleu) et des MAP 1 jour - 2 ans (en rose) simulés par l'ensemble CORDEX

(RCP-8.5) et des MAP 1 jour – 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 (SSP-8.5) (en vert) aux points de la grille commune.	21
Figure 4.11 - Distributions (box plots) des variations relatives entre la période 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 [MAP futur – MAP référence]/MAP référence] des MAP de durées 1 heure, 2 heures, 6 heures, 12 heures et 24 heures et de période de retour 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX (RCP-8.5) aux points de la grille commune.....	21
Figure 4.12 - Distributions (box plots) aux points de la grille commune des écarts-types des variations relatives entre les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 des MAP 1 heure – 2 ans et des MAP 1 jour – 2 ans simulées par l'ensemble CORDEX -8.5) et des MAP 1 jour – 2 ans simulées par l'ensemble CMIP6 SSP-8.5).....	22
Figure 4.13 - Distributions (box plots) aux points de la grille commune des coefficients de variation des variations relatives entre les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 des MAP 1 heure – 2 ans et des MAP 1 jour – 2 ans simulées par l'ensemble CORDEX (RCP-8.5) et des MAP 1 jour – 2 ans simulées par l'ensemble CMIP6 (SSP-8.5).	23
Figure 4.14 - Cartes des CV des variations relatives aux points de la grille commune des MAP 1 h - 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX (1 ^{ère} ligne), des MAP 1 j - 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX (2 ^e ligne) et des MAP 1 j - 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 (3 ^e ligne) entre les périodes 2010-2039 (1 ^e colonne), 2040-2069 (2 ^e colonne) et 2070-2099 (3 ^e colonne) et la période de référence 1980-2009.	24
Figure 5.1 - Distributions (box-plots) des variations des TMA aux points de grille des modèles pour les périodes 2040-2079 et 2070-2099 : a) pour les modèles CMIP6 soumis au SSP-4.5 ; b) pour les modèles CMIP6 selon le SSP-8.5 (partie en-dessous de la ligne horizontale en tirets) et les modèles CORDEX selon le RCP-8.5 (partie au-dessus de la ligne horizontale en tirets).	28
Figure 5.2 - Distributions (box plots) des variations des températures moyennes annuelles aux points de la grille commune simulées par l'ensemble CMIP6 entre les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 pour le SSP-4.5 (en bleu), le SSP-7.0 (en rose) et le SSP-8.5 (en vert) et par l'ensemble CORDEX pour le RCP-8.5.	28
Figure 5.3 - Cartes des variations des TMA aux points de la grille commune simulées par l'ensemble CMIP6 selon les SSP-4.5 (1 ^e ligne), SSP-7.0 (2 ^e ligne) et SSP-8.5 (3 ^e ligne) et par l'ensemble CORDEX (4 ^e ligne) selon le RCP-8.5 pour les périodes 2010-2039 (1 ^e colonne), 2040-2069 (2 ^e colonne) et 2070-2099 (3 ^e colonne).	29
Figure 5.4 - Distributions (box-plots) des variations des coefficients de scaling (α) des MAP 1 jour – 2 ans aux points de grille des modèles CMIP6 pour les périodes 2040-2079 et 2070-2099 selon les scénarios : a) SSP-4.5 ; b) SSP-8.5.....	31
Figure 5.5 - Distributions (boxplots) des CS (%/°C) aux points de grille des modèles CORDEX pour les périodes 2040-2069 et 2070-2099 et le RCP-8.5 associés aux : a) MAP 1 heure – 2 ans et b) MAP 1 jour – 2 ans.....	32
Figure 5.6 - Distributions (box plots) des CS (%/°C) estimés à partir des MAP 1 jour - 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 (SSP-4.5, SSP-7.0, SSP-8.5) et par l'ensemble CORDEX (RCP-8.5) aux points de la grille commune pour les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099.....	33

Figure 5.7 - Cartes des α_j (%/°C) estimés à partir des MAP 1 jour - 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune selon les SSP-4.5 (1 ^e ligne), SSP-7.0 (2 ^e ligne) et SSP-8.5 (3 ^e ligne) et à partir des MAP 1 jour - 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX selon le RCP-8.5 (4 ^e ligne) pour les périodes 2010-2039 (1 ^e colonne), 2040-2069 (2 ^e colonne) et 2070-2099 (3 ^e colonne).	34
Figure 5.8 - Distributions (box plots) des CS aux points de la grille commune pour les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 associés aux : a) MAP de durées 1 jour à 5 jours et de période de retour 2 à 20 ans simulés par l'ensemble CMIP6 pour le SSP-8.5; b) MAP de durées 1 heure à 5 jours et de période de retour 2 à 20 ans simulés par l'ensemble CORDEX pour le RCP-8.5. A noter que dans ce dernier cas l'axe des y a été tronqué à 12%/°C par souci de clarté.	36
Figure 5.9 - Fonctions de répartition des ratios $\delta\alpha$ (équation 5.3) aux points de la grille commune associées aux MAP de durée 1 jour (1 ^e colonne) et 5 jours (2 ^e colonne) et de période de retour 10 ans (1 ^e et 3 ^e lignes) et 20 ans (2 ^e et 4 ^e lignes) et simulées par les ensembles CMIP6 et CORDEX pour les périodes 2040-2069 (1 ^e et 2 ^e lignes) et 2070-2099 (3 ^e et 4 ^e lignes). Les médianes des distributions sont indiquées sur chaque graphique.	37
Figure 5.10 - Cartes des α_j pour les durées 1 jour (1 ^e colonne) et 5 jours (2 ^e colonne) et les périodes de retour 2 ans (1 ^e et 3 ^e lignes) et 20 ans (2 ^e et 4 ^e lignes) à l'horizon 2070-2099 simulées par l'ensemble CMIP6 (deux premières lignes) selon le SSP-8.5 et par l'ensemble CORDEX (deux dernières lignes) selon le RCP-8.5.	39
Figure 5.11 - Régionalisation des CS (voir Tableau 5.2).	41
Figure 5.12 - Distributions (box plots) des CS des différentes régions de la Figure 5.11 aux points de la grille commune.	41
Figure 5.13 - Facteur de majoration $\beta_{d,T}$ des CS en fonction des durées pour différentes périodes de retour. A noter que l'échelle des x est logarithmique.	44
Figure 6.1 - Régionalisation des α de durée 1 jour (voir Tableau 6.1).	46
Figure 6.2 - Distributions des écarts $\Delta MAP_{jd, T, H, S}$ aux points de la grille commune entre les variations des MAP de durées 1 heure (1 ^e ligne), 12 heures (2 ^e ligne), 1 jour (3 ^e ligne) et 5 jours (4 ^e ligne) et de périodes de retour 2 ans (1 ^e colonne) et 20 ans (2 ^e colonne) calculées à partir de la relation T-P (équation 6.1) et les MAP estimés à partir des ensembles CMIP6 (durées 1 à 5 jours) et CORDEX (durées 1 heure à 5 jours) pour les différents horizons et scénarios de forçage radiatif.	49

Liste des tableaux

Tableau 3.1 - Nombre de modèles globaux avec une simulation en climat historique et au moins une simulation en climat futur en fonction des différents scénarios SSP simulés pour les variables températures et précipitations.	5
Tableau 3.2 - Liste et caractéristiques des simulations de l'ensemble CORDEX utilisées. A noter que les séries de températures de ces simulations sont journalières.....	7
Tableau 5.1 - Médianes des variations moyennes de température (°C) simulées par l'ensemble CMIP6 sur le territoire d'étude en fonction du SSP et de l'horizon futur considérés et selon la saison. Les valeurs entre crochets correspondent aux plus petites et plus grandes hausses projetées par les modèles (DJF; décembre, janvier et février, MAM; mars, avril et mai, JJA; juin, juillet et août, SON : septembre, octobre et novembre).	26
Tableau 5.2 - Valeurs médianes, moyennes et écarts-types des CS régionaux (voir Figure 5.11 pour une carte des régions).....	42
Tableau 5.3 - Facteurs de majoration des CS selon les durées et les périodes de retour.	43
Tableau 6.1 - Valeurs régionales des α (%/°C) de durée 1 jour.....	47
Tableau 6.2 - Facteurs de majoration β_d des α selon les durées.	47
Tableau A.1 - Liste des fiches techniques produites.	61
Tableau B.1 - Liste et caractéristiques des simulations de l'ensemble CMIP6 utilisées dans le cadre de l'étude.....	107

Abréviation

C-C: Clausius-Clapeyron

CDF: Fonctions de répartition

CMIP6 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

CORDEX: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment

CS : Coefficients de scaling

CV : Coefficient de variation

DACC : Direction de l'adaptation aux changements climatiques

ECCC : Environnement et Changements Climatiques Canada

ESGF : Earth System Grid Federation

ET : Écart-type

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

IDF : Intensité-Durée-Fréquence

MAP : Maxima annuel de précipitations

MELCCFP : Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs

NCAR : National Center for Atmospheric Research

POT : Peak-over-threshold

TMA : Températures moyennes annuelles

T-P: Température-précipitation

1 - Introduction

L'adaptation des infrastructures aux changements climatiques exige souvent de quantifier les risques associés aux aléas tels que les précipitations extrêmes, les vents violents ou les vagues de chaleur. Les guides et approches méthodologiques existants (par exemple ISO 31000 et le Protocole CVIIP) laissent aux praticiens le soin d'évaluer eux-mêmes ces risques climatiques. Or, estimer l'évolution probable d'un aléa climatique aux horizons futurs (milieu ou fin du siècle) requiert une expertise en science du climat et un accès à de vastes jeux de données (p. ex. simulations de modèles climatiques les plus récentes, archives aux stations d'observation) qui ne sont pas à la portée de la plupart des organisations.

Le projet *Outils facilitant les analyses des risques aux infrastructures posés par le climat* propose de développer des outils pour estimer les probabilités d'occurrence de divers aléas susceptibles d'être impactés par les changements climatiques afin de faciliter l'analyse des risques climatiques que posent ces aléas sur diverses infrastructures. Ces outils prennent la forme de plateformes offrant des services de calcul en ligne, des outils, des méthodologies et des exemples d'application basées sur les recherches et les connaissances les plus récentes sur le climat et les changements climatiques.

Les travaux présentés dans le présent rapport concernent la contribution de l'équipe du professeur Alain Mailhot au projet *Outils facilitant les analyses des risques aux infrastructures posés par le climat*. Cette contribution porte sur les trois volets suivants :

- i. Production de fiches techniques expliquant divers concepts de base en lien avec les infrastructures et les changements climatiques (Chapitre 3)
- ii. Production d'exemples d'utilisation de l'outil dans différents cas d'application en ingénierie (Chapitre 4).
- iii. Identification d'indicateurs des précipitations extrêmes pertinents à la pratique et développement d'une procédure pour l'estimation de l'évolution future de ces indicateurs dans un contexte de changement climatique (Chapitre 5).

Une consultation auprès des membres du comité consultatif a été entreprise afin d'identifier la liste des indicateurs de précipitations extrêmes les plus pertinents à la pratique. Un sondage réalisé par l'équipe d'Ouranos et des rencontres subséquentes avec le comité consultatif ont permis d'identifier les intensités de précipitations intenses des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF), c.-à-d. les pluies maximales annuelles de durées 5, 10, 15, 30 minutes, 1, 2, 6, 12 et 24 heures et de périodes de retour 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans comme les valeurs les plus couramment utilisées et les plus pertinentes à la pratique. Les durées 2, 3, 4 et 5 jours ont été ajoutées aux durées des courbes IDF à la suite d'une recommandation des membres du comité consultatif.

Les courbes IDF aux stations d'Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC) sont construites à partir des pluies enregistrées aux stations météorologiques soit durant la période où ce type de précipitations est observé. Les analyses qui suivent sont réalisées en utilisant les maxima annuel de précipitations (MAP) de durée 1 à 5 jours pour les modèles CMIP6 (Section 3.1) et de durées 1 h ou 3 heures dans le cas des simulations CORDEX (Section 3.2). Ces MAP ne distinguent pas les précipitations solides ou liquides. Toutefois ils surviennent généralement durant la période où les précipitations liquides sont observées.

Les trois volets précédents seront traités distinctement dans les différents chapitres de ce rapport. Le Chapitre 2 discute de l'élaboration des fiches techniques, présente la liste des fiches produites qui sont regroupées à l'Annexe A. Les Chapitres 3 à 5 présentent l'ensemble des travaux sur les précipitations

extrêmes et le développement de l'approche d'estimation des précipitations extrêmes en climat futur est présenté au Chapitre 6. L'exemple d'application est détaillé au Chapitre 7 et le Chapitre 8 dresse un résumé des principaux résultats et conclusions du projet.

2 - Fiches techniques

Les fiches techniques abordent divers sujets d'intérêt pour la communauté des ingénieurs et des professionnels. Elles ont été rédigées dans un langage simple et compréhensible aux membres de cette communauté. Ces fiches sont complémentaires aux informations déjà présentes sur le site Données Climatiques Canada (<https://donneesclimatiques.ca/>). Le choix des thèmes à traiter et le contenu des fiches ont été établis en étroite collaboration avec les membres du comité consultatif. Le contenu a été validé par ce même comité. Le calendrier de réalisation des fiches est le suivant :

- 12 décembre 2023 : Soumission d'une liste préliminaire de fiches techniques et validation du format et du contenu d'une fiche-type aux membres du comité consultatif.
- 16 août 2024 : Soumission d'une première version des fiches pour commentaires aux membres du comité consultatif.
- 7 septembre 2024 : Compilation des commentaires des membres du comité consultatif sur la première version des fiches.
- 16 octobre 2024 : Transmission d'une liste révisée des fiches techniques, des nouvelles fiches et des versions révisées sur la base des commentaires reçus.
- 31 octobre 2024 : Compilation des commentaires des membres du comité consultatif sur les nouvelles fiches et les fiches révisées.

Les fiches techniques sont regroupées en trois modules et sont présentées à l'Annexe A :

- a. Module A : Concepts statistiques sur les extrêmes;
- b. Module B : Démarche d'adaptation aux changements climatiques
- c. Module C Hydrologies fluviale et urbaine et changements climatiques

Les fiches techniques ont été rédigées en utilisant un nombre réduit de documents de référence. En effet, il existe à l'heure actuelle de très nombreuses références sur ces sujets notamment ceux relatifs à l'adaptation aux changements climatiques et une démultiplication des références auraient été contreproductives d'autant plus que la terminologie et les démarches d'adaptation proposées peuvent varier d'un document à l'autre. Ainsi les fiches du module B s'inspirent très largement des approches et de la terminologie adoptée dans le document publié en 2024 par Ouranos et la Direction de l'adaptation aux changements climatiques (DACC) du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) intitulé *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques – Guide pour les organismes municipaux*. De légères modifications ont été apportées afin de préciser certains termes et concepts.

La liste des fiches techniques de chacun des modules est la suivante :

Module A – Concepts statistiques sur les extrêmes

- A.1 Série, saisonnalité, moyenne et dispersion
- A.2 Qu'est-ce qu'un extrême ?
- A.3 Extrêmes, non-stationnarité et changements climatiques
- A.4 Détection de tendance dans les séries d'extrêmes
- A.5 Représentation probabiliste des extrêmes
- A.6 Analyse de tendance
- A.7 Distribution statistique des valeurs extrêmes et loi de Gumbel
- A.8 Approche peak-over-threshold (POT)

Module B – Démarche d'adaptation aux changements climatiques

- B.1 Démarche d'adaptation aux changements climatiques
- B.2 Objectifs, portée et cadre de la démarche d'adaptation
- B.3 Appréciation des risques climatiques
- B.4 Traitement des risques climatiques
- B.5 Concept et matrice de risque
- B.6 Exemple de démarche d'adaptation pour les inondations pluviales
- B.7 Glossaire

Module C Hydrologies fluviale et urbaine et changements climatiques

- C.1 Crues, inondations et changements climatiques : portrait global
- C.2 Atlas hydroclimatique du Québec
- C.3 Gestion des eaux pluviales et changements climatiques

3 - Considérations générales

Deux ensembles de simulations climatiques ont été utilisés à savoir les simulations de l'ensemble *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6 ; Eyring *et al.* 2016) et de l'ensemble *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX ; Mears *et al.* 2017). Ces deux ensembles sont décrits respectivement aux sections 3.1 et 3.2. Les séries de précipitations journalières et de températures moyennes journalières ont été considérées dans ce qui suit.

3.1 Ensemble CMIP6

L'ensemble CMIP6 regroupe les simulations des modèles globaux utilisés dans le sixième rapport d'évaluation (Sixth Assessment Report¹, AR6) du *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (GIEC). Les données de cet ensemble ont été récupérées des sites du *Earth System Grid Federation*² (ESGF) ainsi que du site du réseau *Copernicus*³ où les simulations de 53 modèles globaux sont répertoriées. La résolution spatiale de ces modèles varie de 50 km à 300 km. Pour chaque modèle, on dispose d'une simulation pour la période historique (1950-2014) et d'une ou plusieurs simulations couvrant la période future (2015-2099). Trois scénarios de forçage anthropique sont considérés : SSP-4.5, SSP-7.0, SSP-8.5 (Meinshausen *et al.* 2020). Ces scénarios sont appliqués à la période future alors que les concentrations de gaz à effet de serre observées sont appliquées à la période historique. Le nombre de simulations varie selon le modèle, la période future et les SSP considérés pour un grand total de 1 à 260 simulations disponibles. Les séries de l'ensemble CMIP6 sont journalières. Elles ont donc été utilisées afin d'évaluer l'évolution future des maxima annuel de précipitations (MAP) de durées 1 à 5 jours.

Divers critères ont été appliqués pour la sélection des modèles et des simulations CMIP6. Ainsi un modèle est retenu si l'on dispose d'au moins une simulation en climat historique et une simulation en climat futur et ce quel que soit le SSP. L'Annexe B présente la liste et les caractéristiques des modèles et simulations CMIP6 retenues et le Tableau 3.1 présente le nombre de modèles répondant à ce critère selon les différents SSP. Dans les cas où plusieurs membres sont disponibles pour une combinaison modèle global/SSP donné, seul le premier membre est retenu. Un total de 139 simulations (39 simulations en période historique, 34 pour le SSP-4.5, 30 pour le SSP-7.0 et 36 pour le SSP-8.5) a ainsi été considéré.

Tableau 3.1 - Nombre de modèles globaux avec une simulation en climat historique et au moins une simulation en climat futur en fonction des différents scénarios SSP simulés pour les variables températures et précipitations.

Température et précipitation	Nombre de modèles/simulations
SSP-4.5 uniquement	0
SSP-7.0 uniquement	2
SSP-8.5 uniquement	3
SSP-4.5 et SSP-7.0	1
SSP-4.5 et SSP-8.5	6
SSP-7.0 et SSP-8.5	0

¹ <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>

² <https://aims2.llnl.gov/search>

³ <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/projections-cmip6?tab=download>

SSP-4.5, SSP-7.0 et SSP-8.5	28
TOTAL	40

3.2 Ensemble CORDEX

Les simulations de l'ensemble CMIP6 sont journalières et ne permettent pas d'investiguer les MAP de durées inférieures à 1 jour. Les simulations de l'ensemble CORDEX (Mears *et al.* 2017) ont donc été utilisées à cet effet. Elles ont été récupérées du site du *National Center for Atmospheric Research*⁴ (NCAR). Sept simulations ont ainsi été récupérées, leurs résolutions spatiales variant de 19 km à 49 km. Pour chaque modèle, on dispose d'une simulation pour la période historique (1950-2005) et d'une simulation couvrant la période future 2006-2099. Un seul scénario de forçage anthropique était considéré pour plusieurs simulations et modèles, soit le RCP-8.5 (Meinshausen *et al.* 2011). Le scénario RCP-8.5 est considéré en période future et les concentrations de gaz à effet de serre observées sont utilisées en période historique.

Un modèle est retenu dans le cadre de la présente étude si l'on dispose d'au moins une simulation en climat historique et une simulation en climat futur pour le RCP-8.5. Le Tableau 3.2 présente la liste des sept simulations répondant à ce critère. Les séries de température sont au pas de temps journalier tandis qu'elles sont sous-journalières (horaires ou 3 heures) pour les séries de précipitations.

⁴ <https://www.earthsystemgrid.org/search/cordexsearch.html>

Tableau 3.2 - Liste et caractéristiques des simulations de l'ensemble CORDEX utilisées. A noter que les séries de températures de ces simulations sont journalières.

Modèle global	Modèle régional	Résolution spatiale ¹ (km)	Pas de temps des séries de précipitations
CanESM2	CanRCM4	49 x 37	1 heure
GFDL-ESM2M	RegCM4	24 x 19	3 heures
GFDL-ESM2M	WRF	24 x 19	1 heure
HadGEM2-ES	RegCM4	24 x 19	3 heures
HadGEM2-ES	WRF	24 x 19	1 heure
MPI-ESM-LR	RegCM4	24 x 19	1 heure
MPI-ESM-LR	WRF	24 x 19	1 heure

1. Approximé au km près à la latitude de 40°N.

3.3 Période de référence et périodes futures

Les modèles retenus, qu'ils soient de l'ensemble CMIP6 ou CORDEX, simulent la période de 1950 à 2099. Le forçage historique, c.-à-d. où les concentrations de gaz à effet de serre observées sont utilisées, couvre la période 1950-2014 pour les simulations CMIP6, alors que les scénarios de forçage SSP sont utilisés pour la période 2015-2099 (Section 3.1). En revanche, pour les simulations CORDEX, la période historique où les concentrations de gaz à effet observées sont utilisées correspond à la période 1950-2005 alors que le scénario RCP-8.5 est utilisé pour simuler la période 2006-2099 (Section 3.2). Enfin, même si les scénarios de forçage radiatif diffèrent pour ces deux ensembles, RCP versus SSP, le scénario RCP-8.5 s'apparente au scénario SSP-8.5 (Meinshausen *et al.* 2020).

La période historique de référence est définie dans ce qui suit comme la période 1980-2009. Quatre périodes de 30 ans sont considérées : 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099. Une période passée antérieure à la période de référence 1980-2009 et trois périodes futures, postérieures à cette période, sont ainsi considérées. On désigne ces périodes par P1 = 1950-1979, R = 1980-2009, F1 = 2010-2039, F2 = 2040-2069 et F3 = 2070-2099. La période future F1 (2010-2039) compte quelques années, 2010-2014, où le forçage historique est considéré pour les simulations CMIP6 mais pour l'essentiel les simulations de cette période (2015-2039) utilisent les trois scénarios de forçage SSP. Dans le cas de l'ensemble CORDEX, toute la période 2009-2039 est simulée en utilisant le scénario RCP-8.5 alors que seules les années 2006 à 2009 de la période de référence 1980-2009 sont simulées en utilisant le scénario RCP-8.5. On peut présumer que l'utilisation du scénario RCP-8.5 pour les années 2006-2009 aura peu d'impact sur les valeurs moyennes de la période 1980-2009.

3.4 Grille commune

Afin de pouvoir combiner les résultats des différents modèles, une grille commune couvrant le Canada de résolution 1° x 1° (≈ 110 km x 85 km) a été créée (Figure 3.1). Seuls les points de grille terrestres sont considérés pour un total de 1631 points de grille. On désigne par $X_{ijk}(H, S)$ la valeur simulée (MAP de durée donnée ou la température moyenne annuelle) à l'année i , au point de grille j par le modèle k pour la période H ($H = \{P1, R, F1, F2, F3\}$) selon le scénario de forçage S ($S = \{SSP-4.0, SSP-7.0, SSP-8.5, RCP-8.5\}$). Chaque point de grille j du modèle k est associé à un point de la grille commune. Cette correspondance se fait en recherchant le point de la grille commune dont le centroïde est le plus près du centroïde du point de grille du modèle. Les valeurs de la grille commune sont ensuite estimées en calculant la médiane des valeurs des points de grille correspondants des modèles. La grille commune est utilisée pour combiner les simulations CMIP6 et les simulations CORDEX.

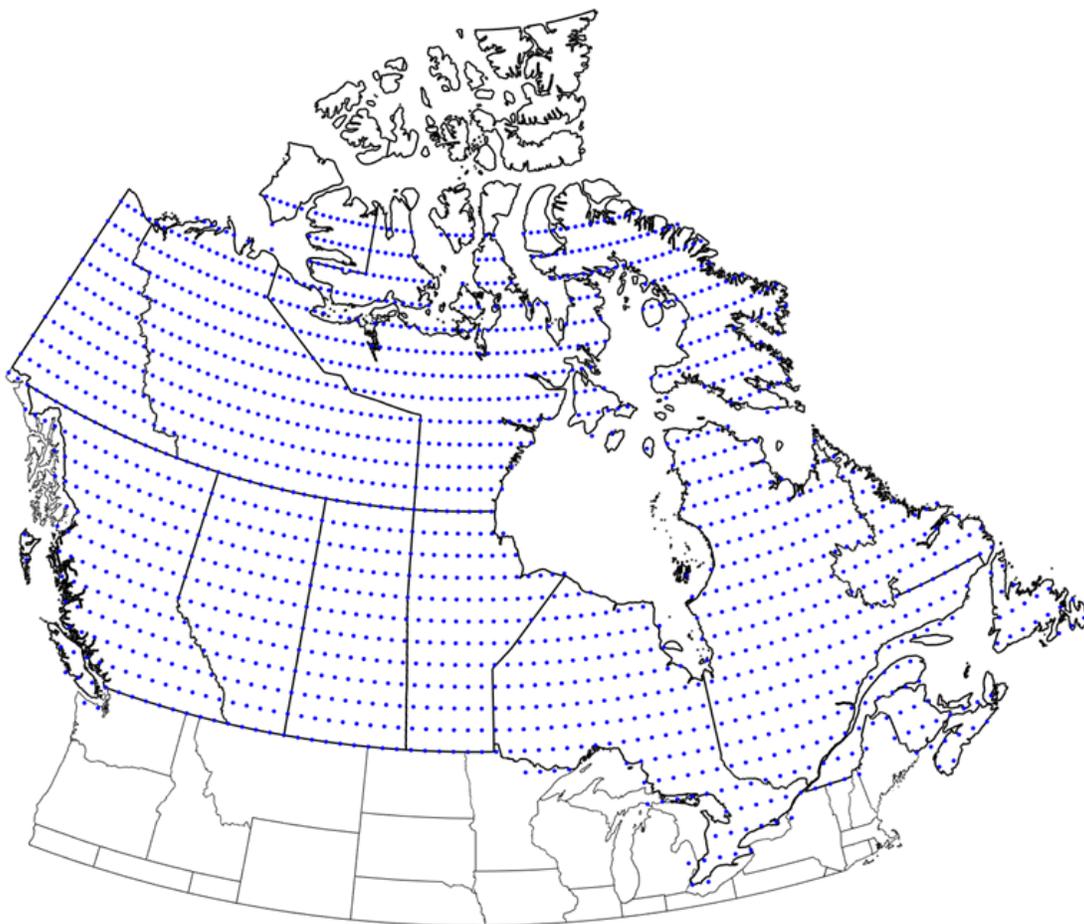


Figure 3.1 - Grille commune couvrant le Canada ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$). Seuls les points de grille terrestres sont représentés.

4 - Précipitations extrêmes en climat futur

Le présent chapitre présente un résumé des travaux sur l'évolution future des précipitations extrêmes tels que simulées par l'ensemble CMIP6 (Section 4.1) et par l'ensemble CORDEX (Section 4.2). Les résultats de ces analyses sont présentés en deux temps, d'abord sur les grilles des différents modèles (Section 4.1.1 pour l'ensemble CMIP6 et la Section 4.2.1 pour l'ensemble CORDEX) et ensuite où les résultats des différents modèles sont combinés sur la grille commune (Section 4.1.2 pour l'ensemble CMIP6 et la Section 4.2.2 pour l'ensemble CORDEX). La variabilité des résultats des divers modèles sur la grille commune est investiguée aux Sections 4.1.3 pour l'ensemble CMIP6 et 4.2.3 pour l'ensemble CORDEX.

4.1 Ensemble CMIP6

Les sections qui suivent présentent un résumé des principaux résultats sur les variations futures des MAP simulées par l'ensemble CMIP6. Les résultats pour les MAP de durée 1 jour et de période de retour 2 ans (MAP 1 jour – 2 ans) sont présentés et les résultats pour les autres durées et périodes de retour sont commentés au besoin.

4.1.1 Variations futures des MAP aux points de grille des modèles

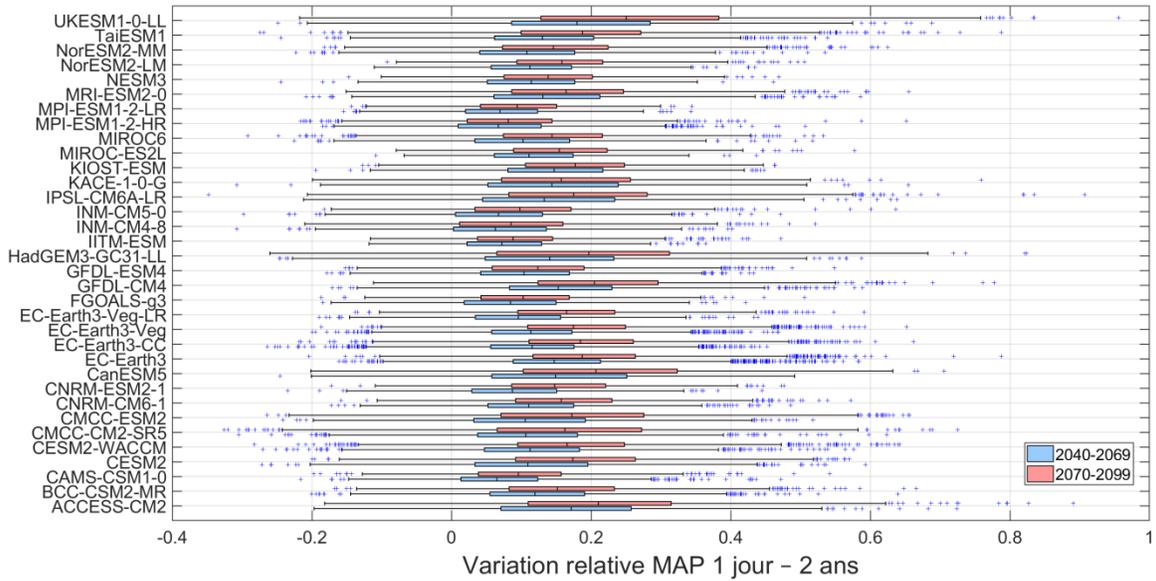
Les MAP de durées 1 à 5 jours ont été extraits des séries des précipitations journalières à chaque point de grille de chaque simulation de l'ensemble CMIP6. Les quantiles empiriques des MAP de périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans ont ensuite été estimés pour la période de référence et les périodes futures et les écarts relatifs $(\text{MAP futur} - \text{MAP référence})/(\text{MAP référence})$ ont été calculés.

La Figure 4.1 présente les distributions des variations relatives par rapport à la période de référence des intensités des MAP de durée 1 jour et de période de retour 2 ans (MAP 1 jour – 2 ans) aux points de grille des différents modèles pour les SSP-4.5 et SSP-8.5 et les périodes F2 (2040-2069) et F3 (2070-2099) alors que la Figure 4.2 présente les résultats pour les variations relatives entre la période historique P1 (1950-1979) et la période de référence (1980-2009). Plusieurs constats émergent de l'examen de ces figures :

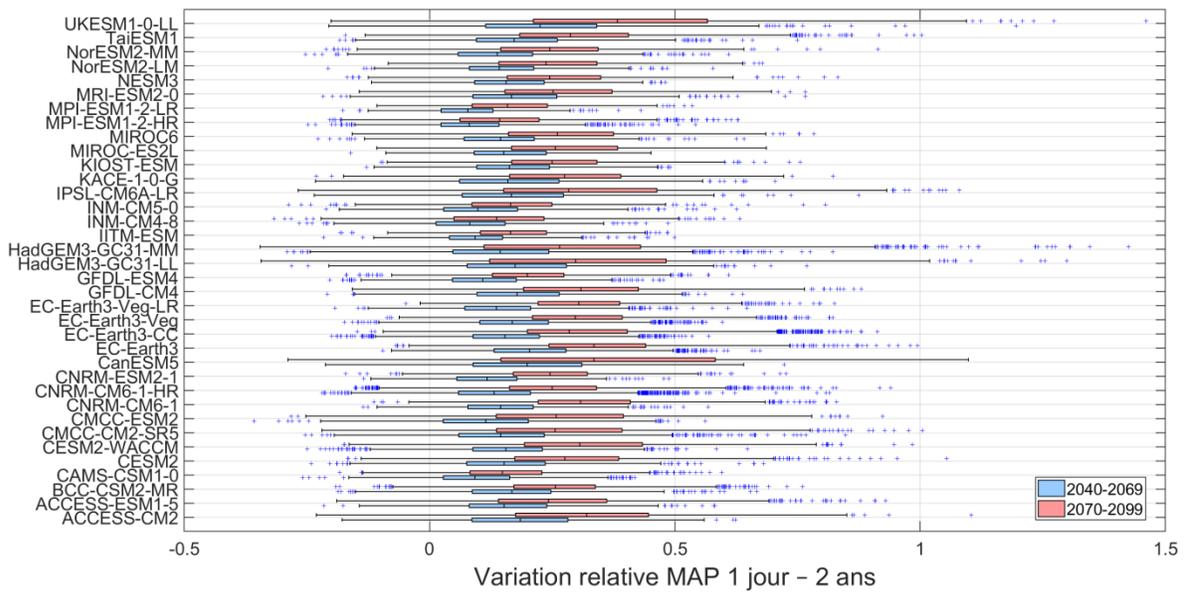
- Les variations entre la période 2070-2099 et la période de référence sont supérieures à celles entre la période 2040-2069 et la période de référence et ce pour tous les modèles. Ainsi, bien que les augmentations varient d'un modèle à un autre, tous les modèles simulent des augmentations des MAP 1 jour – 2 ans aux horizons F3 et F2.
- Les variations médianes des MAP 1 jour – 2 ans sur l'ensemble du territoire sont de l'ordre de 6 à 18% pour la période 2040-2069 et de 8 à 25% pour la période 2070-2099 pour le SSP-4.5. Les valeurs correspondantes pour le SSP-8.5 sont de 8% à 23% pour la période 2040-2069 et de 14% à 38% pour la période 2070-2099. Les variations relatives des MAP 1 jour – 2 ans augmentent lorsque le forçage radiatif augmente.
- Des diminutions sont observées à un très petit nombre de points de grille pour les deux périodes futures.
- Pour les variations relatives des MAP 1 jour -2 ans entre les périodes historiques 1950-1979 et 1980-2009 (Figure 4.2), les médianes des variations aux points de grille de tous les modèles sont inférieures ou très près de zéro. Il est intéressant de noter par ailleurs que la dispersion des valeurs aux points de grille des différents modèles est assez similaire d'un modèle à l'autre. On note donc

une très légère augmentation à l'échelle globale des intensités des MAP sur l'ensemble du territoire entre la période 1950-1979 et 1980-2009.

Des résultats très similaires sont obtenus pour les autres durées et périodes de retour.



(a)



(b)

Figure 4.1 - Distributions (box-plots) des variations relatives des MAP 1 jour – 2 ans (MAP futur – MAP référence)/MAP référence) aux différents points de grille des modèles pour les simulations utilisant le : a) SSP-4.5 ; b) SSP-8.5. A noter les échelles des x différentes des Figures 4.1a et 4.1b.

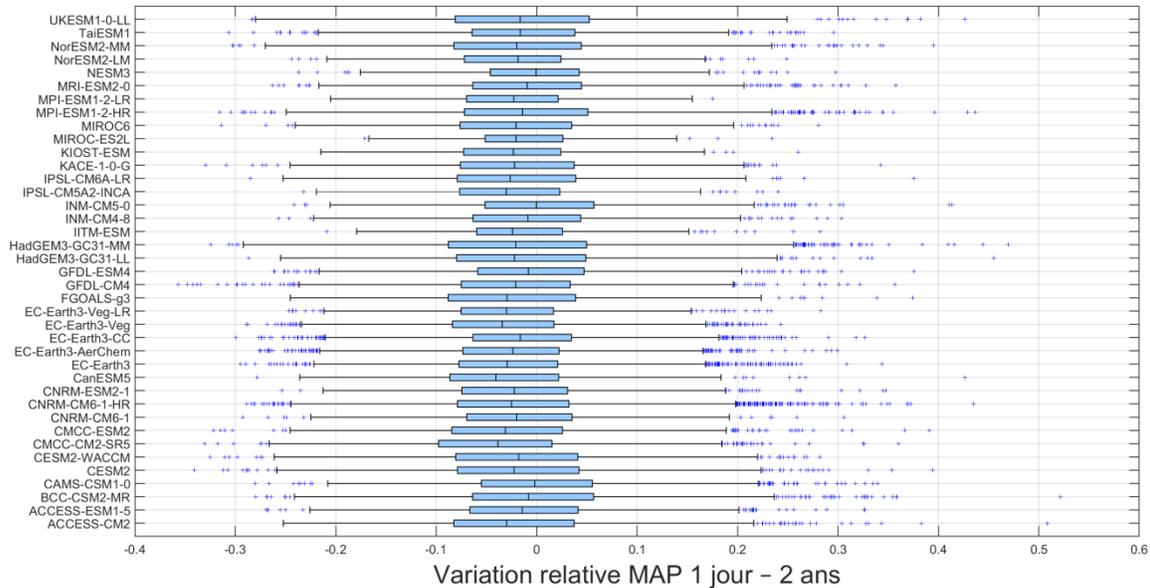


Figure 4.2 - Distributions (box-plots) des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans aux points de grille des différents modèles entre la période 1950-1979 et la période de référence (1980-2009). [(MAP P1 – MAP référence)/MAP référence].

4.1.2 Variations futures des MAP aux points de la grille commune

Les médianes des variations relatives des MAP de durées 1 à 5 jours et de périodes de retour 2, 5, 10 et 20 ans aux points de la grille commune ont ensuite été estimées pour les diverses périodes et les trois SSP. On désigne ces quantités par $\delta\text{MAP}_j(d, T, H, H1, S)$ où δMAP correspond à la variation relative du MAP de durée d et période de retour T au point de grille j entre les horizons H ($H = P1, F1, F2, F3$) et la période de référence $H1$ (1980-2009) selon le scénario de forçage S ($S = \text{SSP-4.5}, \text{SSP-7.0}, \text{SSP-8.5}$). On a donc :

$$\delta\text{MAP}_j(d, T, H, H1, S) = \frac{\text{MAP}_j(d, T, H, S) - \text{MAP}_j(d, T, H1)}{\text{MAP}_j(d, T, H1)} \quad (4.1)$$

Les distributions des $\delta\text{MAP}_j(d, T, H, H1, S)$ avec $d = 1$ jour et $T = 2$ ans (MAP 1 jour-2 ans), aux points de la grille commune pour les diverses combinaisons de S et H sont présentées à la Figure 4.3. On constate que les MAP 1 jour - 2 ans augmentent lorsque le forçage augmente ($\text{SSP-4.5} \rightarrow \text{SSP-7.0} \rightarrow \text{SSP-8.5}$) et lorsque la période future est plus lointaine ($2010-2039 \rightarrow 2040-2069 \rightarrow 2070-2099$). De même, pour un horizon donné, les différences entre les SSP augmentent pour les horizons lointains et s'amenuisent au fur et à mesure que l'on considère une période plus près de la période de référence. Ainsi pour la période 2010-2039, on observe peu de différences entre les trois SSP avec des hausses médianes des MAP 1 jour-2 ans de l'ordre de 6%, alors que ces différences sont très grandes à l'horizon 2070-2099 avec des hausses médianes de l'ordre de 17% pour le SSP-4.5, de 20% pour le SSP-7.0 et de 26% pour le SSP-8.5. Pour la période passée 1950-1979, les hausses simulées entre cette période et la période de référence 1980-2009 sont relativement faibles de même que la dispersion des valeurs aux points de grille. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus à l'échelle de chacun des modèles (Section 4.1.1).

Les distributions des variations relatives des MAP de durées 1 à 5 jours et de périodes de retour 2 à 20 ans sont présentées à la Figure 4.4. Cette figure montre qu'à l'échelle globale, les variations des MAP ont tendance à décroître avec la durée et à légèrement augmenter avec la période de retour pour une durée donnée.

La Figure 4.5 présente les cartes des variations relatives normalisées des MAP 1 jour - 2 ans sur la grille commune pour les périodes futures 2010-2039, 2040-2069, 2070-2099 et les trois SSP. Les variations normalisées sont définies comme les différences entre les valeurs aux points de grille et la valeur médiane sur l'ensemble du territoire. L'examen de ces cartes montre que si, pour un SSP donné, les hausses pour la période 2070-2099 sont globalement plus élevées que celles de la période 2040-2069, les distributions spatiales de ces valeurs demeurent sensiblement inchangées avec des hausses plus importantes au nord et sur les côtes et moins importantes dans les parties centre-sud. Une analyse similaire des MAP des autres durées et périodes de retour montre que des patrons spatiaux très similaires sont observés dans tous les cas avec des patrons de plus en plus bruités au fur et à mesure que la période de retour augmente.

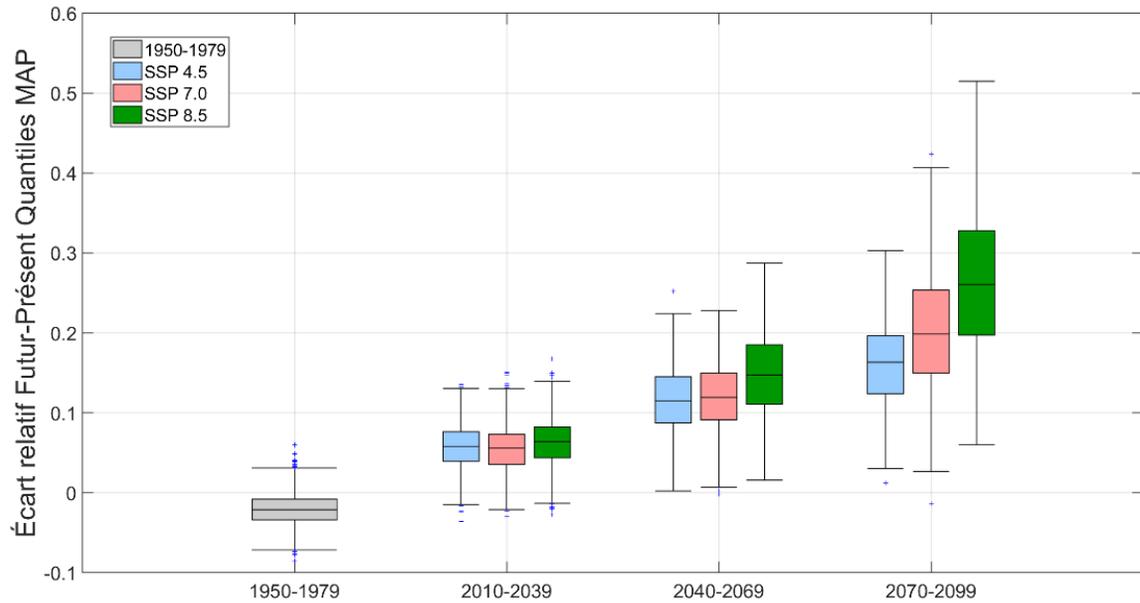


Figure 4.3 - Distributions (box plots) des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans simulées par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune entre les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 pour les SSP-4.5, SSP-7.0 et SSP-8.5 et entre la période 1980-2009 et la période 1950-1979.

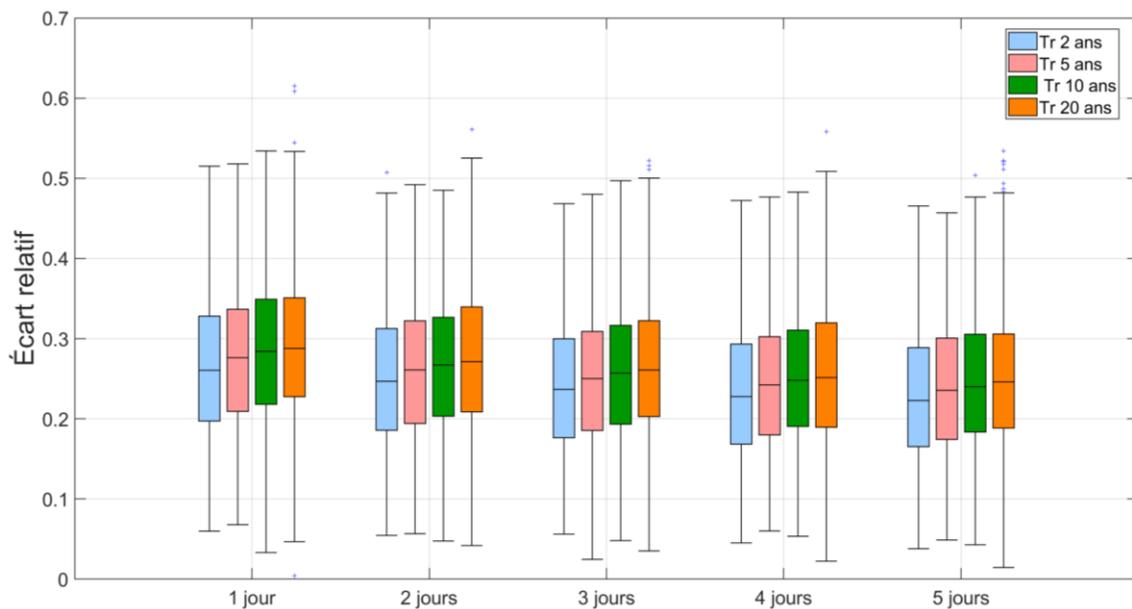


Figure 4.4 - Distributions (box plots) des variations relatives des MAP de durées 1 jour à 5 jours (abscisses) et de période de retour 2 à 20 ans (box-plots) simulées par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune entre la période future 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 pour le SSP-8.5.

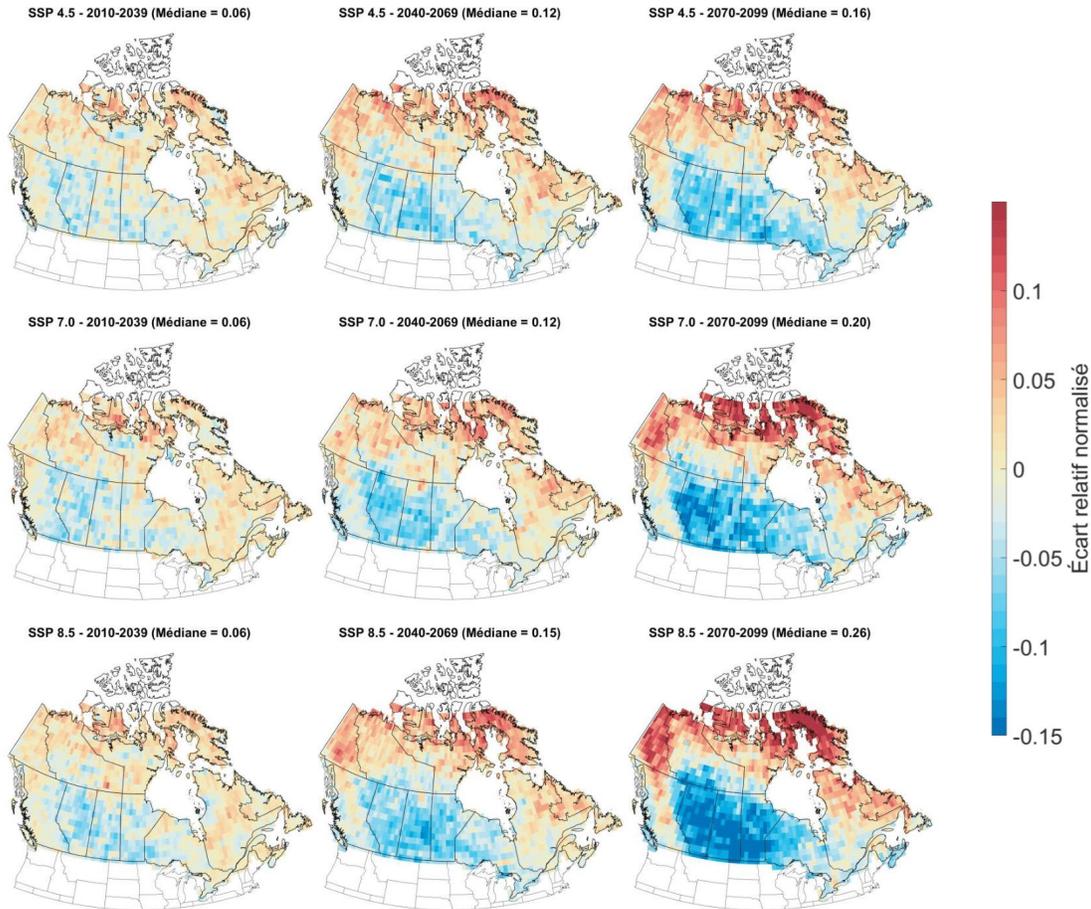


Figure 4.5 - Cartes des variations relatives normalisées des MAP 1 jour - 2 ans aux points de la grille commune pour les périodes 2020-2039 (1^e colonne), 2040-2069 (2^e colonne) et 2070-2099 (3^e colonne) et les SSP-4.4 (1^e ligne), SSP-7.0 (2^e ligne) et SSP-8.5 (3^e ligne). Les variations normalisées sont définies comme les différences entre les valeurs aux points de grille et la médiane sur l'ensemble des points de grille (ces dernières sont indiquées entre parenthèses au-dessus des cartes).

4.1.3 Variabilité inter-modèle des MAP

Les résultats de la section précédente concernaient les variations des MAP des valeurs médianes des distributions des variations simulées par les modèles CMIP6. Les Figures 4.1 et 4.2 montrent qu'il existe une grande dispersion dans les variations simulées par les différents modèles. Afin de mieux représenter cette variabilité inter-modèle, les écarts-types (ET) des variations des MAP simulées par les modèles en chaque point de la grille commune ont été estimés (Figure 4.6). Les coefficients de variations (CV), définis comme le rapport entre l'ET à un point de grille et la médiane des variations relatives des MAP au même point de grille, ont également été estimés (Figure 4.7). A noter que les CV pour la période 1950-1979 ne sont pas présentés puisque les variations des MAP à certains points de grille sont nulles et la variabilité inter-modèle est souvent beaucoup plus grande que le signal de changement.

Les distributions des ET des MAP 1 jour - 2 ans aux points de grille sont présentées à la Figure 4.6 en fonction des périodes et des SSP. Un examen de cette figure montre que les ET varient de 5 à 15% avec une valeur médiane de 9% pour la période 1950-1979. Pour les horizons futurs, on observe que

les ET augmentent pour les horizons futurs plus lointains et que les différences entre les SSP s'accroissent. Ainsi pour le SSP-8.5 à l'horizon 2070-2099, la médiane des ET sur les variations futures des MAP 1 jour – 2 ans est de l'ordre de 15% alors que la variation médiane des MAP correspondante est de 26%. Pour le SSP-7.0, la médiane des ET est de 14% et la médiane des variations des MAP de 20%. Enfin pour le SSP-4.5, ces valeurs sont respectivement de 13% et de 18%. Pour la période 2040-2069, les médianes des ET et les variations des MAP 1 jour – 2 ans sont du même ordre à savoir de 12% à 14% pour tous les SSP. Ainsi les médianes des ET sont inférieures aux variations médianes des MAP pour la période 2070-2099, du même ordre pour la période 2040-2069 et nettement supérieures pour la période 2010-2039.

La Figure 4.7 confirme ces résultats et montre que, malgré une augmentation de la variabilité inter-modèle avec l'horizon futur, les CV tendent à diminuer lorsque l'on considère des horizons futurs plus lointains. Ainsi les incertitudes inter-modèles dominent largement ($CV > 1$) pour la période 2010-2039 et ce quel que soit le forçage. La situation est différente pour la période 2040-2069 alors que 75% des points de grille ont des valeurs de $CV < 1$ pour le SSP-8.5, 63% pour le SSP 7.0 et 61% pour le SSP-4.5. Ces valeurs indiquent que le signal de changement climatique émerge progressivement avec le temps et ce d'autant plus que le forçage radiatif est important. Enfin pour la période 2070-2099, les CV sont inférieurs à un à plus de 78% des points de grille quel que soit le SSP.

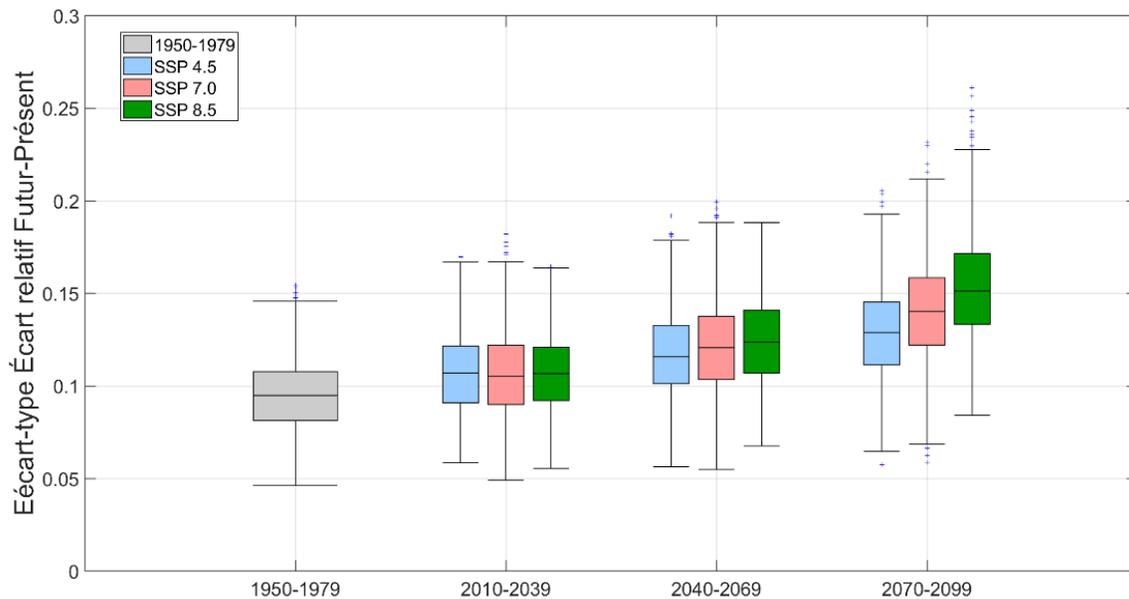


Figure 4.6 - Distributions (box plots) des ET des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans entre les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 simulées par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune.

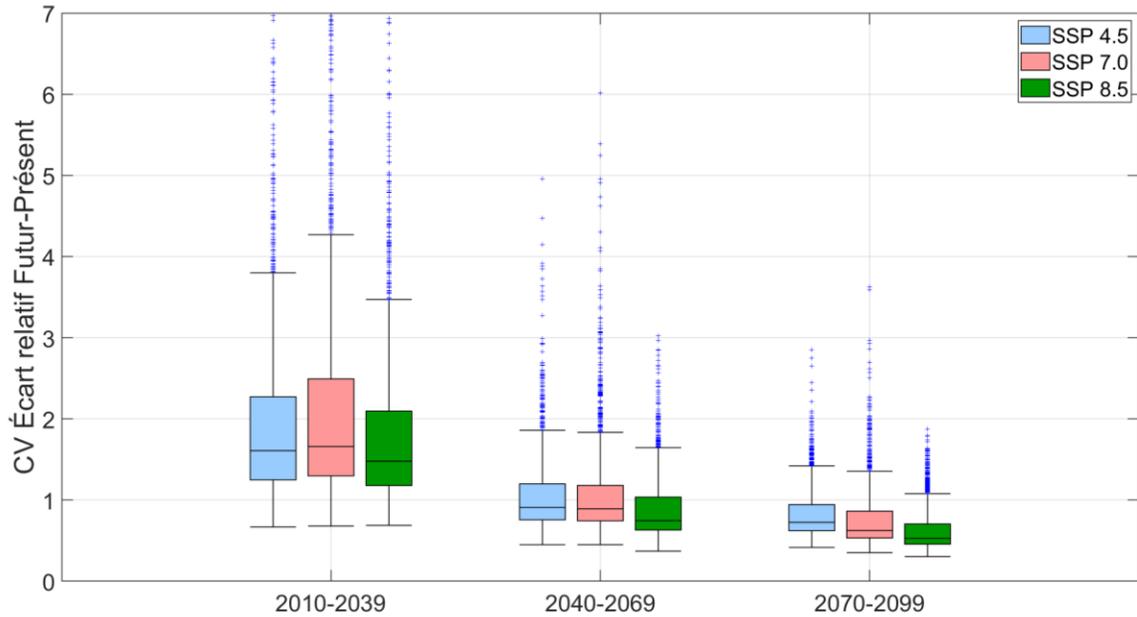


Figure 4.7 - Distributions (box plots) des CV des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans entre les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 simulées par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune.

Les cartes des CV des MAP 1 jour - 2 ans pour différentes périodes et les trois SSP sont présentées à la Figure 4.8. On observe que les valeurs de CV ont tendance à diminuer à mesure que la période future est plus lointaine. Ainsi pour la période 2010-2039, $CV > 1$ pour une vaste majorité de points de grille, indiquant que pour cette période la variabilité inter-modèle domine le signal de changement climatique et ce peu importe le scénario de forçage radiatif. Pour la période 2040-2079, le signal de changement climatique émerge progressivement ($CV < 1$) sauf pour la partie centre-sud du territoire où $CV > 1$ et dont l'étendue diminue légèrement lorsque le forçage radiatif augmente (SSP-4.5 \rightarrow SSP-7.0 \rightarrow SSP-8.5). Enfin, une partie de la région centre-sud où $CV > 1$ persiste pour la période 2080-2099. En résumé, la distribution spatiale des CV est assez similaire pour toutes les SSP et les périodes avec *grosso modo* des CV plus élevés pour la partie centrale et des valeurs plus faibles dans les parties est et ouest où le signal climatique se manifeste plus rapidement. Ce résultat est à rapprocher de celui de la Figure 4.5 qui montrait que la région centre-sud était celle où les augmentations projetées des MAP 1 jour - 2 ans était les plus faibles. Des résultats similaires sont obtenus pour les MAP des autres durées et périodes de retour.

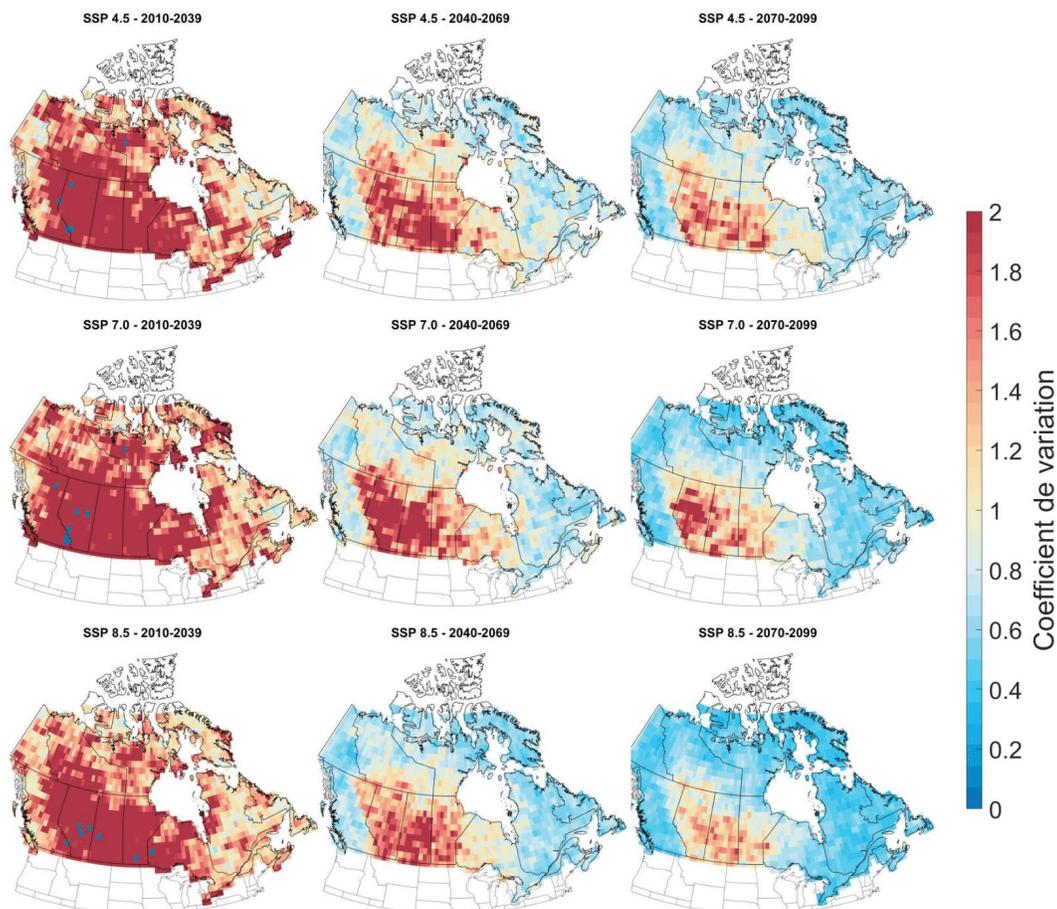


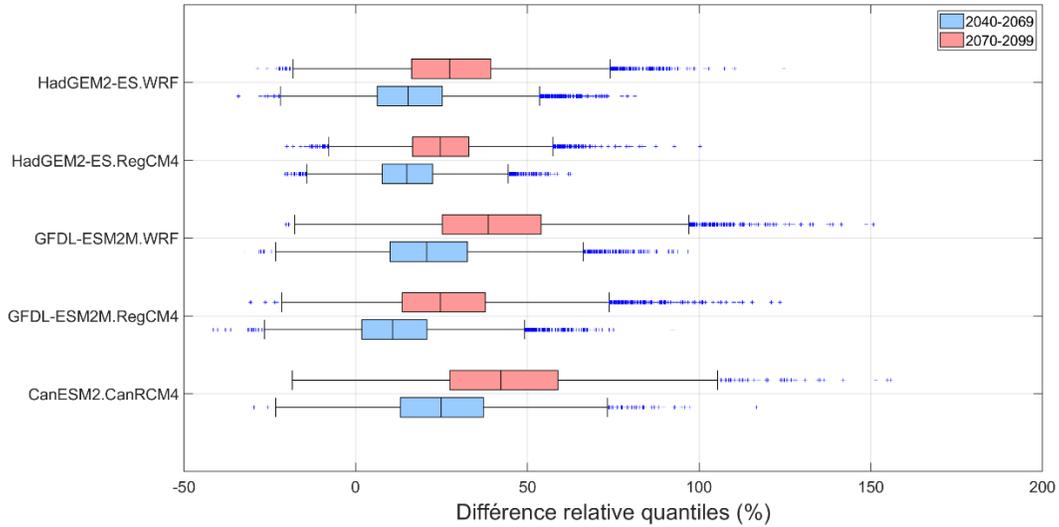
Figure 4.8 - Cartes des CV des variations relatives des MAP 1 jour - 2 ans aux points de la grille commune simulés par l'ensemble CMIP6 pour les périodes 2020-2039 (1^e colonne), 2040-2069 (2^e colonne) et 2070-2099 (3^e colonne) et les SSP-4.5 (1^e ligne), SSP-7.0 (2^e ligne) et SSP-8.5 (3^e ligne).

4.2 Ensemble CORDEX

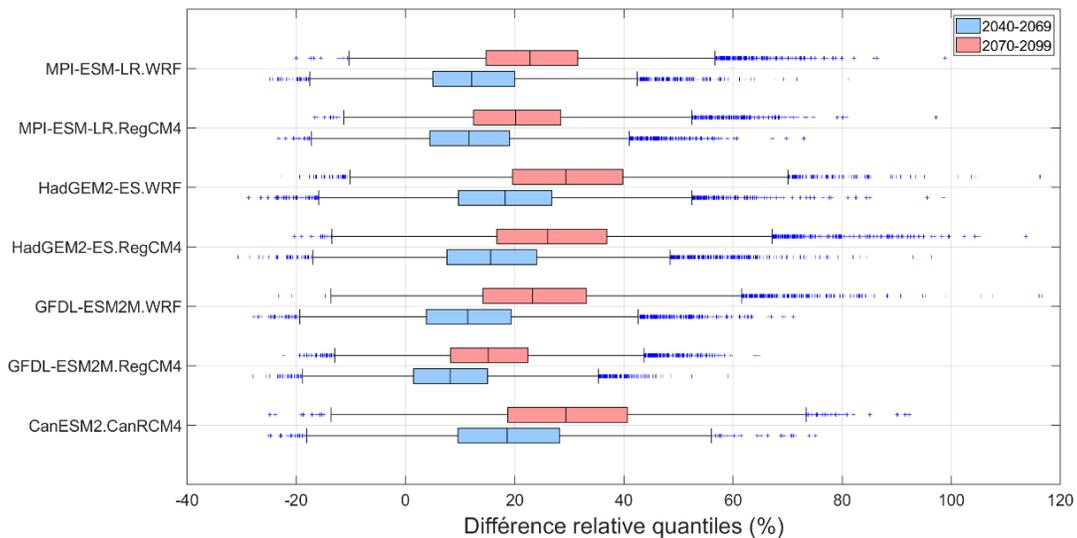
Les analyses décrites précédemment pour l'ensemble CMIP6 ont été reprises pour les simulations de l'ensemble CORDEX (Section 3.2). Elle concerne donc plus spécifiquement les MAP de durées 1 heure ou 3 heures selon le modèle (Tableau 3.2). Ainsi seules les cinq simulations avec des séries de précipitations horaires sont utilisées pour les MAP de durées 1 et 2 heures alors que les sept simulations sont utilisées pour estimer les MAP de durées 3, 6, 12 et 24 heures. Rappelons que seul le RCP -8.5 est disponible pour les simulations CORDEX.

4.2.1 Variations futures des MAP aux points de grille des modèles

La Figure 4.9 présente les distributions des variations relatives des MAP 1 heure – 2 ans aux points de grille de chacun des modèles CORDEX.



(a)



(b)

Figure 4.9 - Distributions (box-plots) des variations relatives $(MAP_{futur} - MAP_{référence})/MAP_{référence}$ aux différents points de grille des : a) MAP 1 heure – 2 ans pour les cinq modèles CORDEX avec des séries de précipitations horaires ; b) MAP 1 jour – 2 ans pour les sept simulations CORDEX avec des précipitations horaires ou aux trois heures (Tableau 3.2). Toutes ces simulations utilisent le scénario RCP-8.5.

L'examen de cette figure montre que :

- Les MAP 1 heure – 2 ans augmenteront pour deux horizons futurs sur une immense majorité des points de grille;
- Les augmentations à l'horizon 2070-2099 sont supérieures aux augmentations à l'horizon 2040-2069

- Les variations médianes varient selon les modèles, allant de 11% à 25% à l'horizon 2040-2069 et de 25% à 42% à l'horizon 2070-2099 pour la durée 1 heure. Pour la durée 1 jour, elles vont de 8% à 19% pour l'horizon 2040-2069 et de 15% à 29% pour l'horizon 2070-2099.
- La dispersion des valeurs aux points de grille est plus grande à l'horizon 2070-2099 qu'à l'horizon 2040-2069.

4.2.2 Variations futures des MAP aux points de la grille commune

La Figure 4.10 présente les distributions des variations relatives des MAP 1 heure – 2 ans, des MAP 1 jour – 2 ans aux points de la grille commune simulés par l'ensemble CORDEX de même que la distribution des MAP 1 jour – 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 (SSP-8.5). Divers constats émergent de l'examen de cette figure :

- Les distributions des variations relatives des MAP 1 jour – 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 à partir du SSP-8.5 et par l'ensemble CORDEX à partir du scénario RCP-8.5 sont comparables pour les périodes 1950-1979 et 2010-2039 ; on note cependant que les valeurs simulées par l'ensemble CMIP6 sont légèrement supérieures pour les deux horizons futurs plus lointains 2040-20879 et 2080-2099. La dispersion des valeurs aux points de grille est également plus grande pour l'ensemble CMIP6 ce qui peut s'expliquer par le plus grand nombre de modèles et de simulations.
- Les augmentations pour les MAP 1 heure – 2 ans sont supérieures à celles des MAP 1 jour – 2 ans et ces différences sont d'autant plus prononcées que l'horizon considéré est lointain. Ainsi pour le MAP 1 heure – 2 ans, les hausses médianes projetées sont de 16% à l'horizon 2040-2069 et de 30% à l'horizon 2070-2099 alors que les valeurs correspondantes pour les MAP 1 jour – 2 ans sont de 13% et de 24% respectivement.
- La dispersion des hausses des MAP 1 heure – 2 ans aux points de grille est plus élevée que celle des MAP – 1 jour – 2 ans ce qui est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle les événements de pluies de plus courtes durées sont spatialement plus hétérogènes.

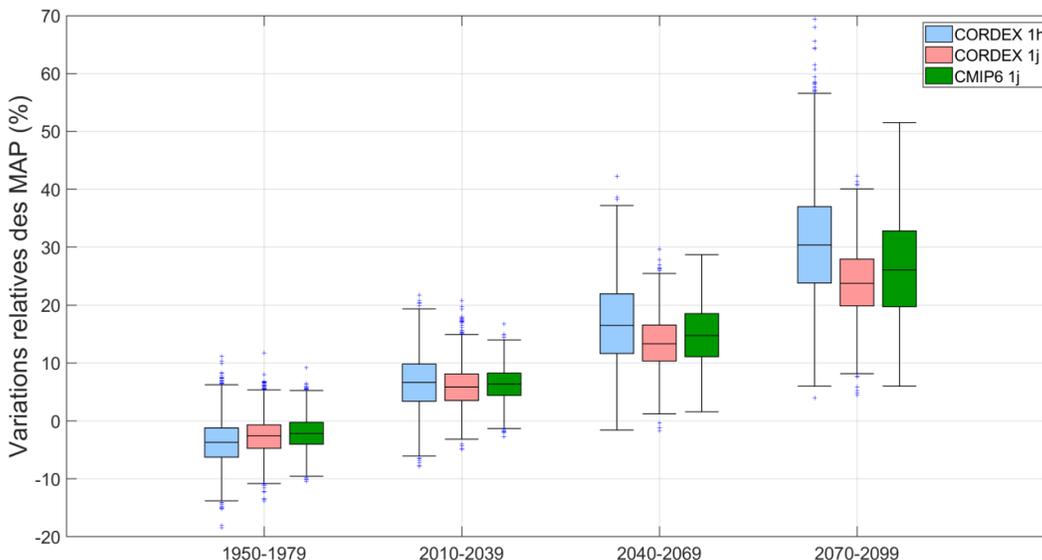


Figure 4.10 - Distributions (box plots) des variations relatives entre les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 $[(\text{MAP futur} - \text{MAP référence})/\text{MAP référence}]$ des MAP 1 heure - 2 ans (en bleu) et des MAP 1 jour - 2 ans (en rose) simulés par l'ensemble CORDEX (RCP-8.5) et des MAP 1 jour - 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 (SSP-8.5) (en vert) aux points de la grille commune.

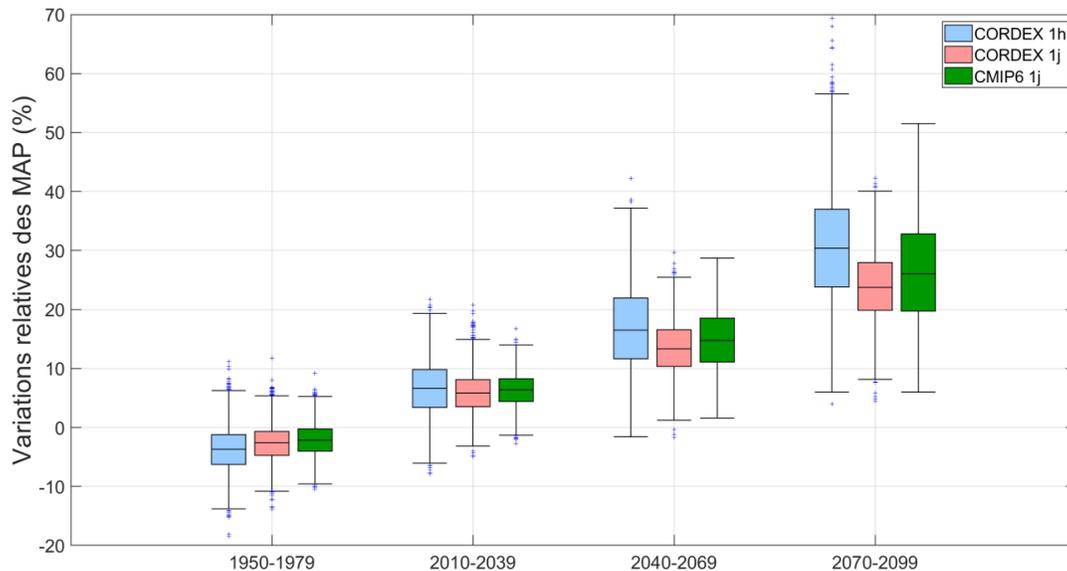


Figure 4.11 - Distributions (box plots) des variations relatives entre la période 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 $[(\text{MAP futur} - \text{MAP référence})/\text{MAP référence}]$ des MAP de durées 1 heure, 2 heures, 6 heures, 12 heures et 24 heures et de période de retour 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX (RCP-8.5) aux points de la grille commune.

La Figure 4.11 présente les distributions des variations relations des MAP 2 ans en fonction de la durée et des périodes de retour. On peut voir que les hausses seront plus importantes pour les plus courtes durées et, pour une durée donnée, plus importantes pour les MAP de périodes de retour plus élevées. L'impact de la période de retour se fait plus sentir pour les MAP de courtes durées et s'atténue pour les MAP de plus longues durées. Cette dépendance est cohérente avec celle observée pour les MAP de durées 1 à 5 jours simulées par l'ensemble CMIP6 (Figure 4.4).

4.2.3 Variabilité inter-modèle des MAP

Les distributions aux points de la grille commune des ET des MAP 1 heure - 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX, des MAP 1 jour - 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX et par l'ensemble CMIP6 sont présentées à la Figure 4.12 alors que la Figure 4.13 présente les CV correspondants (les CV sont définis comme le rapport entre l'ET à un point de grille et la médiane des variations relatives des MAP au même point de grille). On peut voir que les ET des variations des MAP 1 heure sont plus importants que les ET des variations des MAP 1 jour pour l'ensemble CORDEX et que ces différences sont plus importantes pour les horizons futurs plus lointains. Ce résultat signifie que les projections des MAP 1 heure varient sensiblement selon les modèles et que cette variabilité augmente avec l'horizon futur. De même la dispersion des MAP 1 jour simulés par l'ensemble CMIP6 est plus grande que la dispersion des MAP 1 jour simulés par CORDEX ce qui peut s'expliquer par le faible nombre de simulations CORDEX. Par ailleurs, la plus grande dispersion des ET plus les périodes 1950-1979 et 2010-2039 s'explique par

l'importance de la variabilité interne à ces horizons ce qui se traduit par une diminution des CV au fur et à mesure que l'on considère des horizons futurs plus lointains (Hawkins et Sutton 2009). Ainsi si la variabilité interne domine à court terme et diminue avec l'horizon, la variabilité inter modèle domine aux horizons plus lointains.

Les cartes des CV des MAP 1 heure - 2 ans (CORDEX), des MAP 1 jour - 2 ans (CORDEX) et des MAP 1 jour - 2 ans (CMIP6) sont regroupées à la Figure 4.14. On peut voir que dans le patron spatial des CV pour CORDEX demeure relativement bruyant à l'horizon 2010-2039, un peu moins à l'horizon 2040-2069, alors que les valeurs plus faibles et plus homogènes sont observées à l'horizon 2070-2099 (deux premières lignes de la Figure 4.14). La situation est différente pour l'ensemble CMIP6 où un patron spatial clair émerge aux horizons futurs plus lointains avec des valeurs de CV plus élevées dans les trois provinces centrales et à l'ouest de l'Ontario.

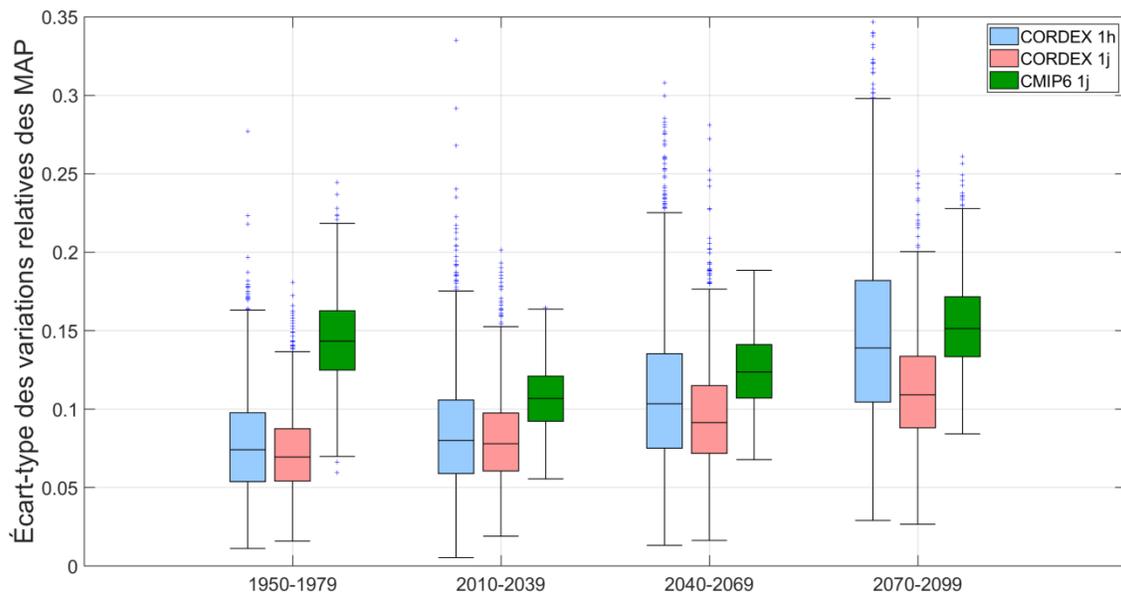


Figure 4.12 - Distributions (box plots) aux points de la grille commune des écarts-types des variations relatives entre les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 des MAP 1 heure – 2 ans et des MAP 1 jour – 2 ans simulées par l'ensemble CORDEX -8.5) et des MAP 1 jour – 2 ans simulées par l'ensemble CMIP6 SSP-8.5).

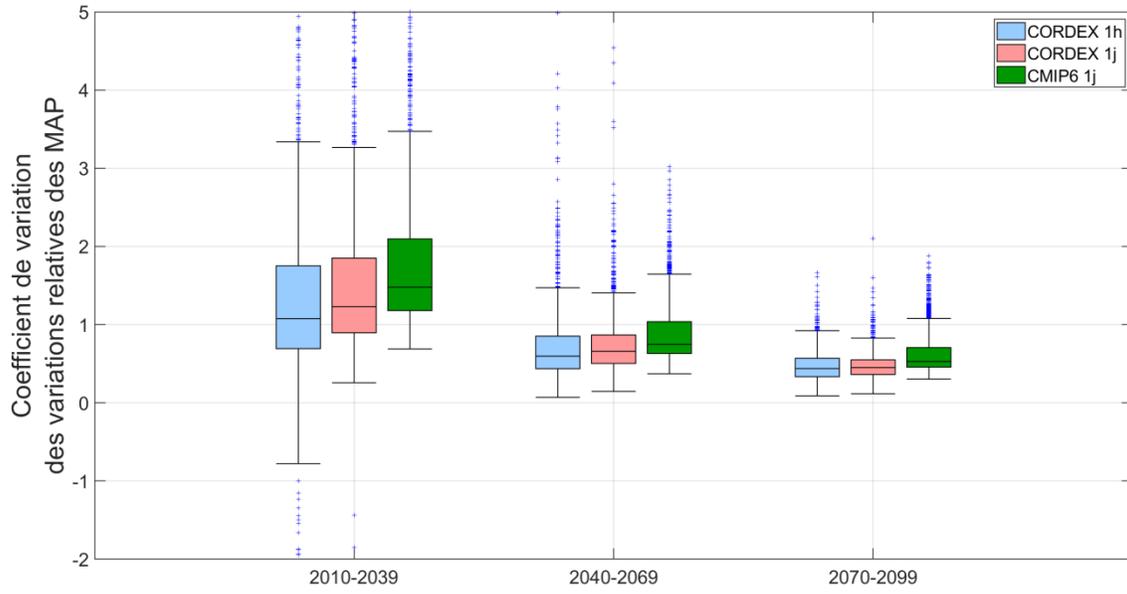


Figure 4.13 - Distributions (box plots) aux points de la grille commune des coefficients de variation des variations relatives entre les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 des MAP 1 heure – 2 ans et des MAP 1 jour – 2 ans simulées par l'ensemble CORDEX (RCP-8.5) et des MAP 1 jour – 2 ans simulées par l'ensemble CMIP6 (SSP-8.5).

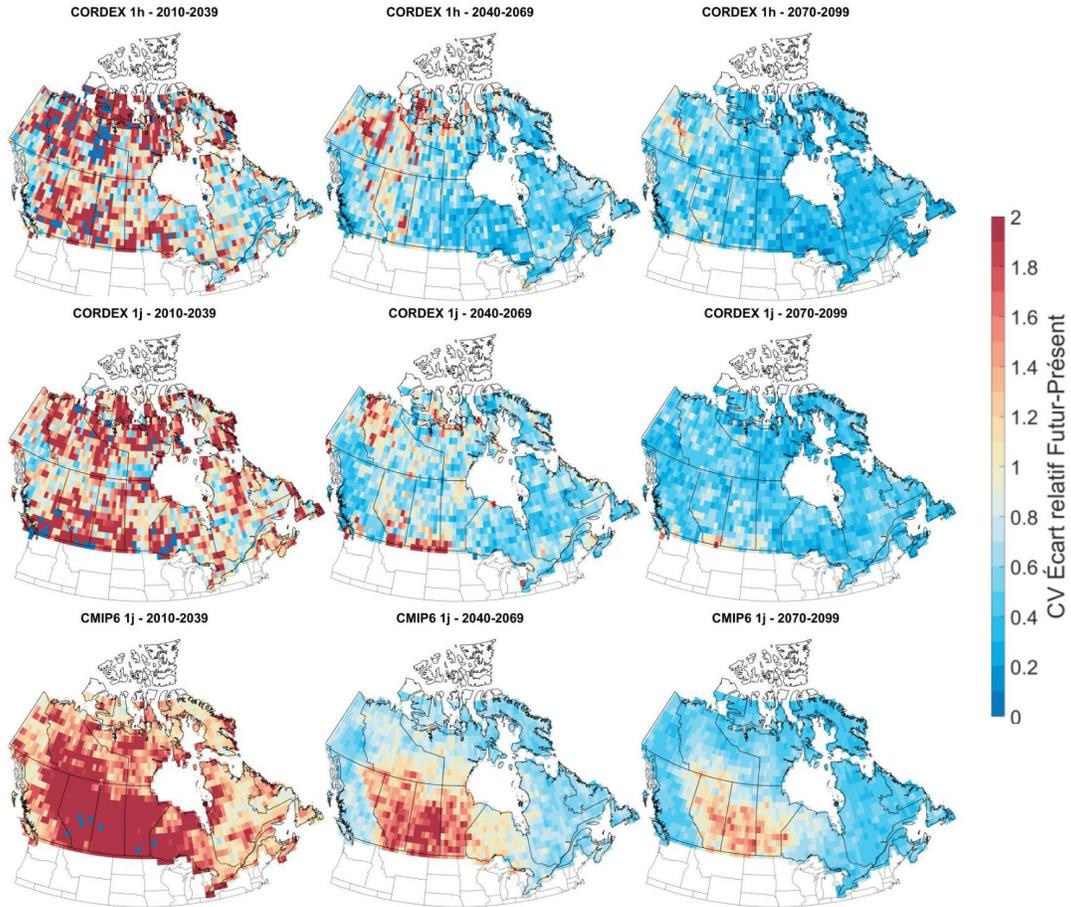


Figure 4.14 - Cartes des CV des variations relatives aux points de la grille commune des MAP 1 h - 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX (1^{ère} ligne), des MAP 1 j - 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX (2^e ligne) et des MAP 1 j - 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 (3^e ligne) entre les périodes 2010-2039 (1^e colonne), 2040-2069 (2^e colonne) et 2070-2099 (3^e colonne) et la période de référence 1980-2009.

5 - Relations température-précipitation

Le Chapitre 4 présentait un survol des analyses préliminaires des projections futures des MAP simulés par les ensembles CMIP6 et CORDEX. Les travaux présentés dans le présent chapitre décrivent l'approche retenue pour calculer les MAP en climat futur. L'idée de base est d'utiliser les relations température-précipitation (T-P), que nous désignerons aussi par *scaling* T-P, afin d'estimer les variations d'intensité des MAP en climat futur à partir des variations de températures. L'hypothèse sous-jacente est que la capacité de l'atmosphère à stocker de l'humidité, aussi appelé *scaling* thermodynamique et décrite par la relation de Clausius-Clapeyron (C-C), est le principal facteur conditionnant l'évolution future des précipitations extrêmes. Le taux d'augmentation de la capacité de stockage d'humidité par l'atmosphère, désigné par le coefficient pluie-température dans ce qui suit, est de l'ordre de $+7\%/^{\circ}\text{C}$ selon la relation de C-C. Plusieurs autres facteurs ont cependant un impact sur l'évolution future des précipitations extrêmes dont la disponibilité en humidité et les trajectoires des systèmes stratiformes. Une littérature abondante a déjà été publiée sur ce sujet (voir Martinkova et Kysely 2020).

Le présent chapitre est structuré comme suit. La Section 5.1 décrit la représentation mathématique de la relation T-P adoptée. Une analyse de l'évolution future des températures moyennes annuelles simulées par les ensembles CIMIP6 et CORDEX est ensuite présentée à la Section 5.2. Les coefficients de *scaling* (CS) aux points de grille des modèles et de la grille commune sont respectivement analysés aux sections 5.3 et 5.4 respectivement. L'impact de la durée et de la période de retour sur les valeurs de ces derniers est discuté à la Section 5.5. Une version régionalisée des CS est présentée à la Section 5.6 et enfin la Section 5.7 introduit les facteurs de majoration utilisés pour tenir compte de la dépendance des CS en fonction de la durée et de la période de retour.

5.1 Représentation mathématique de la relation T-P

L'équation utilisée pour représenter la relation T-P est (CSA 2024) :

$$P_f = P_r (1 + \alpha)^{\Delta T} \quad (5.1)$$

où P_r est l'intensité de pluie en climat de référence, P_f est l'intensité de pluie en climat futur, α est le coefficient de *scaling* et ΔT la variation de température entre les périodes futures et de référence. Suivant la relation de C-C, $\alpha = 0.07$ pour le *scaling*, c.-à-d. une augmentation de 7% des intensités des précipitations pour chaque degré d'augmentation de la température. Si on isole α de l'équation (1), on a :

$$\alpha = \left(\frac{P_f}{P_r} \right)^{\frac{1}{\Delta T}} - 1 \quad (5.2)$$

Cette dernière expression permet d'estimer le coefficient de *scaling* α pour diverses périodes futures et divers forçages radiatifs à partir des intensités de pluie en climat de référence et en climat futur et de la variation de température entre ces deux périodes. L'utilisation de l'équation (5.2) permettra de voir dans quelle mesure les coefficients α diffèrent de $7\%/^{\circ}\text{C}$ et de distinguer de possibles patrons régionaux de ces valeurs.

5.2 Évolution future des températures moyennes annuelles

Les températures moyennes annuelles (TMA) ont été utilisées pour estimer les variations de températures ΔT apparaissant aux équations 5.1 et 5.2. Il convient de noter que d'autres options sont possibles (p. ex. variations de température moyenne de la période mai – octobre, variation de la température sur la période où les MAP sont majoritairement observés durant la période de référence). Des analyses complémentaires, non incluses dans le présent rapport par souci de concision, ont montrées que l'utilisation de ces autres indicateurs de température complexifiait la procédure et n'apportait aucune amélioration appréciable.

La Figure 5.1 présente les variations des TMA aux points de grille des modèles entre les périodes 2040-2079 et 2080-2099 et la période de référence pour les modèles CMIP6 (SSP-4.5 et SSP-8.5) et les modèles CORDEX (RCP-8.5). On peut constater que :

- Tous les modèles projettent des hausses des TMA à presque tous les points de grille et ce quel que soit le SSP ou la période future.
- Les hausses moyennes sur l'ensemble du territoire sont de l'ordre de 1.7 à 5.0°C pour la période 2040-2069 et de 2.4 à 7.2°C pour la période 2070-2099 pour le SSP 4.5 alors que les valeurs correspondantes pour le SSP-8.5 sont de 2.2 à 6.4°C pour 2040-2069 et de 4.0 à 10.9°C pour 2070-2099 (Tableau 5.1).
- Les hausses projetées, tant à l'échelle de l'ensemble du territoire qu'à l'échelle de chaque point de grille, varient considérablement d'un modèle à l'autre ce qui signifie que la sensibilité climatique varie grandement d'un modèle à l'autre (Tableau 5.1).
- Le Tableau 5.1 montre que les hausses des températures moyennes varient selon les saisons, la saison hivernale (décembre-janvier-février ou DJF) étant la plus affectée.

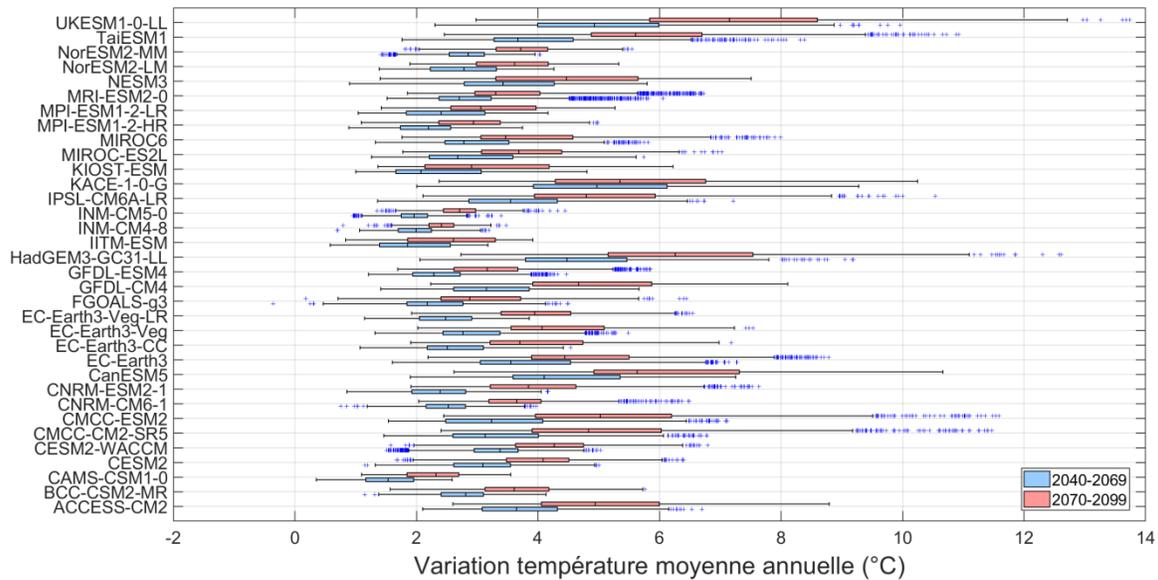
Tableau 5.1 - Médianes des variations moyennes de température (°C) simulées par l'ensemble CMIP6 sur le territoire d'étude en fonction du SSP et de l'horizon futur considérés et selon la saison. Les valeurs entre crochets correspondent aux plus petites et plus grandes hausses projetées par les modèles (DJF : décembre, janvier et février ; MAM : mars, avril et mai ; JJA : juin, juillet et août ; SON : septembre, octobre et novembre).

Saison	SSP-4.5		SSP-7.0		SSP-8.5	
	2040-2069	2070-2099	2040-2069	2070-2099	2040-2069	2070-2099
DJF	3.6 [1.7, 6.0]	4.8 [2.8, 9.1]	3.9 [2.3, 7.0]	6.6 [4.1, 11.4]	4.9 [2.7, 8.1]	8.7 [5.1, 13.7]
MAM	2.7 [1.5, 4.7]	3.5 [1.8, 5.9]	2.7 [1.4, 4.9]	4.6 [2.8, 7.6]	3.4 [1.9, 5.3]	6.2 [3.2, 9.5]
JJA	2.5 [1.2, 4.6]	3.4 [1.6, 6.4]	2.6 [1.5, 5.0]	4.7 [2.4, 8.0]	3.3 [1.5, 5.7]	6.2 [2.8, 9.8]
SON	3.1 [1.7, 5.6]	4.0 [2.4, 7.6]	3.1 [1.8, 6.1]	5.2 [3.3, 9.4]	4.1 [2.4, 7.2]	6.7 [4.2, 11.1]

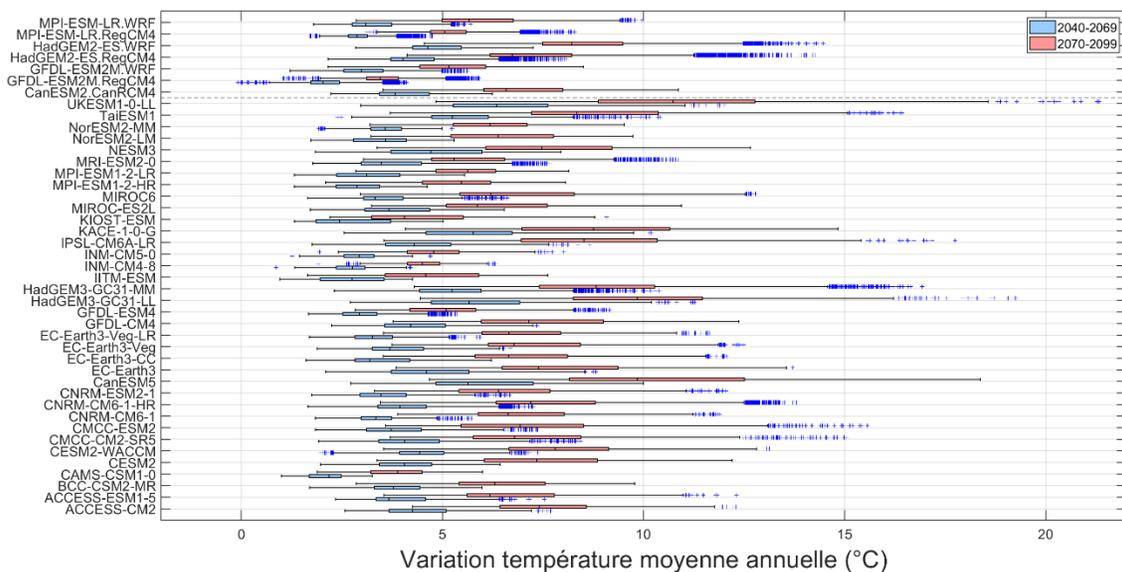
Année	2.9 [1.7, 5.0]	3.9 [2.4, 7.2]	3.0 [2.0, 5.6]	5.3 [3.2, 8.9]	3.9 [2.2, 6.4]	7.0 [4.0, 10.9]
-------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------

Les variations des TMA aux points de la grille commune ont été estimées en combinant les résultats des simulations de l'ensemble CMIP6 d'une part et les simulations de l'ensemble CORDEX d'autre part selon la procédure décrite à la Section 3.4. La Figure 5.2 présente les distributions des variations de TMA aux points de la grille commune alors que la Figure 5.3 présente les cartes des variations des TMA simulés par ces deux ensembles pour les trois horizons futurs et les divers scénarios de forçage radiatif. Sans surprise, on constate que les variations des TMA augmentent au fur et à mesure que l'horizon futur est plus lointain et le forçage radiatif plus important. Pour l'ensemble CMIP6, les différences entre les SSP commencent à être perceptibles à l'horizon 2040-2079 et sont majeurs à l'horizon 2070-2099. Les augmentations des TMA se manifestent d'abord dans les régions les plus nordiques et gagnent progressivement tout le territoire à l'horizon 2070-2099 pour le SSP-8.5. A cet horizon, les variations médianes à l'échelle de l'ensemble du territoire sont de 4.1°C pour le SSP-4.5, 5.5°C pour le SSP-7.0 et 7.3°C pour le SSP-8.5.

Les hausses des TMA simulées par l'ensemble CORDEX sont toutefois nettement plus petites. Ainsi les hausses médianes aux points de grille pour la période 2070-2099 selon cet ensemble (4.8°C) sont comprises entre les hausses médianes des SSP-4.5 (4.1°C) et SSP-7.0 5.5°C) à ce même horizon. Le patron spatial des hausses simulées par l'ensemble CORDEX est toutefois assez similaire à celui de l'ensemble CMIP6 (deux dernières lignes de la Figure 5.3). Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour expliquer ces différences (p. ex. biais dans les modèles régionaux ou globaux utilisés dans l'échantillon de simulation CORDEX). Des analyses complémentaires devraient être entreprises afin de bien comprendre l'origine de ces différences.



(a)



(b)

Figure 5.1 - Distributions (box-plots) des variations des TMA aux points de grille des modèles pour les périodes 2040-2079 et 2070-2099 : a) pour les modèles CMIP6 soumis au SSP-4.5 ; b) pour les modèles CMIP6 selon le SSP-8.5 (partie en-dessous de la ligne horizontale en tirets) et les modèles CORDEX selon le RCP-8.5 (partie au-dessus de la ligne horizontale en tirets).

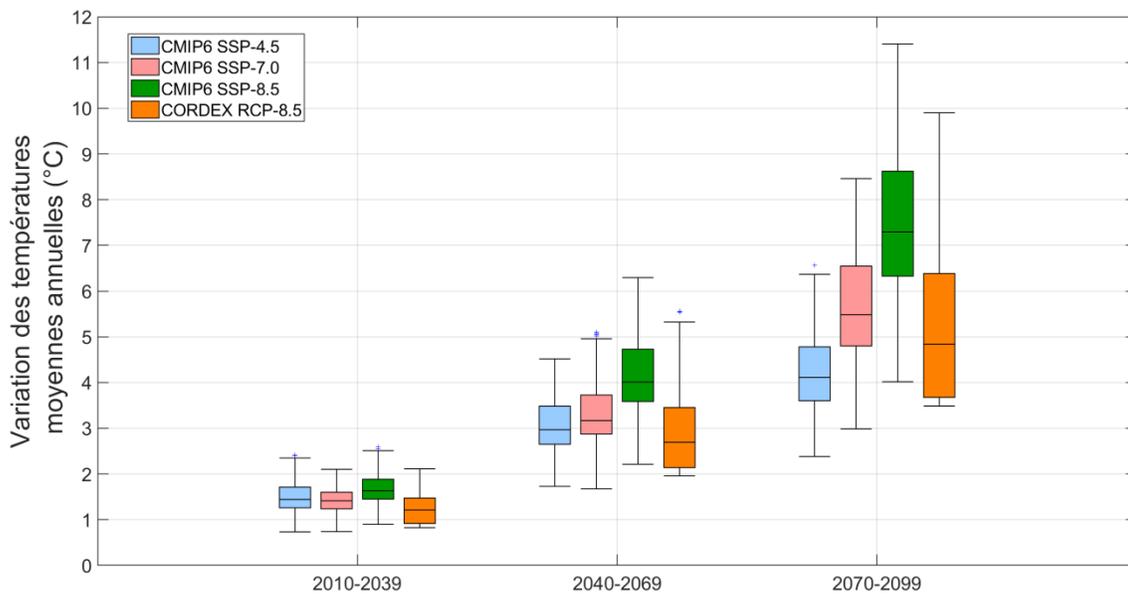


Figure 5.2 - Distributions (box plots) des variations des températures moyennes annuelles aux points de la grille commune simulées par l'ensemble CMIP6 entre les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 et la période de référence 1980-2009 pour le SSP-4.5 (en bleu), le SSP-7.0 (en rose) et le SSP-8.5 (en vert) et par l'ensemble CORDEX pour le RCP-8.5.

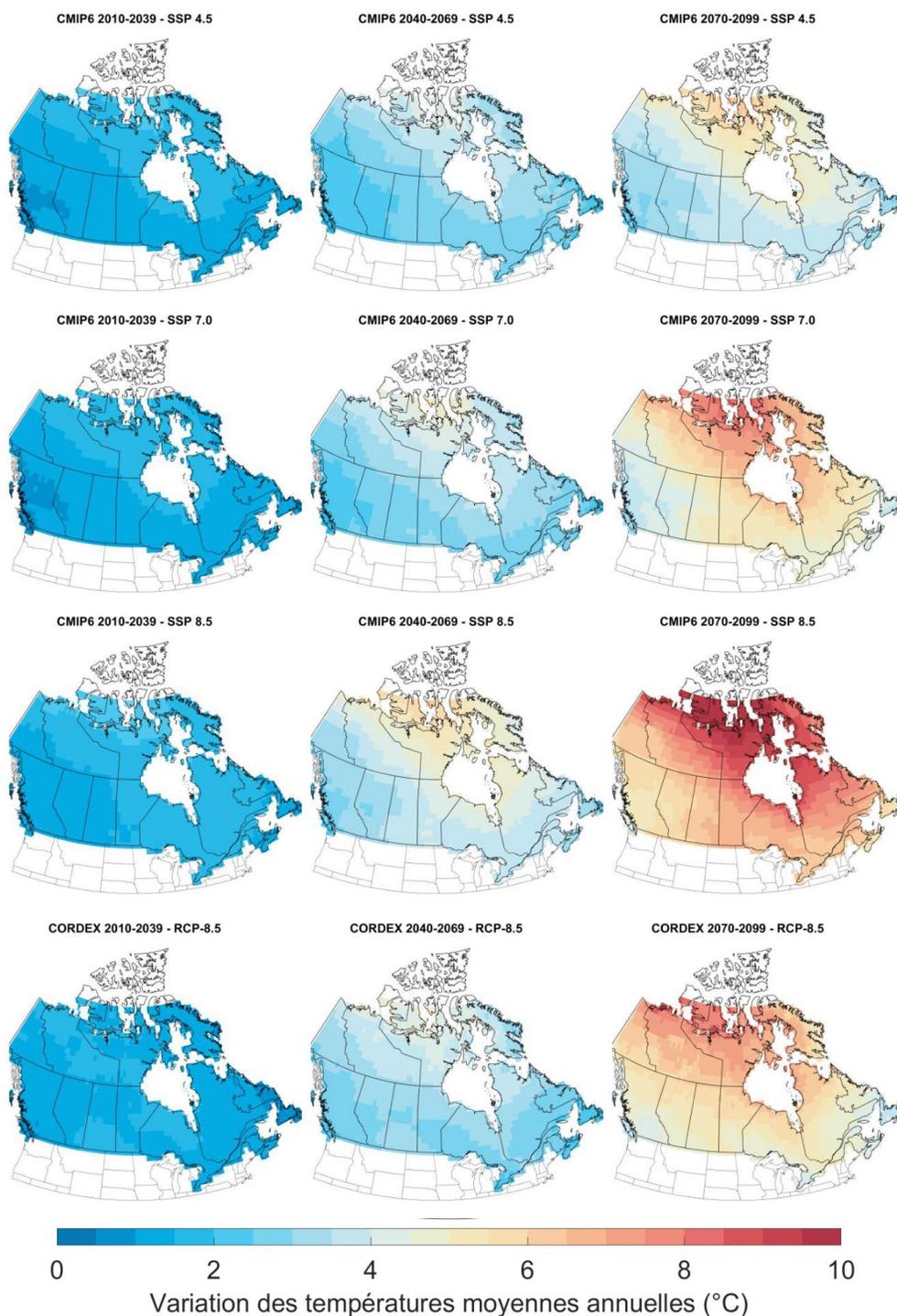


Figure 5.3 - Cartes des variations des TMA aux points de la grille commune simulées par l'ensemble CMIP6 selon les SSP-4.5 (1^e ligne), SSP-7.0 (2^e ligne) et SSP-8.5 (3^e ligne) et par l'ensemble CORDEX (4^e ligne) selon le RCP-8.5 pour les périodes 2010-2039 (1^e colonne), 2040-2069 (2^e colonne) et 2070-2099 (3^e colonne).

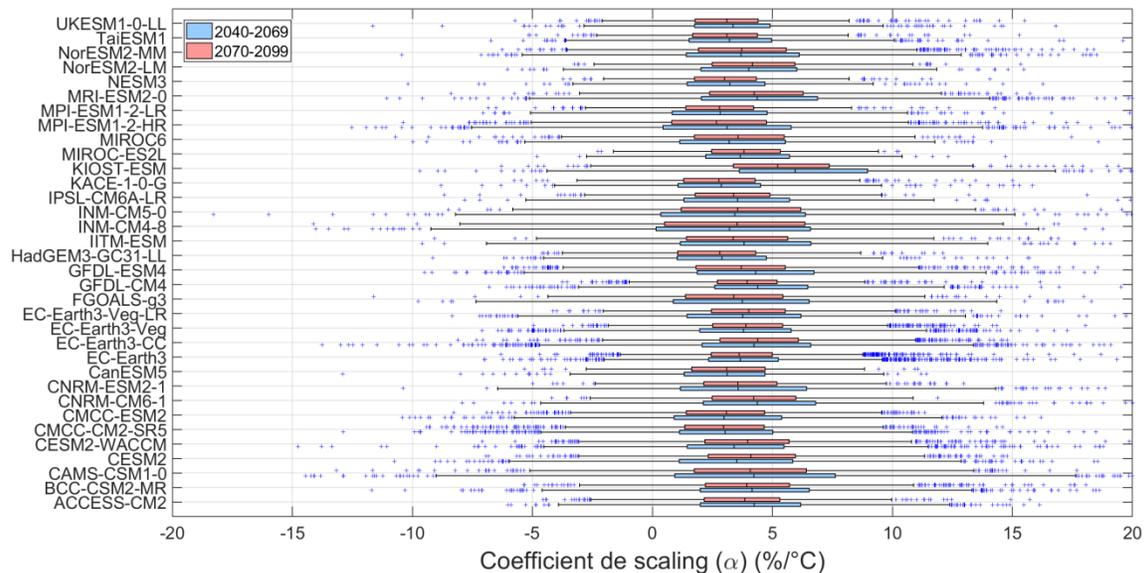
5.3 Coefficients de scaling aux points de grille des modèles

L'équation (5.2) a été utilisée pour estimer les CS α en chaque point de grille de chaque simulation CMIP6 et CORDEX en utilisant les intensités des MAP de durées et période de retour données des périodes futures et de référence et en utilisant les variations des TMA entre ces deux mêmes périodes.

La Figure 5.4 présente les distributions des CS aux points de grille des modèles CMIP6 pour les MAP 1 jour - 2 ans. L'examen de cette figure montre que :

- Pour tous les modèles, il y a une forte dispersion spatiale des CS (de -10 à +15%).
- Les valeurs médianes des CS de chaque modèle sont relativement similaires. Ainsi, la médiane de l'ensemble des modèles est de 3.6% avec un écart-type de 0.6% pour la période 2040-2069 et le SSP-4.5.
- L'horizon et le SSP ont peu d'impact sur les valeurs médianes des CS. Ainsi la valeur médiane de l'ensemble des modèles varie entre 3.4% et 3.6% peu importe la combinaison horizon/SSP considérée.
- L'horizon et le SSP ont toutefois un impact sur la dispersion des CS aux points de grille. Ainsi, dans les cas où la hausse projetée de température est plus élevée (horizon lointain et SSP-8.5), la dispersion spatiale de ces valeurs pour chacun des modèles est plus faible. On peut supposer qu'un forçage radiatif plus important permet au signal climatique de se manifester et diminue le ratio signal/bruit résultant en une plus grande homogénéité spatiale des CS.

La Figure 5.5 présente les résultats correspondants pour les CS estimés à partir des simulations CORDEX. On peut voir que les constats sont assez similaires à ceux des CS estimés à partir de l'ensemble CMIP6 à savoir que les distributions des CS sont assez similaires pour les différents horizons mais semblent légèrement plus élevées pour les MAP de durée 1 heure (Figure 5.5a) que pour les MAP de durée 1 jour (Figure 5.5b), la variabilité spatiale des CS est plus grande pour la période 2040-2069 que pour la période 2070-2099.



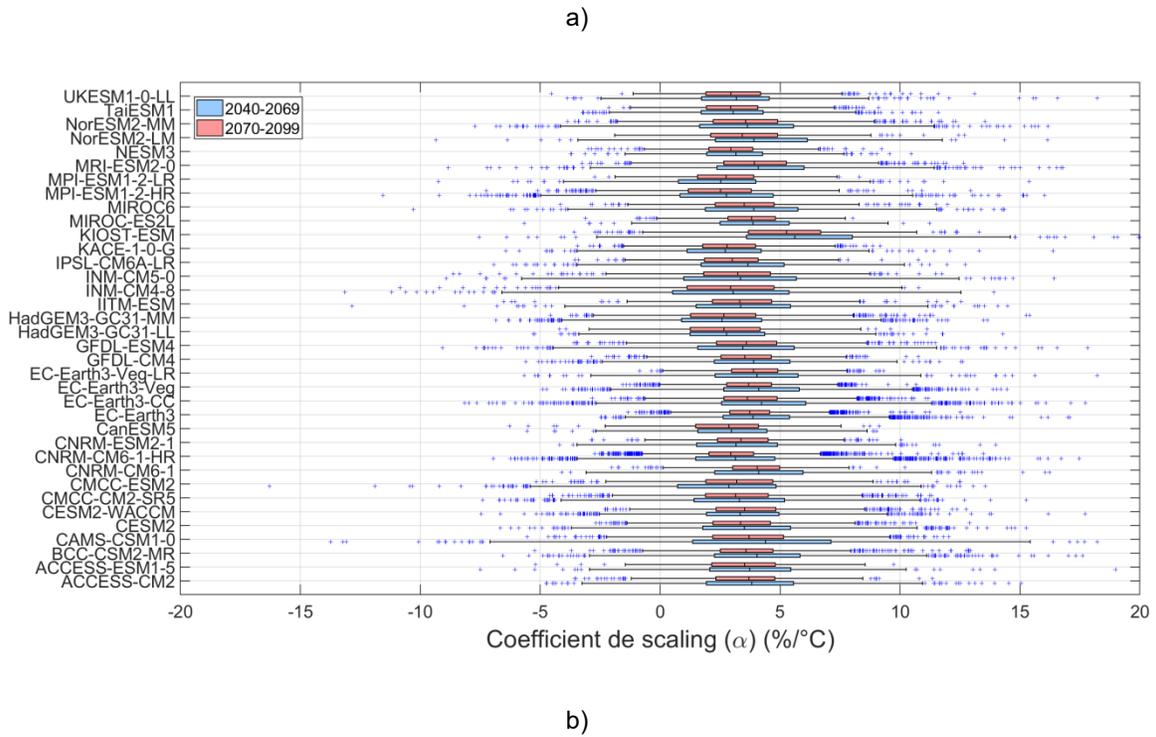
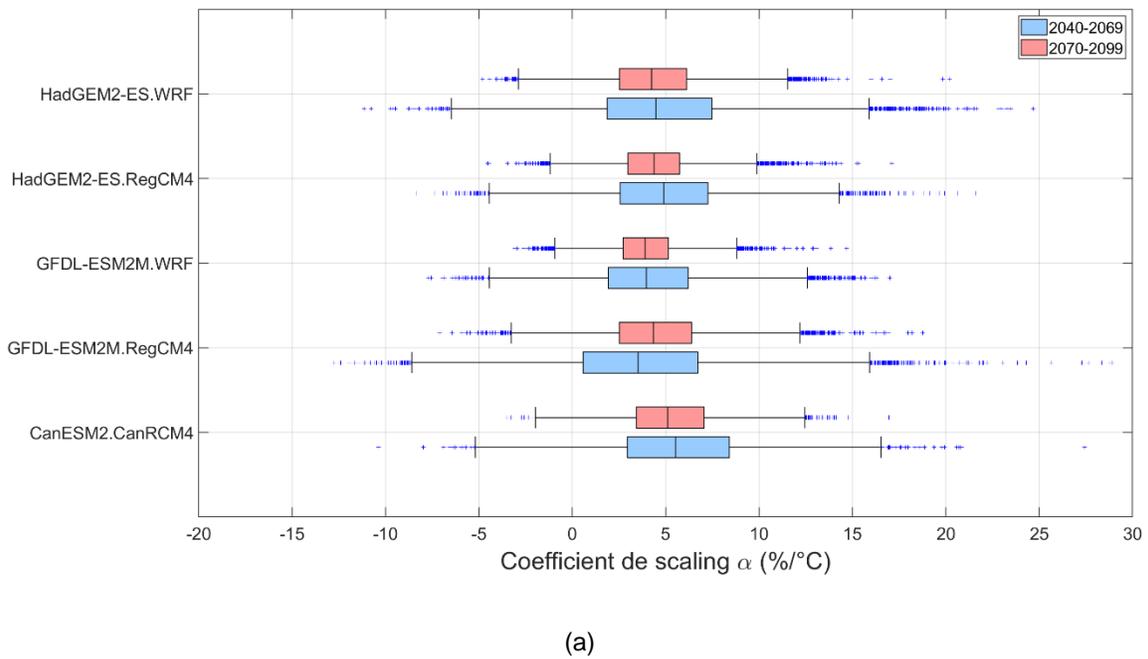
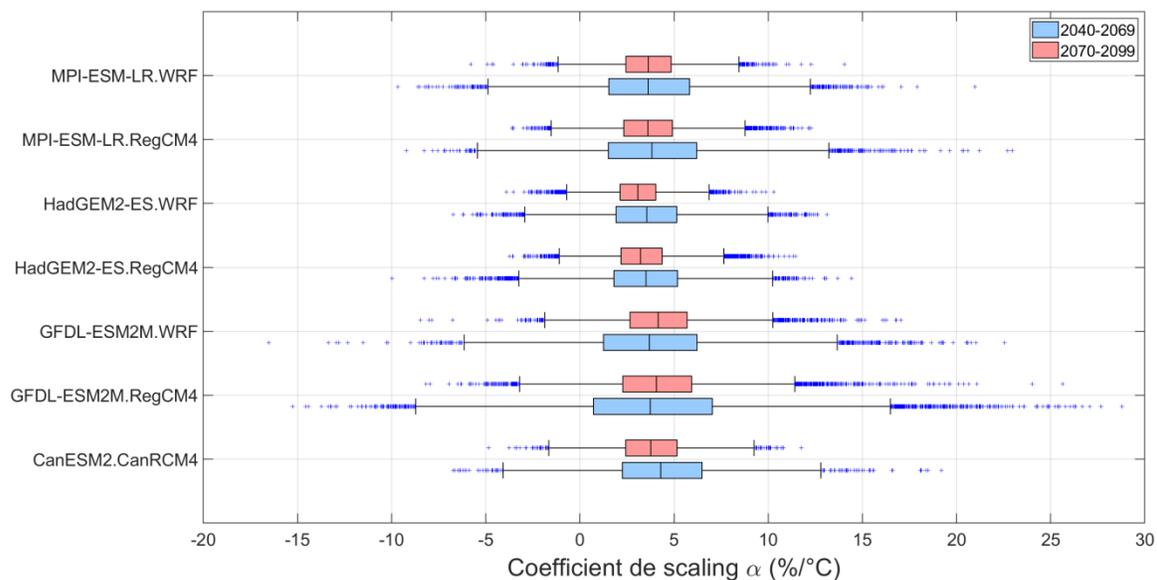


Figure 5.4 - Distributions (box-plots) des variations des coefficients de scaling (α) des MAP 1 jour – 2 ans aux points de grille des modèles CMIP6 pour les périodes 2040-2079 et 2070-2099 selon les scénarios : a) SSP-4.5 ; b) SSP-8.5.





(b)

Figure 5.5 - Distributions (boxplots) des CS (%/°C) aux points de grille des modèles CORDEX pour les périodes 2040-2069 et 2070-2099 et le RCP-8.5 associés aux : a) MAP 1 heure – 2 ans et b) MAP 1 jour – 2 ans.

5.4 Coefficients de scaling aux points de la grille commune

Les CS aux points de la grille commune ont ensuite été estimés à partir des valeurs calculées aux points de grille des simulations CMIP6 et CORDEX selon la procédure décrite à la Section 3.4. La Figure 5.6 présente les distributions des CS aux points de la grille commune pour les MAP 1 jour – 2 ans selon la période future et le SSP alors que la Figure 5.7 présente les cartes correspondantes. L'examen de ces deux figures montre :

- Les CS médians se situent entre 3.1 et 3.7% selon la combinaison période future/SSP considérée. Une minorité de points de grilles présente des CS supérieurs à 7%/°C et cette fraction diminue pour les horizons plus lointains.
- Les CS diminuent très légèrement lorsque l'on considère les périodes plus lointaines pour un SSP donné, cet effet étant plus marqué pour le SSP-8.5. Ainsi dans ce cas, le CS médian de la période 2010-2039 est de 3.6%/°C, de 3.4%/°C pour la période 2040-2069 et enfin de 3.1%/°C pour la période 2070-2099.
- Les CS ont tendance à légèrement diminuer pour un horizon donné lorsque le forçage radiatif augmente (SSP4.5 → SSP-7.0 → SSP-8.5). Ainsi, pour la période 2070-2099, on observe que le CS médian pour le SSP-8.5 est de 3.1 %/°C alors que la valeur correspondante pour le SSP-4.5 est 3.4 %/°C.
- Les distributions des CS associées aux MAP 1 jour – 2 ans simulés l'ensemble CORDEX (box plots orange de la Figure 5.6) sont très similaires aux distributions des MAP 1 jour – 2ans simulés par l'ensemble CMIP6 utilisant le SSP-8.5 (box plots verts de la Figure 5.6).

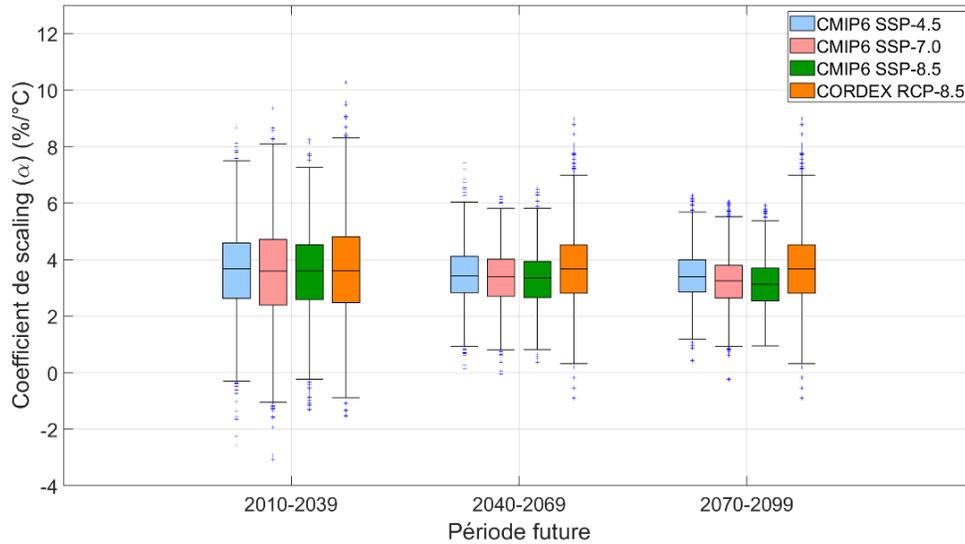


Figure 5.6 - Distributions (box plots) des CS (%/°C) estimés à partir des MAP 1 jour - 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 (SSP-4.5, SSP-7.0, SSP-8.5) et par l'ensemble CORDEX (RCP-8.5) aux points de la grille commune pour les périodes 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099.

- Les patrons spatiaux des valeurs de CS sont moins bruités pour les horizons futurs plus lointains et lorsque le forçage radiatif augmente. Les patrons spatiaux pour la période 2010-2039 demeurent très bruités et ce quel que soit le SSP.
- Les patrons spatiaux de l'ensemble CMIP6 (trois premières lignes de la Figure 5.7) qui émergent lorsque l'on progresse vers les horizons plus lointains montrent des CS plus élevés sur les côtes est et ouest (CS supérieurs à 4%/°C) alors que les valeurs dans la partie centrale sont globalement plus faibles (moins de 4%/°C).
- Les patrons spatiaux des CS de l'ensemble CORDEX (4^e ligne de la Figure 5.7) sont nettement plus bruités pour les horizons 2010-2039 et 2040-2069 que les patrons correspondants de l'ensemble CMIP6. En revanche, le patron spatial pour 2070-2099 de l'ensemble CORDEX présente plusieurs similarités avec celui de la même période de l'ensemble CMIP6. On note toutefois que les valeurs aux points de grille du Québec et de la région à la frontière entre les provinces centrales, les Territoires-du-Nord-Ouest et le Nunavut sont plus élevés pour l'ensemble CORDEX.

Ces résultats suggèrent que les α_j dépendent faiblement de la période future et du scénario de forçage radiatif et que le patron spatial de ces valeurs demeure relativement inchangé et se précise avec le temps et lorsque le forçage radiatif est plus élevé.

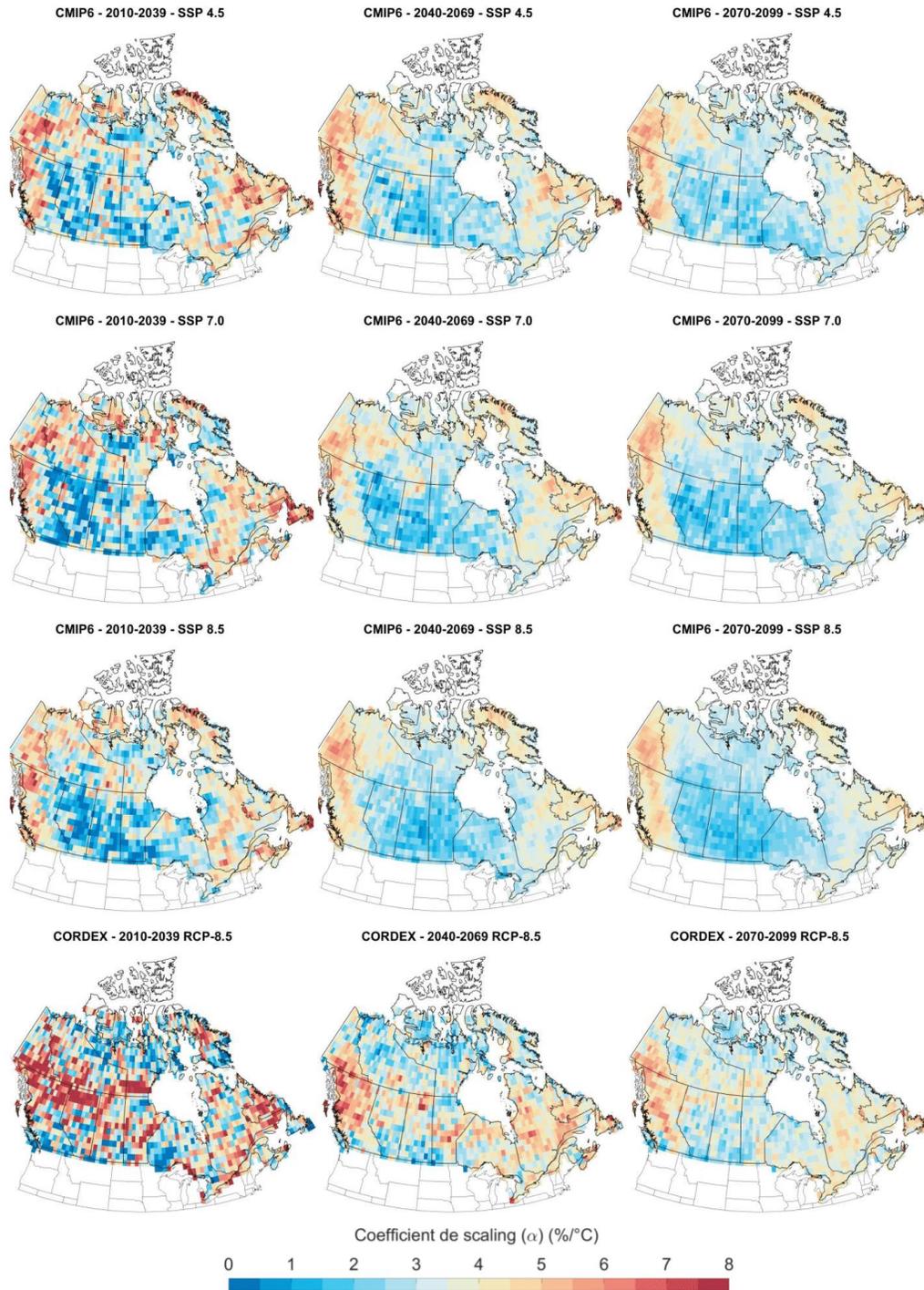


Figure 5.7 - Cartes des α_i (%/°C) estimés à partir des MAP 1 jour - 2 ans simulés par l'ensemble CMIP6 aux points de la grille commune selon les SSP-4.5 (1^{er} ligne), SSP-7.0 (2^e ligne) et SSP-8.5 (3^e ligne) et à partir des MAP 1 jour - 2 ans simulés par l'ensemble CORDEX selon le RCP-8.5 (4^e ligne) pour les périodes 2010-2039 (1^{er} colonne), 2040-2069 (2^e colonne) et 2070-2099 (3^e colonne).

5.5 Impact de la durée et de la période de retour

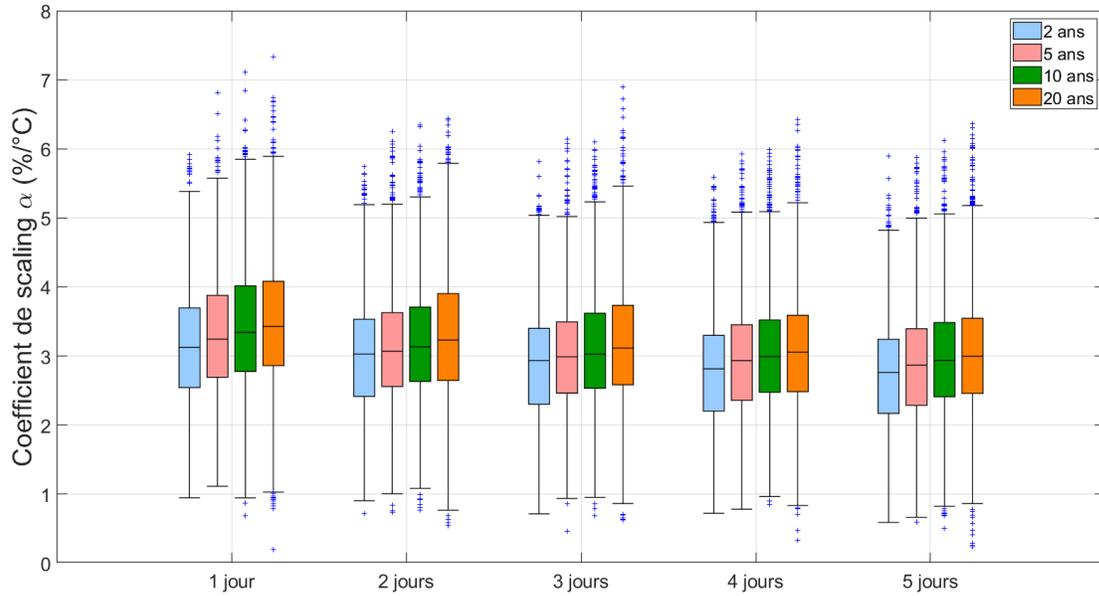
Les CS estimés à partir des MAP de différentes durées et périodes de retour ont été comparés. La Figure 5.8 montre les distributions des CS aux points de la grille commune selon les ensembles CMIP6 (Figure 5.8a) et CORDEX (Figures 5.8b) pour la période 2070-2099 et les scénarios SSP-8.5 et RCP-8.5 selon le cas. On constate que :

- Les CS diminuent avec la durée et augmentent avec la période de retour et ce tant pour l'ensemble CMIP6 que pour l'ensemble CORDEX.
- La dépendance en fonction de la période de retour est de plus en plus marquée pour les MAP de courte durée. Ainsi pour la durée 1 heure, le CS médian pour la période de retour 2 ans est de 4.2%/°C et s'élève à 5.3%/°C pour la période de retour 20 ans alors que pour la durée 1 jour ces valeurs sont respectivement de 3.5%/°C et 3.7%/°C selon l'ensemble CORDEX et de 3.1%/°C et 3.4%/°C selon l'ensemble CMIP6.
- Les CS de l'ensemble CORDEX sont supérieurs à ceux de l'ensemble CMIP6 pour les durées communes 1 jour à 5 jours.
- Les CS, toutes durées et périodes de retour confondues, sont inférieurs à 7%/°C à une vaste majorité de points de grille et ce même pour la durée 1 heure.

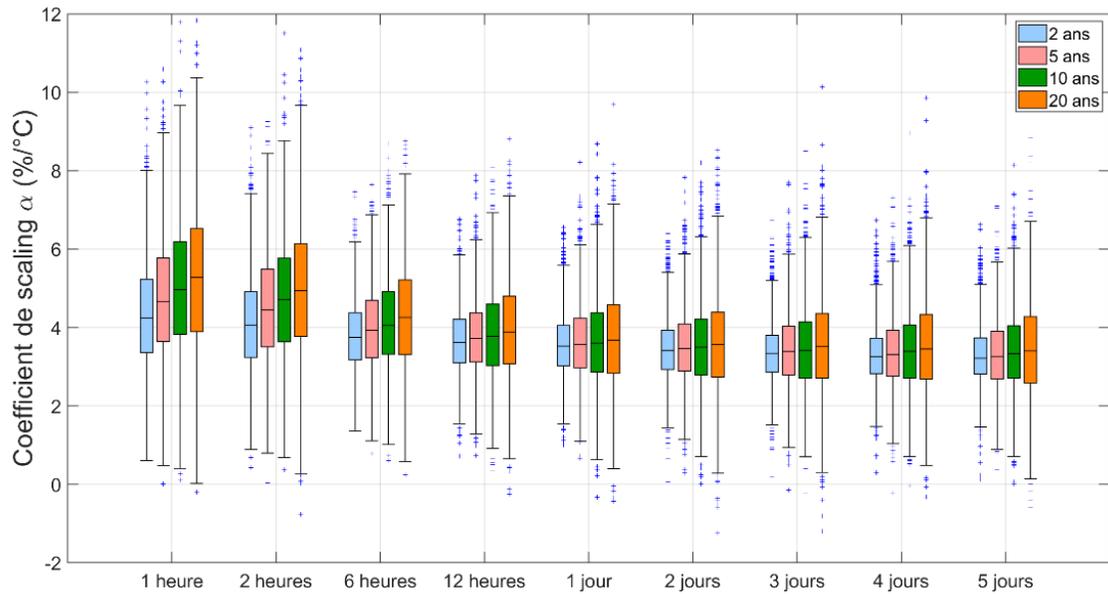
Le portrait présenté plus haut est global. Un examen des différences entre les CS estimés à partir des MAP de différentes durées et périodes de retour en chaque point de grille a été conduite. Pour ce faire, on définit les ratios entre les α_j associés aux MAP de diverses durées et périodes de retour à chaque point de grille par rapport à la valeur correspondante pour la durée 1 jour et la période de retour 2 ans :

$$\delta\alpha_j(d, T, H, S) = \frac{\alpha_j(d, T, H, S)}{\alpha_j(d_R, T_R, H, S)} \quad (5.3)$$

$\delta\alpha_j(d, T, S, H)$ correspond donc au rapport entre la valeur de CS de durée d et période de retour T et la valeur correspondante pour la durée de référence $d_R = 1$ jour et la période de retour de référence $T_R = 2$ ans pour l'horizon H et le scénario de forçage S au point de grille j de la grille commune. Ces valeurs ont été estimées en chaque point de grille pour chaque combinaison d - T , chaque horizon H et chaque scénario de forçage radiatif S .



(a)



(b)

Figure 5.8 - Distributions (box plots) des CS aux points de la grille commune pour les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 associés aux : a) MAP de durées 1 jour à 5 jours et de période de retour 2 à 20 ans simulés par l'ensemble CMIP6 pour le SSP-8.5; b) MAP de durées 1 heure à 5 jours et de période de retour 2 à 20 ans simulés par l'ensemble CORDEX pour le RCP-8.5. A noter que dans ce dernier cas l'axe des y a été tronqué à 12%/°C par souci de clarté.

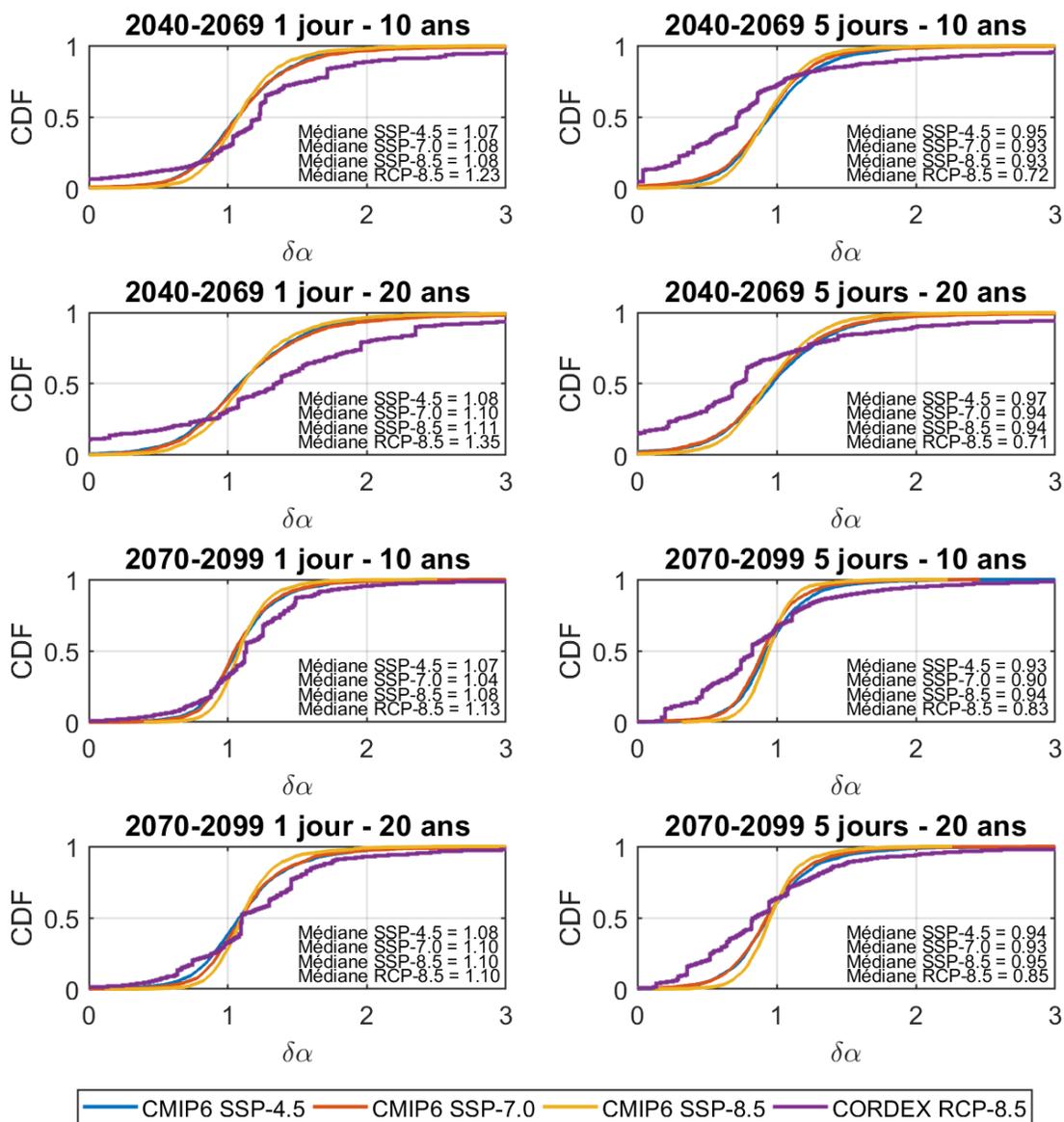


Figure 5.9 - Fonctions de répartition des ratios $\delta\alpha$ (équation 5.3) aux points de la grille commune associés aux MAP de durée 1 jour (1^e colonne) et 5 jours (2^e colonne) et de périodes de retour 10 ans (1^e et 3^e lignes) et 20 ans (2^e et 4^e lignes) simulés par les ensembles CMIP6 et CORDEX pour les périodes 2040-2069 (1^e et 2^e lignes) et 2070-2099 (3^e et 4^e lignes). Les médianes des distributions sont indiquées sur chaque graphique.

La Figure 5.9 montre les fonctions de répartition (CDF) des ratios $\delta\alpha_j(d, T, S, H)$ aux points de la grille commune de l'ensemble CMIP6 pour les durées 1 et 5 jours et périodes de retour 10 et 20 ans, et les périodes 2040-2079 et 2070-2099 de même que les valeurs correspondantes pour l'ensemble CORDEX. Cette figure montre que :

- La distribution des $\delta\alpha_j$ dépend peu du SSP pour un horizon, une durée et une période de retour donnés pour l'ensemble CMIP6. En effet, on observe que les médianes restent pratiquement inchangées et que les fonctions de répartition associées aux différents SSP sont très similaires et ce peu importe la durée ou la période de retour considérées. La seule différence survient pour le SSP-8.5 qui présente généralement des distributions des $\delta\alpha_j$ plus resserrées que les autres SSP. Ce resserrement est encore plus marqué à l'horizon 2070-2099 par rapport à l'horizon 2040-2069. Il peut être associé au renforcement du signal climatique pour les horizons lointains et les scénarios de forçage plus élevés.
- Les distributions des $\delta\alpha_j$ se déplacent très légèrement vers la gauche lorsque la durée augmente pour une période de retour donnée pour l'ensemble CMIP6. Ainsi pour l'horizon 2040-2069, le SSP-8.5 et la période de retour 2 ans, la médiane des distributions transite de 1.00 pour les CS de durée 1 jour, à 0.92 pour la durée 3 jours à 0.88 pour la durée 5 jours. Cet effet est similaire à l'horizon 2070-2099.
- Les distributions des $\delta\alpha_j$ se déplacent très légèrement vers la droite lorsque la période de retour augmente pour une durée donnée pour l'ensemble CMIP6. Ainsi pour l'horizon 2040-2069, le SSP-8.5 et la durée 1 jour, la médiane des distributions des CS passe de 1 pour la période de retour 2 ans à 1.08 pour la période de retour 10 ans et à 1.11 pour la période de retour 20 ans. Cet effet est similaire à l'horizon 2070-2099.
- L'ensemble CORDEX présente dans l'ensemble des distributions des $\delta\alpha_j$ beaucoup plus bruitées et plus dispersées. Encore là, un tel effet est certainement en grande partie attribuable au nombre relativement restreint de simulations de l'ensemble CORDEX par rapport à l'ensemble CMIP6.

Il est à noter que les résultats pour les autres durées et périodes de retour sont similaires à ceux rapportés précédemment (ces résultats ne sont pas rapportés à la Figure 5.9 afin d'alléger les graphiques).

La Figure 5.10 permet de comparer la distribution spatiale des α_j de durées 1 jour et 5 jours et de périodes de retour 2 et 20 ans à l'horizon 2070-2099 simulés par les ensembles CMIP6 et CORDEX selon le SSP-8.5 ou RCP-8.5 selon le cas. On peut voir que globalement les valeurs de α_j sont plus bruitées pour les simulations CORDEX, ce qui peut s'expliquer par le plus petit nombre de simulations, et pour la période de retour 20 ans. On constate tout de même certaines similarités entre ces patrons notamment les valeurs plus élevées des α_j sur la côte et la région ouest et, dans une moindre mesure, sur la côte est.

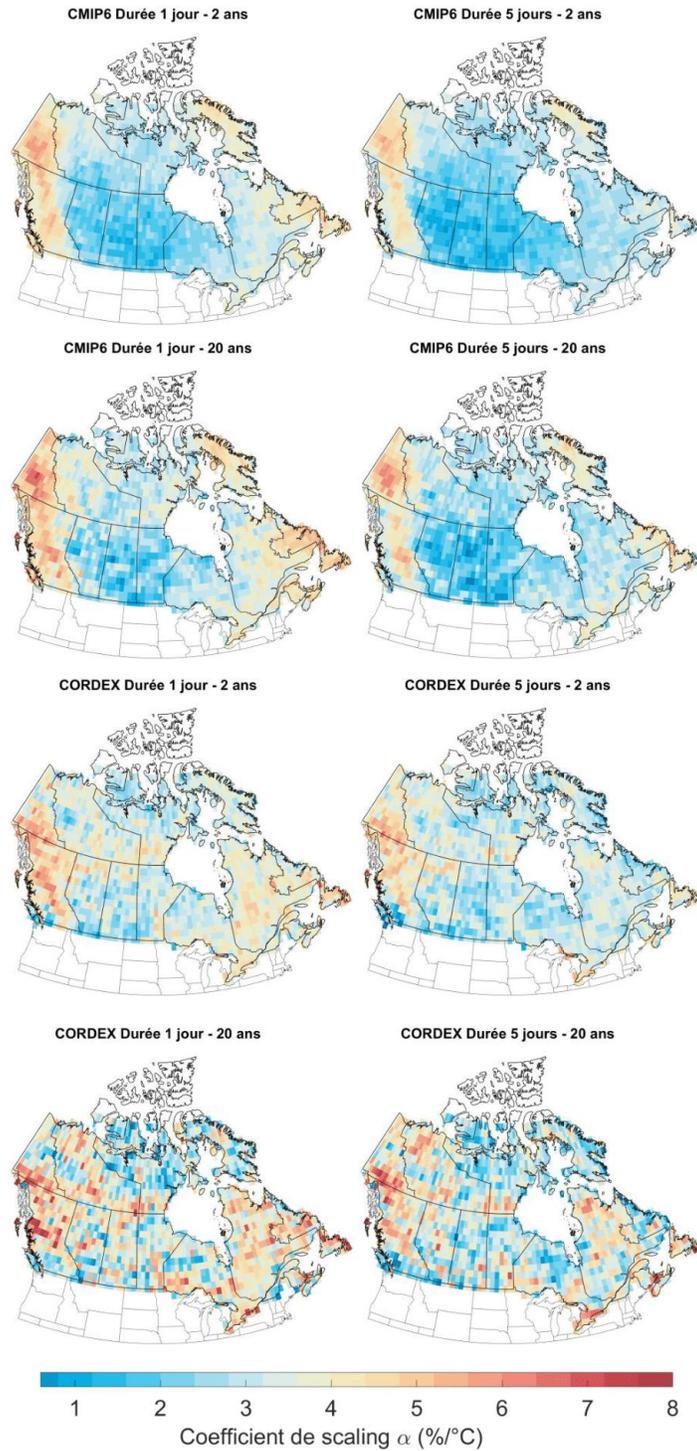


Figure 5.10 - Cartes des α_j pour les durées 1 jour (1^e colonne) et 5 jours (2^e colonne) et les périodes de retour 2 ans (1^e et 3^e lignes) et 20 ans (2^e et 4^e lignes) à l'horizon 2070-2099 simulées par l'ensemble CMIP6 (deux premières lignes) selon le SSP-8.5 et par l'ensemble CORDEX (deux dernières lignes) selon le RCP-8.5.

En résumé :

- a) Les CS aux points de grille dépendent faiblement du SSP et de l'horizon futur considérés.
- b) Les CS varient selon les régions mais les patrons régionaux des CS sont assez similaires pour les différentes durées et périodes de retour.
- c) Les CS sont fonctions de la durée (CS plus élevés pour les durées plus courtes) mais sont plus faiblement dépendants de la période de retour.

En première approximation, on peut donc supposer que les patrons régionaux des α_j ne dépendent pas de l'horizon futur et du scénario de forçage radiatif. De plus, on suppose que ces patrons spatiaux sont les mêmes pour les différentes durées et périodes de retour du MAP.

5.6 Régionalisation des coefficients de scaling

Les résultats précédents suggèrent d'utiliser les patrons régionaux des valeurs de CS et de moduler ces patrons en fonction de la durée considérée. Ainsi des valeurs régionales de CS seront définies et ces valeurs ajustées en fonction de la durée du MAP considéré. Les valeurs estimées pour la période 2070-2099 et le SSP 8.5 semblent les plus appropriées pour identifier ces patrons régionaux puisque le signal de changement climatique est plus fort pour cette période et ce SSP. La distribution spatiale des CS de durée 1 jour et de période de retour 2 ans a été retenue comme état de référence.

L'algorithme de *clustering* des k-moyennes a été utilisé pour identifier des valeurs régionales des CS (MacQueen, 1967). Les valeurs de CS ainsi que la latitude et la longitude des points de grille ont été ajoutées comme intrants et l'algorithme a été appliqué à la carte des CS de la grille commune associés aux MAP 1 jour – 2 ans de la période 2070-2099 pour le SSP-8.5. Afin que les régions soient plus uniformes géographiquement et éviter certains effets indésirables (p. ex. formes des régions très irrégulières, tuile d'une région donnée isolée à l'intérieur d'une autre région, etc.), un poids plus important a été accordé à la latitude et à la longitude par rapport aux CS (ratio 2:2:1).

Quinze régions ont ainsi été identifiées (Figure 5.11). La Figure 5.12 présente les distributions des CS aux points de grille de chaque région alors que le Tableau 5.2 donne les moyennes, médianes et écarts-types des distributions régionales des CS. Les distributions des différentes régions sont relativement symétriques et distinctes d'une région à l'autre si ce n'est pour les régions 2 et 4 qui pourraient éventuellement être regroupées puisqu'assez similaires et contigües (Figure 5.11).

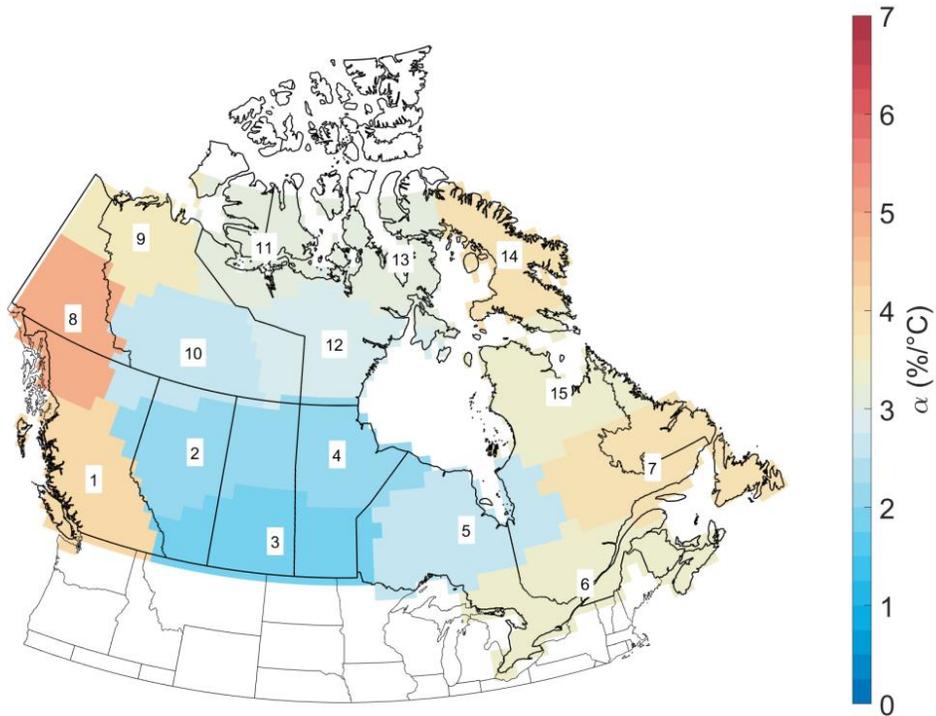


Figure 5.11 - Régionalisation des CS (voir Tableau 5.2).

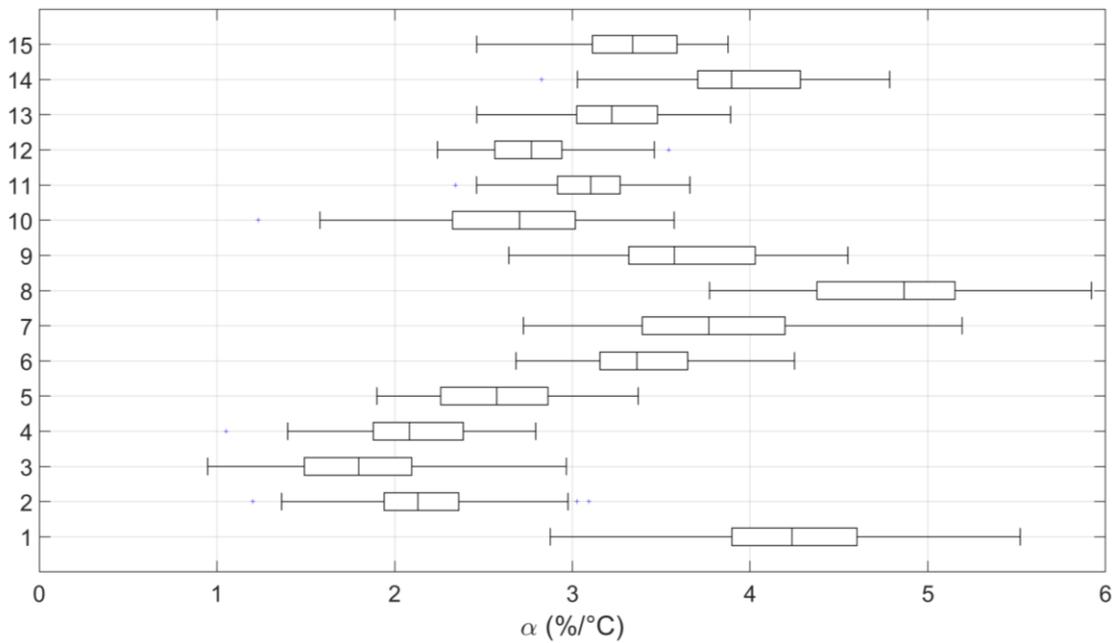


Figure 5.12 - Distributions (box plots) des CS des différentes régions de la Figure 5.11 aux points de la grille commune.

Tableau 5.2 - Valeurs médianes, moyennes et écarts-types des CS régionaux (voir Figure 5.11 pour une carte des régions).

Région	CS moyen (%)	CS médian (%)	Écart-type CS (%)
1	4.2	4.2	0.5
2	2.1	2.1	0.4
3	1.9	1.8	0.5
4	2.1	2.1	0.3
5	2.6	2.6	0.3
6	3.4	3.4	0.3
7	3.8	3.8	0.5
8	4.8	4.9	0.5
9	3.6	3.6	0.4
10	2.6	2.7	0.5
11	3.1	3.1	0.3
12	2.8	2.8	0.3
13	3.2	3.2	0.3
14	3.9	3.9	0.4
15	3.3	3.3	0.3
Toutes régions confondues	3.2	3.2	0.4

5.7 Facteurs de majoration en fonction de la durée et de la période de retour

Les résultats de la Section 5.5 nous amènent à formuler l'hypothèse que les CS régionaux changent en fonction de la durée et de la période de retour et qu'un facteur unique peut être appliqué à l'ensemble des régions ce que nous écrivons sous la forme suivante :

$$\alpha_R(d, T) = \beta(d, T) \alpha_R(1 \text{ jour}, 2 \text{ ans})$$

où $\alpha_R(d, T)$ est le CS de la région R de durée d et période de retour T, $\alpha_R(1 \text{ jour}, 2 \text{ ans})$ le CS de la région R associé à la durée 1 jour et la période de retour 2 ans et $\beta(d, T)$ le facteur de majoration pour la durée d et la période de retour T. Une telle formulation implique que l'on suppose que les facteurs de majoration des CS en fonction de la durée et de la période de retour sont identiques à tous les points de grille et toutes les régions.

Les facteurs $\beta(d, T)$ ont été estimés de la façon suivante. On définit $\alpha_j(m, S, H, d, T)$ la valeur du CS au point j de la grille commune, de la simulation m, pour l'horizon H et le SSP S estimée à partir des MAP de durée d et de période de retour T. On calcule la moyenne de cette valeur sur l'ensemble des points de grille :

$$\bar{\alpha}(m, S, H, d, T) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \alpha_j(m, S, H, d, T)$$

De même on fait la moyenne de ces dernières valeurs sur l'ensemble des simulations :

$$\bar{\alpha}(d, T) = \frac{1}{M} \sum_m \bar{\alpha}(m, S, H, d, T)$$

où la somme porte sur toutes les simulations disponibles tous scénarios S et tous horizons H confondus. $\bar{\alpha}(d, T)$ correspond donc à la moyenne des CS de durée d et de période de retour T. $\beta(d, T)$ est défini comme le rapport entre la moyenne des CS de durée d et de période de retour T et la valeur correspondante pour la durée 1 jour et la période de retour 2 ans :

$$\beta(d, T) = \frac{\bar{\alpha}(d, T)}{\bar{\alpha}(1 \text{ jour}, 2 \text{ ans})}$$

Le Tableau 5.3 présente les valeurs de $\beta(d, T)$ alors que la Figure 5.13 donne une représentation graphique de ces valeurs. On constate, conformément aux conclusions déjà formulées à la Section 5.5, que les $\beta(d, T)$ augmentent pour les courtes durées. La dépendance en fonction de la période de retour est plus importante pour les courtes durées et se manifeste par une augmentation des $\beta(d, T)$ avec la période de retour (Figure 5.13). Aucune dépendance claire avec la période de retour n'apparaît pour les durées 12 heures et plus. Il est important de rappeler que seules les simulations CORDEX sont utilisées pour l'estimation des $\beta(d, T)$ sous-journaliers et que seulement sept simulations sont disponibles. Ce faisant on supposera que les $\beta(d, T)$ ne dépendent pas de la période de retour et les valeurs moyennes sur les périodes de retour (colonne de droite du Tableau 5.3) seront utilisées par la suite. Ce choix est également motivé par des raisons de simplicité.

Tableau 5.3 - Facteurs de majoration des CS selon les durées et les périodes de retour.

Durée	Période de retour				Moyenne
	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans	
1 heure	1.29	1.38	1.50	1.55	1.43
2 heures	1.24	1.35	1.40	1.46	1.36
6 heures	1.08	1.14	1.19	1.27	1.17
12 heures	1.03	1.06	1.05	1.04	1.04
1 jour	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2 jours	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
3 jours	0.89	0.89	0.89	0.88	0.89
4 jours	0.86	0.87	0.86	0.84	0.86
5 jours	0.83	0.85	0.85	0.85	0.85

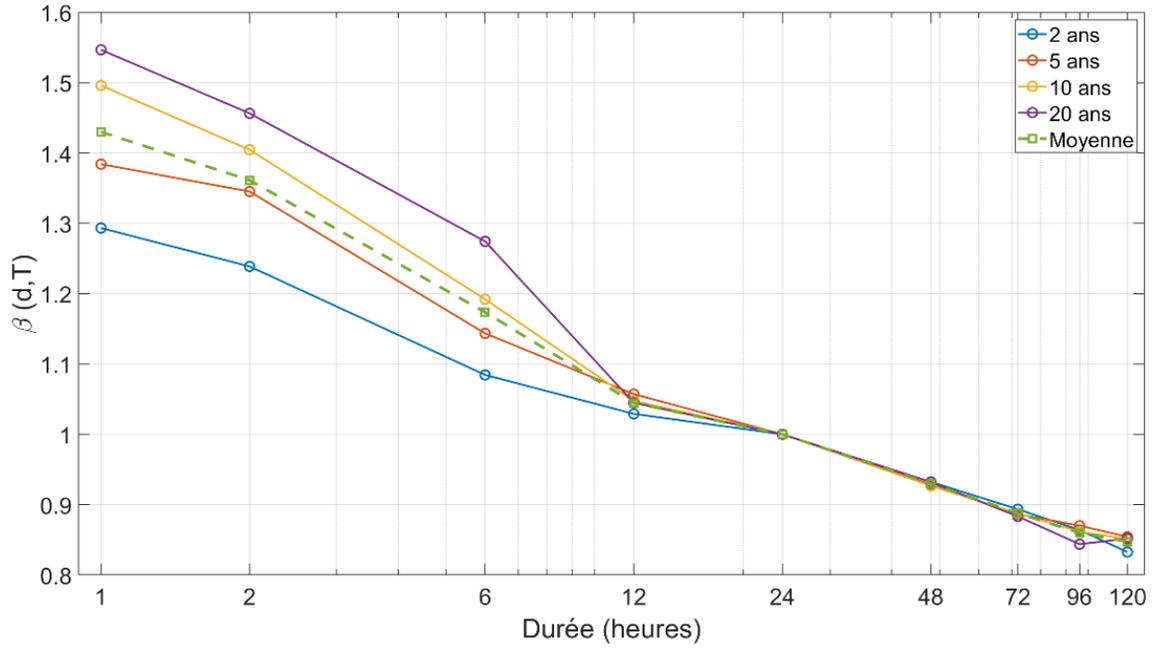


Figure 5.13 - Facteur de majoration $\beta(d,T)$ des CS en fonction des durées pour différentes périodes de retour. A noter que l'échelle des x est logarithmique.

6 - Procédure d'estimation des maxima annuels de précipitation en climat futur

Le présent chapitre décrit la procédure proposée pour estimer les majorations à appliquer aux intensités des courbes IDF actuellement disponibles afin d'estimer les intensités des pluies correspondantes en climat futur. Cette procédure s'appuie sur les analyses et conclusions du Chapitre 5.

6.1 Principe général

La procédure repose sur la relation entre pluies extrêmes et températures décrite par l'équation :

$$MAP_j(H, S; d, T) = MAP_j(H1; d, T) [1 + \alpha_j(d)]^{\Delta T_j(H, H1, S)} \quad (6.1)$$

où $MAP_j(H, S; d, T)$ est l'intensité du maxima annuel de précipitations (MAP) de durée d et période de retour T pour la période future H selon le scénario de forçage S au point de grille j , $MAP_j(H1; d, T)$ est l'intensité du MAP correspondant en période de référence $H1$, $\alpha_j(d)$ est le CS pour la durée d au point de grille j et $\Delta T_j(H, H1, S)$ la variation de TMA entre les périodes H et $H1$ au point de grille j selon le scénario S .

6.2 Sélection de l'horizon futur, de la période de référence et du scénario de forçage radiatif

La période de référence considérée dans les analyses précédentes est la période 1980-2009. Quatre autres périodes de 30 ans ont été considérées : 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099. Les variations relatives sont exprimées en termes des écarts relatifs entre les valeurs moyennes de la variable considérée pour chacune de ces périodes et la période de référence 1980-2009.

La période de référence, notée $H1$ dans l'équation 6.1, doit correspondre à la période historique pour laquelle on dispose de données sur les pluies extrêmes et pour laquelle les courbes IDF sont disponibles. Cette période peut donc être modifiée et les valeurs des intensités des MAP pour cette période, $MAP_j(H1; d, T)$ ajustées en conséquence.

Le choix de l'horizon futur H dépend de l'application considérée. S'il s'agit de la conception d'un ouvrage, cette période doit coïncider avec la période où l'ouvrage arrivera à la fin de sa durée de vie utile (voir l'exemple d'application du Chapitre 7).

Le choix du scénario de forçage radiatif est dicté par le caractère plus ou moins stratégique de l'ouvrage. Il est recommandé d'utiliser le SSP-7.0, le scénario SSP-8.5 étant de plus en plus considéré comme un scénario trop extrême et peu plausible. A noter que les différences entre les différents SSP demeurent relativement faibles jusqu'à l'horizon 2040-2069 et commencent à se manifester au-delà de cette période (Figure 5.3). Le choix du SSP a donc un impact que lorsque l'on s'intéresse à des projections en fin de siècle.

6.3 Estimation du coefficient de scaling α_j

Les analyses précédentes ont permis d'identifier des régions où les α_j sont relativement homogènes. Ces régions sont présentées à la Figure 6.1 et les valeurs des α_j de chaque région apparaissent au Tableau 6.1. La valeur régionale retenue est celle de la région où se trouve le point de grille j . Les résultats antérieurs ont permis de montrer que les α_j dépendent également de la durée du MAP considérés. On a donc pour le α_j au point de grille j appartenant à la région R :

$$\alpha_j(d) = \beta(d) \alpha(R, 1 j) \quad (6.2)$$

où $\beta(d)$ est le facteur de majoration associé à la durée d (Tableau 6.2) et $\alpha(R, 1 j)$ le α de la région R de durée 1 jour (Tableau 6.1).

6.4 Estimation de la variation de température moyenne annuelle $\Delta T_j(H, H1, S)$

L'horizon futur H , la période de référence $H1$ et le scénario de forçage radiatif S doivent être précisés. La variation de TMA au point de grille j est estimé à partir des résultats de l'ensemble CMIP6 (voir Section 5.2 et la Figure 5.2). D'autres horizons futurs sont possibles auxquels cas les variations des TMA au point de grille d'intérêt peuvent être calculées à partir de l'ensemble CMIP6 selon la procédure décrite à la Section 3.2.

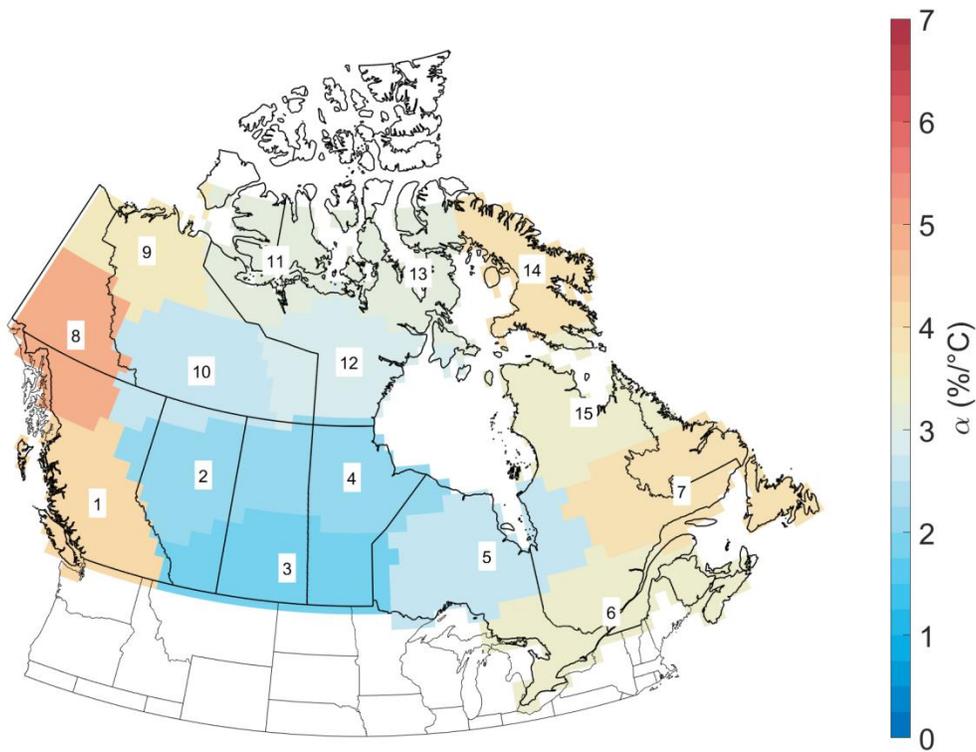


Figure 6.1 - Régionalisation des α de durée 1 jour (voir Tableau 6.1).

Tableau 6.1 - Valeurs régionales des α (%/°C) de durée 1 jour.

Région	α (%/°C)
1	4.2
2	2.1
3	1.9
4	2.1
5	2.6
6	3.4
7	3.8
8	4.8
9	3.6
10	2.6
11	3.1
12	2.8
13	3.2
14	3.9
15	3.3

Tableau 6.2 - Facteurs de majoration $\beta(d)$ des α selon les durées.

Durée	$\beta(d)$
1 heure	1.43
2 heures	1.36
6 heures	1.17
12 heures	1.04
1 jour	1.00
2 jours	0.93
3 jours	0.89
4 jours	0.86
5 jours	0.85

6.5 Intensités des maxima annuels de précipitation en climat de référence

L'intensité des MAP en climat de référence, $MAP_j(H1; d, T)$, est généralement donnée par les intensités des courbes IDF au site d'analyse ou à la station située à proximité du site d'analyse. La disponibilité de ces données peut déterminer le choix de la période de référence (voir Section 6.2).

6.6 Comparaison des variations des MAP simulés et des variations des MAP estimés à partir l'approche proposée

Rappelons que les variations relatives des MAP s'expriment comme suit :

$$\delta MAP_j(d, T; H, H1, S) = \frac{MAP_j(d, T; H, S) - MAP_j(d, T; H1)}{MAP_j(d, T; H1)}$$

où $MAP_j(d, T; H, S)$ est le MAP de durée d et de période de retour T à l'horizon H selon le scénario S au point de grille j et $MAP_j(d, T; H1, S)$ est la valeur correspondante pour la période de référence $H1$.

Les écarts entre les variations relatives estimées à partir de la procédure décrite à la Section 6.4, qui sera appelé relation T-P dans ce qui suit et sera désigné par $\delta MAP_j^{(T-P)}(d, T; H, S)$, et les variations calculées directement à partir des séries de précipitations simulées, $\delta MAP_j(d, T; H, S)$, en chaque point de la grille commune j , ont été estimés (le paramètre $H1$ de la période de référence est omis afin de simplifier la notation) :

$$\Delta MAP_j(d, T; H, S) = \delta MAP_j(d, T; H, S) - \delta MAP_j^{(T-P)}(d, T; H, S)$$

$\Delta MAP_j(d, T; H, S)$ correspond donc à l'écart entre les variations relatives des MAP de durée d et de période de retour T entre l'horizon H et la période de référence pour le scénario de forçage radiatif S au point de grille j estimés à partir de la relation T-P et les variations relatives des MAP correspondantes estimés à partir des séries simulées de précipitations.

On considère les MAP 1 jour – 2 ans, c.-à-d. les MAP qui ont été utilisés pour régionaliser les α , et donc $d = 1$ jour et $T = 2$ ans. Les valeurs de $\delta MAP_j^{(T-P)}(1 \text{ jour}, 2 \text{ ans}, H, S)$ sont donc estimés à partir de l'équation 6.1 pour chaque point de grille j la valeur régionale correspondante de α (Tableau 6.1) et les variations de TMA estimés à partir de l'ensemble CMIP6 à ce point de la grille commune pour le scénario S et l'horizon H .

La Figure 6.2 présente les distributions des écarts $\Delta MAP_j(d, T, H, S)$ pour les durées 1 heure, 1 jour et 5 jours et les périodes de retour 2 et 20 ans selon les horizons et SSP. Ces écarts sont calculés tant pour les MAP estimés à partir de l'ensemble CMIP6 (durée 1 jour à 5 jours) que pour l'ensemble CORDEX (durées de 1 heure à 5 jours). Pour les durées 1 à 5 jours, on constate que les écarts sont globalement centrés sur zéro pour l'ensemble CMIP6. De légers biais positifs (surestimations des MAP estimés à partir de la relation T-P) sont toutefois observés pour l'ensemble CORDEX. Une comparaison aux variations des MAP pour ces différents horizons montre toutefois que ces biais sont très inférieurs aux hausses projetées des MAP et à la variabilité inter-modèle (Figure 4.13).

Pour les durées 1 heure à 1 jour, on observe de légers biais, parfois positifs, parfois négatifs. Dans l'ensemble, les distributions des écarts sont centrées quoique la dispersion de ces écarts est beaucoup plus importante que pour l'ensemble CMIP6. Ces résultats sont concluants considérant que les valeurs régionales des α ont été établies à partir des résultats pour les MAP 1 jour – 2 ans et qu'aucune dépendance des α en fonction de la période de retour n'a été considérée.

Les écarts régionaux $\Delta MAP_j(d, T; H, S)$ pour la période 2070-2099 et les trois SSP entre les valeurs de la relation T-P et l'ensemble CMIP6 pour les durées 1 jour et 5 jours (3^e et 4^e ligne de la Figure 6.3) demeurent relativement petits pour toutes les régions. Il en va autrement pour les écarts avec l'ensemble CORDEX où des écarts parfois importants et très variables d'une région à l'autre sont observés que ce soit pour les durées 1 heure et 12 heures ou encore pour les durées 1 jour et 5 jours. Il faut rappeler que les majorations en fonction des durées ont été établies en considérant l'ensemble du territoire et suppose aucune dépendance régionale de ces valeurs. L'accès à un ensemble de simulations plus grands pour l'ensemble CORDEX pourrait permettre de moduler ces majorations selon les régions.

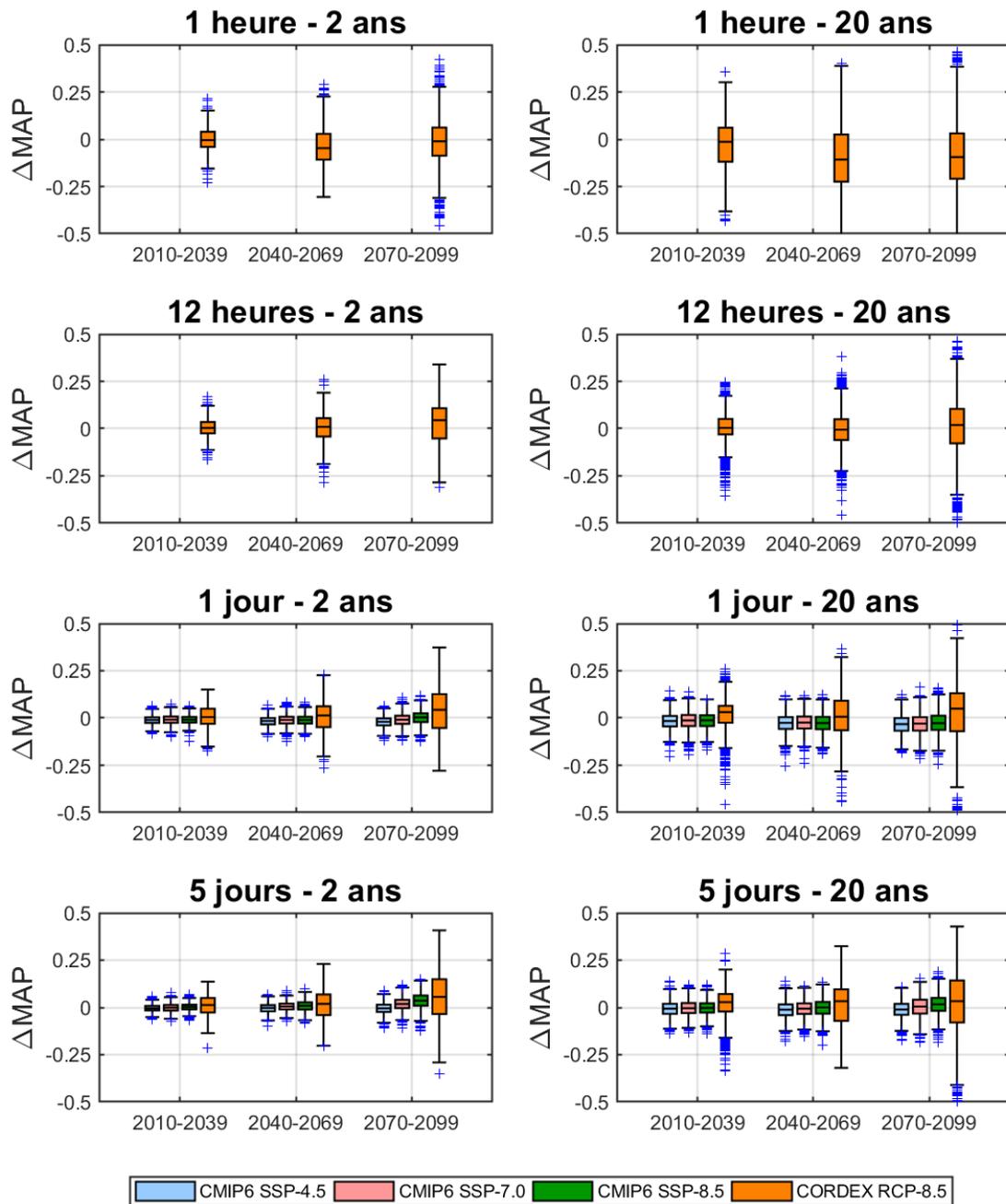


Figure 6.2 - Distributions des écarts $\Delta MAP_j(d, T, H, S)$ aux points de la grille commune entre les variations des MAP de durées 1 heure (1^e ligne), 12 heures (2^e ligne), 1 jour (3^e ligne) et 5 jours (4^e ligne) et de périodes de retour 2 ans (1^e colonne) et 20 ans (2^e colonne) calculées à partir de la relation T-P (équation 6.1) et les MAP estimés à partir des ensembles CMIP6 (durées 1 à 5 jours) et CORDEX (durées 1 à 5 jours) pour les différents horizons et scénarios de forçage radiatif.

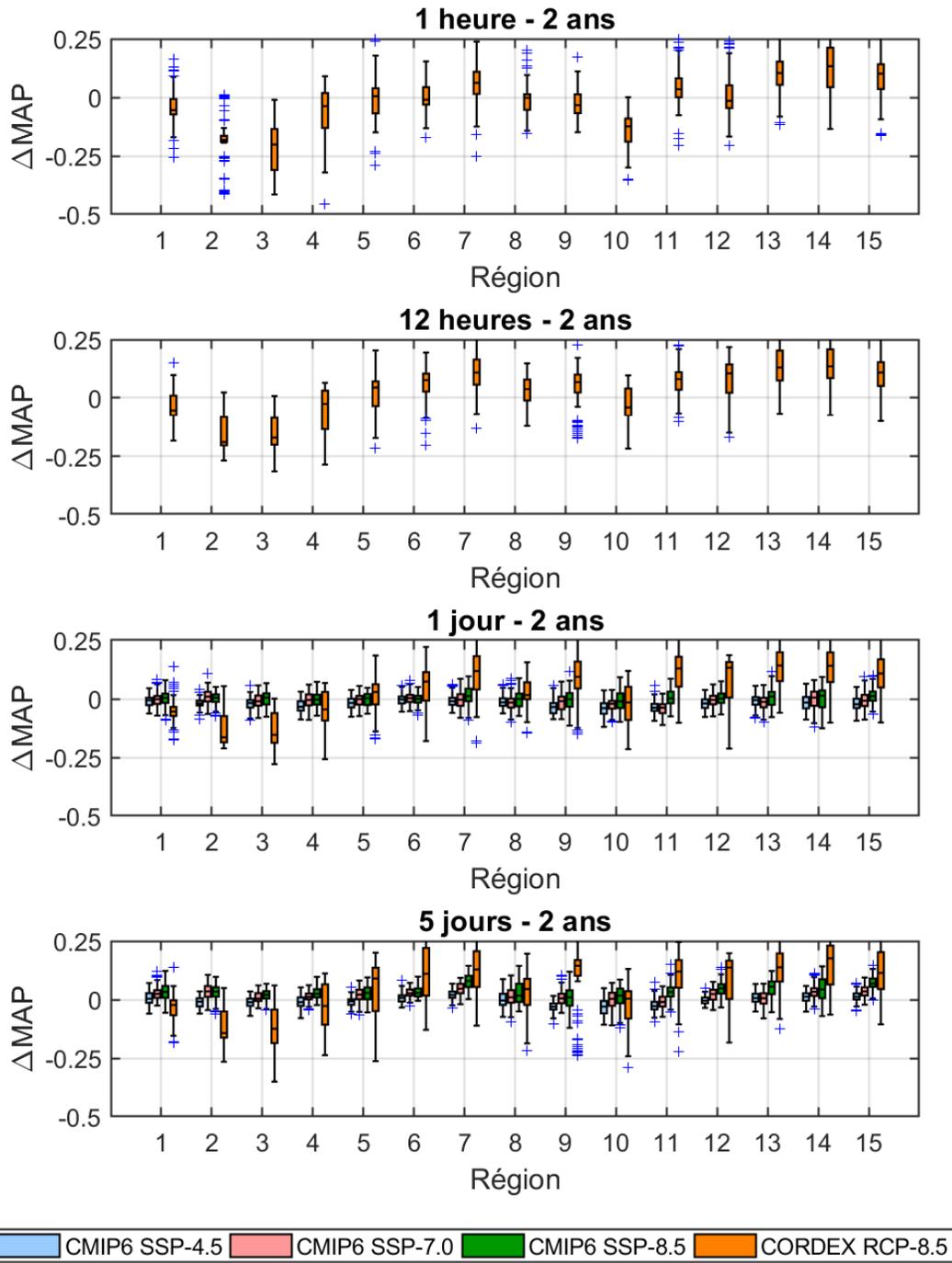


Figure 6.3. Distributions des écarts $\Delta\text{MAP}_j(d, T, H, S)$ aux points de la grille commune de chaque région (Figure 6.1) entre les variations des MAP entre les périodes 2070-2099 et de référence 1980-2019 de durées 1 heure (1^e ligne), 12 heures (2^e ligne), 1 jour (3^e ligne) et 5 jours (4^e ligne) et de période de retour 2 ans calculés à partir de la relation T-P (équation 6.1) et les MAP estimés à partir des ensembles CMIP6 (durées 1 à 5 jours) et CORDEX (durées 1 heure à 5 jours) selon le SSP-8.5 ou le RCP-8.5 selon le cas.

7. Exemple d'application

L'application de l'approche présentée au Chapitre 6 exige de préciser les éléments suivants pour estimer les majorations à appliquer aux intensités de pluie à partir de l'équation 6.1 :

- **Région** : Il s'agit de la région R dans laquelle se trouve l'ouvrage (voir Figure 6.1).
- **Période de référence (H1)** : La période de référence devrait correspondre à la période couverte par les courbes IDF disponibles au site de l'ouvrage. Le choix de la période de référence a toutefois un impact limité puisque les variations globales de température demeurent faibles jusqu'au début des années 2000. À défaut de périodes précises, il est suggéré de prendre la période 1980-2009.
- **Horizon futur (H)** : Il est suggéré que l'année médiane de cette période corresponde à la fin de la vie utile de l'ouvrage. Ainsi si l'année de fin de la vie utile de l'ouvrage est 2050, il est recommandé de considérer la période 2035-2064 ; la durée de la période future doit être de 30 ans. Si la fin de la durée de vie utile est au-delà de 2099 il est recommandé de prendre la période 2070-2099 tout en étant conscient des importantes incertitudes.
- **Scénario de forçage radiatif (S)** : L'utilisateur doit choisir l'un des trois scénarios SSP-4.5, SSP-7.0 et SSP-8.5. Il est à noter ce choix a peu d'impact sauf pour les périodes futures après 2050. Le scénario SSP-7.0 est recommandé puisque le scénario SSP-4.5 est jugé trop optimiste alors que le scénario SSP-8.5 est de plus en plus considéré comme irréaliste.
- **Durée (d) et la période de retour (T)** : Ces paramètres sont déterminés par le type d'ouvrage et le niveau de risque jugé acceptable.

Une fois ces éléments précisés, l'utilisateur pourra estimer :

- **Intensité de la pluie en climat passé** : Cette valeur, $MAP_j(H1; d, T)$, est déterminée à partir des courbes IDF disponibles et dépend des durées d et périodes de retour T retenues.
- **Variation de température moyenne annuelle** : Cette valeur, $\Delta T_j(H, H1, S)$, est fonction du scénario radiatif et de périodes future, H, et de référence, H1, considérées. Les variations de températures moyennes annuelles simulées par l'ensemble CMIP6 sur la grille commune doivent être utilisées.
- **Coefficient $\alpha_j(d)$ de la relation T-P** : Le coefficient $\alpha_j(d)$ de l'équation 6.1 est calculé à partir de l'équation 6.2 et des Tableaux 6.1 et 6.2. Ce facteur est le même quel que soit la période de retour considérée (voir Section 5.7 à ce sujet).
- **Intensité de pluie en climat futur** : Une fois le coefficient $\alpha_j(d)$ calculé, l'intensité de pluie de durée d et de période de retour T pour la période future H selon le SSP S, $MAP_j(H, S, d, T)$ est donnée par l'équation 6.1.

A titre d'exemple concret, considérons un ouvrage situé dans la région de Montréal dont la durée de vie utile est estimée à 50 ans. Les courbes IDF disponibles à la station météorologique située la plus près de ce site couvrent la période de 1980-2009. On a donc :

- **Région (R)** : Région du sud du Québec (région 6 selon la carte de la Figure 6.1).
- **Période de référence (P)** : Les courbes IDF disponibles couvrent la période 1961-2021 qui sera donc utilisée comme période de référence.
- **Période future (F)** : L'année de conception est 2025 et la durée de vie utile est estimée à 50 ans ce qui signifie que l'année marquant la fin de la vie utile de l'ouvrage est 2075. La période future de 30 ans à considérer devra avoir l'année 2075 comme année médiane. La période future à considérer est donc 2060-2089.

- **Scénario de forçage radiatif (SSP)** : Dans le cas présent, le choix du forçage radiatif à retenir est important puisque la période future est lointaine et que l'évolution des températures sera différente selon le SSP choisi. On utilise le SSP-7.0 jugé plus réaliste que les deux autres SSP.
- **Durée (d) et la période de retour (T)** : Pour cet ouvrage, la durée à considérer est 1 heure et la période de retour 50 ans.
- **Intensité de la pluie en climat passé** : Selon les courbes IDF disponibles à l'aéroport Trudeau, l'intensité de la pluie de durée 1 heure et de période de retour 50 ans est de 44.9 mm. On a donc : $MAP(1 \text{ h}, 50 \text{ ans}) = 44.9 \text{ mm}$.
- **Variation de température moyenne annuelle entre périodes future et de référence** : Cette valeur est estimée en faisant la moyenne des variations de température moyenne annuelle entre périodes future et de référence simulées par l'ensemble CMIP6 au point de la grille commune. La valeur obtenue est de 4.3°C. On a donc : $\Delta T_j(2060 - 2089, 1980 - 2009, \text{SSP} - 7.0) = 4.3^\circ\text{C}$.
- **Coefficient de la relation T-P** : Le Tableau 6.1 indique que $\alpha(R, 1 \text{ j}) = 3.4\%/^\circ\text{C}$ pour la région 6 alors que le Tableau 6.2 indique que la valeur de $\beta(d)$ est de 1.43 pour la durée 1 heure. On a donc en appliquant l'équation 2, $\alpha(R, d) = 4.9\%/^\circ\text{C}$.
- **Intensité de pluie en climat futur** : Utilisant les valeurs précédentes, après application de l'équation 6.1, on trouve $MAP_j(1 \text{ heure}, 50 \text{ ans}; 2060 - 2089, \text{SSP} - 7.0) = 55.0 \text{ mm}$ ce qui correspond à une hausse de 22.5% par rapport à la période 1961-2021. Une intensité de 55.0 mm en une heure correspond à une pluie de période de retour de plus de 100 ans en climat passé.

L'exemple d'application décrivant la démarche d'adaptation pour les inondations pluviales décrit à la fiche technique B.6 utilise cette même procédure. la démarche d'adaptation décrit dans

8. Conclusion

L'adaptation aux changements climatiques exige de quantifier les risques associés à divers aléas tels les précipitations extrêmes, les vents violents ou les vagues de chaleur. L'estimation de ces risques demande toutefois une expertise en science du climat et un accès à des données qui ne sont pas à la portée de la grande majorité des organisations, notamment les municipalités.

Le projet *Outils facilitant les analyses des risques aux infrastructures posés par le climat* a pour objectif le développement d'outils afin d'estimer les probabilités d'occurrence de divers aléas susceptibles d'être impactés par les changements climatiques. Ces probabilités sont essentielles pour analyser les risques climatiques que posent ces aléas sur diverses infrastructures et pour la mise en place d'une démarche d'adaptation. Les outils développés se présentent sous la forme de plateformes offrant des services de calcul en ligne, des fiches techniques, des méthodologies et des exemples d'application basées sur les recherches et les connaissances les plus récentes sur le climat et les changements climatiques.

Les analyses et résultats présentés dans ce rapport concernent les trois volets suivants du projet dont la réalisation était sous la responsabilité de l'équipe du professeur Alain Mailhot :

- iv. La rédaction de fiches techniques expliquant divers concepts de base en lien avec les analyses statistiques des extrêmes, la démarche d'adaptation et divers sujets en lien avec l'hydrologie et les changements climatiques.
- v. Le développement d'une procédure permettant d'estimer les intensités des maxima annuels de pluies (MAP) de diverses durées et divers horizons futurs.
- vi. La production d'un exemple d'utilisation de l'outil dans le contexte d'une démarche d'adaptation de la gestion des eaux pluviales d'une municipalité.

Le choix des intensités des MAP, généralement représentées sous la forme de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF), comme indicateurs des pluies extrêmes résulte d'une consultation auprès des membres du comité. Il est clairement apparu que ce type d'indicateur est le plus pertinent pour les praticiens.

Les fiches techniques sont regroupées en trois modules :

- d. Module A : Concepts statistiques sur les extrêmes;
- e. Module B : Démarche d'adaptation aux changements climatiques
- f. Module C Hydrologies fluviale et urbaine et changements climatiques

Les fiches techniques ont été rédigées en utilisant un nombre réduit de documents de référence. En effet, il existe à l'heure actuelle de très nombreuses références sur ces sujets, notamment ceux relatifs à l'adaptation aux changements climatiques, et une démultiplication des références auraient été contreproductives d'autant plus que la terminologie et les démarches d'adaptation proposées peuvent varier d'un document à l'autre. Ainsi les fiches du module B s'inspirent très largement des approches et de la terminologie adoptée dans le document publié en 2024 par Ouranos et la Direction de l'adaptation aux changements climatiques (DACC) du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) intitulé *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques – Guide pour les organismes municipaux*. De légères modifications ont été apportées afin de préciser certains termes et concepts.

Dix-huit fiches techniques regroupées en trois modules ont été produites dans le cadre du projet. Les fiches techniques de chacun des modules sont les suivantes :

Module A – Concepts statistiques sur les extrêmes

- A.1 Série, saisonnalité, moyenne et dispersion
- A.2 Qu'est-ce qu'un extrême ?
- A.3 Extrêmes, non-stationnarité et changements climatiques
- A.4 Détection de tendance dans les séries d'extrêmes
- A.5 Représentation probabiliste des extrêmes
- A.6 Analyse de tendance
- A.7 Distribution statistique des valeurs extrêmes et loi de Gumbel
- A.8 Approche peak-over-threshold (POT)

Module B – Démarche d'adaptation aux changements climatiques

- B.1 Démarche d'adaptation aux changements climatiques
- B.2 Objectifs, portée et cadre de la démarche d'adaptation
- B.3 Appréciation des risques climatiques
- B.4 Traitement des risques climatiques
- B.5 Concept et matrice de risque
- B.6 Exemple de démarche d'adaptation pour les inondations pluviales
- B.7 Glossaire

Module C Hydrologies fluviale et urbaine et changements climatiques

- C.1 Crues, inondations et changements climatiques : portrait global
- C.2 Atlas hydroclimatique du Québec
- C.3 Gestion des eaux pluviales et changements climatiques

L'ensemble de ces fiches est regroupé à l'Annexe A. Le choix des sujets a été réalisé en étroite collaboration avec les membres du comité consultatif afin de nous assurer que les sujets traités étaient pertinents. Le contenu des fiches a également été révisé par les membres du comité consultatif. Plusieurs fiches se sont ajoutées à la liste préliminaire suivant les recommandations du comité consultatif. Ces fiches seront intégrées à la plateforme.

La méthode proposée pour estimer les intensités des MAP en climat futur repose sur l'utilisation de la relation entre température et précipitation, désignée par relation T-P. L'hypothèse sous-jacente est que la capacité de l'atmosphère à stocker de l'humidité, aussi appelée scaling thermodynamique et décrite par la relation de Clausius-Clapeyron (C-C), est le principal facteur conditionnant l'évolution future des précipitations extrêmes. Le taux d'augmentation 'théorique' de la capacité de stockage d'humidité par l'atmosphère, désigné par le taux de C-C, est de l'ordre de $+7\%/^{\circ}\text{C}$. Plusieurs facteurs ont cependant un impact sur ce taux et donc sur l'évolution future des précipitations extrêmes dont la disponibilité en humidité et les trajectoires des systèmes stratiformes et convectifs.

Deux ensembles de simulations climatiques ont été utilisés pour le développement de cette procédure à savoir les simulations de l'ensemble *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6 ; Eyring *et al.* 2016) et de l'ensemble *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX ; Mears *et al.* 2017).

Le premier regroupe 53 modèles globaux dont la résolution spatiale varie de 50 km à 300 km. On dispose pour chacun de ces modèles d'une simulation couvrant la période historique (1950-2014) et d'une ou plusieurs simulations couvrant la période future (2015-2099). Trois scénarios de forçage anthropique sont considérés pour la période future (SSP-4.5, SSP-7.0, SSP-8.5 ; Meinshausen *et al.* 2020) alors que les concentrations de gaz à effet de serre observées sont appliquées à la période

historique. Le nombre de simulations varie selon le modèle, la période future et les SSP considérés. Les séries de l'ensemble CMIP6 sont journalières et ont été utilisées pour évaluer l'évolution future des MAP de durées 1 à 5 jours. Seuls les modèles avec une simulation en climat historique et une simulation en climat futur, et ce quel que soit le SSP, ont été retenus. Le premier membre de chaque combinaison modèle/SSP a été considéré pour un total de 139 simulations (39 simulations en période historique, 34 pour le SSP-4.5, 30 pour le SSP-7.0 et 36 pour le SSP-8.5).

L'ensemble CORDEX regroupe différentes combinaisons de modèles globaux et régionaux. Les simulations CORDEX sur le domaine Amérique du Nord ont été sélectionnées. Les séries de précipitations simulées par ces modèles sont archivées au pas de temps horaires ou aux 3 heures et peuvent donc être utilisées pour l'analyse des MAP sous-journaliers en plus des durées 1 à 5 jours. Les modèles retenus, de résolution entre 19 km et 49 km, doivent avoir au moins une simulation en climat historique (1950-2005) et une simulation en climat futur (2006-2099) pour un total de sept simulations. Un seul scénario de forçage anthropique est disponible pour la période future à savoir le RCP-8.5 (Meinshausen *et al.* 2011), considéré équivalent au SSP-8.5.

La période historique de référence est la période 1980-2009. Quatre autres périodes de 30 ans ont été considérées : 1950-1979, 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099. Les grilles des modèles globaux ou régionaux étant différentes, une grille commune de résolution 1°x 1° (≈ 110 km x 85 km) couvrant le Canada a été définie. Les séries des simulations CMIP6 et CORDEX ont été projetées sur cette grille commune en recherchant le point de grille de chaque modèle dont le centroïde est le plus près du centroïde de chaque point de la grille commune. Les valeurs de la grille commune correspondent aux médianes des valeurs des points de grille des modèles correspondant à ce point de la grille commune.

Les analyses des séries de précipitations simulées par les deux ensembles ont d'abord été réalisées en comparant les résultats sur les points de grille de chacun des modèles et en examinant ensuite les résultats sur la grille commune. Les quantiles empiriques des MAP de durées 1 heure à 5 jours et de périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans ont été estimés et les écarts relatifs (MAP futur - MAP référence)/(MAP référence) entre périodes futures et de référence ont été calculés. Ces analyses préliminaires des simulations CMIP6 et CORDEX ont permis de montrer que :

- Une majorité de modèle projettent des hausses des MAP sur une immense majorité des points de grille ;
- Les augmentations à l'horizon 2070-2099 sont supérieures aux augmentations à l'horizon 2040-2069 ;
- Les variations projetées des MAP varient selon les modèles ;
- Les hausses des MAP augmentent pour les durées plus courtes.

L'équation utilisée pour représenter la relation T-P est la suivante :

$$MAP_j(H, S; d, T) = MAP_j(H1; d, T) [1 + \alpha_j(d)]^{\Delta T_j(H, H1, S)} \quad (8.1)$$

où $MAP_j(H, S; d, T)$ est l'intensité du maxima annuel de précipitations (MAP) de durée d et période de retour T pour la période future H selon le scénario de forçage S au point de grille j , $MAP_j(H1; d, T)$ est l'intensité du MAP correspondant en période de référence $H1$, $\alpha_j(d)$ est le coefficient de scaling (CS) pluie-température (T-P) pour la durée d au point de grille j et $\Delta T_j(H, H1, S)$ la variation de température moyenne annuelle (TMA) entre les périodes H et $H1$ au point de grille j selon le scénario S .

Les TMA ont été utilisées pour estimer les variations de températures ΔT de la relation T-P. D'autres options sont cependant possibles comme les variations de température moyenne saisonnière ou encore les variations de température pendant la période où les MAP sont majoritairement observés. Des analyses complémentaires montrent toutefois que l'utilisation de ces autres indicateurs de température n'apporte pas d'amélioration appréciable.

Les coefficients α doivent donc être précisés. *A priori*, on peut présumer que ces valeurs dépendent du point de grille j , de la durée d et de la période de retour T du MAP. Rappelons que ce coefficient est de $7\%/^{\circ}\text{C}$ selon la relation de Clausius-Clapeyron. Cependant plusieurs facteurs peuvent conduire à des valeurs sensiblement différentes du taux de Clausius-Clapeyron. Les α_j ont été estimés à partir des séries des MAP et des TMA aux points de grille de chacun des modèles CMIP6 et CORDEX en utilisant l'équation 8.1. Ces valeurs ont ensuite été utilisées pour estimer les α_j aux points de la grille commune. À la lumière de ces résultats, on constate que :

- Les coefficients α médians des modèles se situent entre 3.1 et 3.7% selon la combinaison période future/SSP considérée;
- Les coefficients α diminuent très légèrement lorsque l'on considère les périodes plus lointaines pour un SSP donné, cet effet étant plus marqué pour le SSP-8.5;
- Les coefficients α ont tendance à légèrement diminuer pour un horizon donné lorsque le forçage radiatif augmente (SSP4.5 \rightarrow SSP-7.0 \rightarrow SSP-8.5);
- Les patrons spatiaux montrent des coefficients α plus élevés sur les côtes est et ouest (CS supérieures à $4\%/^{\circ}\text{C}$) alors que les valeurs dans la partie centrale sont globalement plus faibles (moins de $4\%/^{\circ}\text{C}$). Ces patrons émergent progressivement pour les horizons futurs plus lointains et les forçages radiatifs plus importants;
- Les patrons spatiaux des CS de l'ensemble CORDEX sont nettement plus bruités pour les horizons 2010-2039 et 2040-2069 que les patrons correspondants de l'ensemble CMIP6.

Une analyse de la dépendance des coefficients α en fonction de la durée et de la période de retour des MAP montre que :

- Les coefficients α diminuent avec la durée et augmentent avec la période de retour et ce tant pour l'ensemble CMIP6 que pour l'ensemble CORDEX;
- La dépendance en fonction de la période de retour est de plus en plus marquée pour les MAP de courte durée;
- Les coefficients α de l'ensemble CORDEX sont supérieurs à ceux de l'ensemble CMIP6 pour les durées communes 1 jour à 5 jours;
- Les coefficients α , toutes durées et périodes de retour confondues, sont inférieurs à $7\%/^{\circ}\text{C}$ à une vaste majorité de points de grille et ce même pour la durée 1 heure.

La procédure visant à estimer les MAP en climat futur repose sur l'utilisation de la relation T-P (équation 8.1) et se base sur les hypothèses suivantes:

- d) Des α uniques sont attribués à 15 régions du Canada valables pour tous les SSP et les horizons futurs;
- e) Ces α sont uniquement fonctions de la durée (CS plus élevés pour les durées plus courtes) et sont les mêmes pour toutes les périodes de retour;

f) Les variations des TMA estimées à partir de l'ensemble CMIP6 sont utilisées.

Une comparaison des MAP estimés à partir de la procédure proposée et des MAP estimés à partir des séries de précipitations simulées par l'ensemble CMIP6 et l'ensemble CORDEX révèle l'existence de faibles biais qui sont toutefois très inférieurs aux hausses projetées des MAP et à la variabilité inter-modèle. Les écarts à l'échelle régionale entre les valeurs de la relation T-P et l'ensemble CMIP6 pour les durées 1 jour et 5 jours demeurent relativement petits et ce quelle que soit la région. Les écarts avec les MAP estimés à partir de l'ensemble CORDEX sont parfois importants et très variables d'une région à l'autre tant pour les durées 1 heure et 12 heures que les durées 1 jour et 5 jours.

Un exemple d'application a finalement été élaboré sur la base de la procédure proposée pour la conception d'une infrastructure de durée de vie utile de 50 ans située dans la région de Montréal. Une durée de 1 heure et une période de retour de 50 ans ont été considérées. Le SSP-7.0 a été retenu. Les résultats montrent que l'intensité des MAP de durée 1 heure et de période de retour 50 ans passeront de 44.9 mm, selon les courbes IDF disponibles à l'aéroport Trudeau, à 55.0 mm à l'horizon 2060-2089 soit une augmentation de 22.5%. Une telle intensité correspond à une pluie de période de retour de plus de 100 ans selon les courbes IDF actuelles. L'ampleur de cette augmentation montre toute l'importance d'intégrer les changements climatiques dans la conception des ouvrages avec de longues durées de vie utiles.

Cette procédure a également été utilisée pour l'exemple de démarche d'adaptation d'une municipalité pour l'aléa inondations pluviales décrit dans la fiche technique B.6. Cet exemple reprend les étapes d'adaptation décrites dans les fiches B.2 à B.4, estime les risques climatiques et identifie des mesures d'adaptation possibles selon les secteurs analysés. La municipalité considérée est fictive mais représentative des problématiques fréquemment rencontrées du Québec. À ce titre, cet exemple sans être directement transposable, pourra très certainement être utile à plusieurs intervenants en charge d'élaborer un plan d'adaptation de leur municipalité.

Références

CSA (2019). Élaboration, interprétation et utilisation de l'information relative à l'intensité, à la durée et à la fréquence (IDF) des chutes de pluie : guide à l'intention des spécialistes canadiens en matière de ressources en eau, Guide Technique, Canadian Standard Association.

Eyring, V., Bony S., Meehl G.A., Senior, C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9(5), 1937-1958. doi: 10.5194/gmd-9-1937-2016.

E. Hawkins, E. Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 90(8), 1095-1107. doi: 10.1175/2009bams2607.1

MacQueen, J.B. (1967). Some methods for classification and analysis of multivariate observations, *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*", Berkeley, University of California Press, 1:281-297.

Martinkova, M., Kysely, J. (2020). Overview of observed Clausius-Clapeyron scaling of extreme precipitation in midlatitudes. *Atmosphere*, 11(8), doi: 10.3390/atmos11080786.

Mearns, L.O., *et al.* (2017). The NA-CORDEX dataset, version 1.0. NCAR Climate Data Gateway, Boulder CO, accès le 2024-11-18, <https://doi.org/10.5065/D6SJ1JCH>.

Meinshausen, M., Nicholls, Z.R.J., Lewis, J., Gidden, M.J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canade, J.G., Daniel, J.S., John, A., Krummel, P.B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S.A., Rayner, P.J., Reimann, S., Smith, S.J., van den Berg, M., Velders, G.J.M., Vollmer, M.K., Wang, R.H.J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.*, 13, 3571–3605, doi: 10.5194/gmd-13-3571-2020.

Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J.F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M., van Vuuren D.P.P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1-2), 213-241. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z.

ANNEXE A – Fiches techniques

Les fiches techniques produites dans le cadre du présent projet sont présentées au Tableau A.1 et ont été ajoutées à la suite.

Tableau A.1 - Liste des fiches techniques produites.

Module	Fiche	Titre
A	A.1	Série, saisonnalité, moyenne et dispersion
	A.2	Qu'est-ce qu'un extrême ?
	A.3	Extrêmes, non-stationnarité et changements climatiques
	A.4	Détection de tendance dans les séries d'extrêmes
	A.5	Représentation probabiliste des extrêmes
	A.6	Analyse de tendance
	A.7	Distribution statistique des valeurs extrêmes et loi de Gumbel
	A.8	Approche peak-over-threshold (POT)
B	B.1	Démarche d'adaptation aux changements climatiques
	B.2	Objectifs, portée et cadre de la démarche d'adaptation
	B.3	Appréciation des risques climatiques
	B.4	Traitement des risques climatiques
	B.5	Concept et matrice de risque
	B.6	Exemple de démarche d'adaptation pour les inondations pluviales
	B.7	Glossaire
C	C.1	Crues, inondations et changements climatiques : portrait global
	C.2	Atlas hydroclimatique du Québec
	C.3	Gestion des eaux pluviales et changements climatiques

Module A – Concepts statistiques sur les extrêmes

Fiche technique A.1 Série, saisonnalité, moyenne et dispersion

Les valeurs observées ou simulées par un modèle, que ce soient des débits, des températures ou des hauteurs de pluie, sont généralement représentées sous forme de série temporelle. La Figure A.1 montre à titre d'exemple les séries de températures maximales journalières enregistrées en 2019 à la station météorologique Les Cèdres¹ située dans la région de Montréal. Les températures, comme plusieurs autres variables météorologiques, présentent une variabilité importante et sont souvent fonctions des saisons, telle que le montre la Figure A.1.

Ces températures peuvent être comparées aux températures historiques en utilisant divers indicateurs statistiques. Le premier de ces indicateurs est la moyenne, qui définit une valeur attendue autour de laquelle la série fluctue. Ainsi, à la Figure A.1, la température maximale journalière moyenne est estimée en faisant la moyenne des valeurs journalières des 108 années d'opération de la station (1913-2019). Elle est représentée par le trait bleu de la Figure A.1.

Le deuxième indicateur mesure la *dispersion* des valeurs autour de la moyenne. Il existe plusieurs façons de quantifier celle-ci, la plus connue étant l'écart-type, représenté par les deux traits en pointillés à la Figure A.1. Ainsi, 71% des températures maximales journalières observées en 2019 se trouvent à moins d'un écart-type de la moyenne (c.-à-d. entre les deux traits en pointillés de la Figure A.1). On voit également que les températures maximales journalières de certains jours sont parfois largement supérieures ou inférieures à la moyenne. C'est le cas de plusieurs jours au début du mois de juillet, où les températures sont supérieures à 30°C, et au mois de janvier, où les températures maximales quotidiennes sont près de -20°C. Ces valeurs s'écartent de plus d'un écart-type des moyennes.

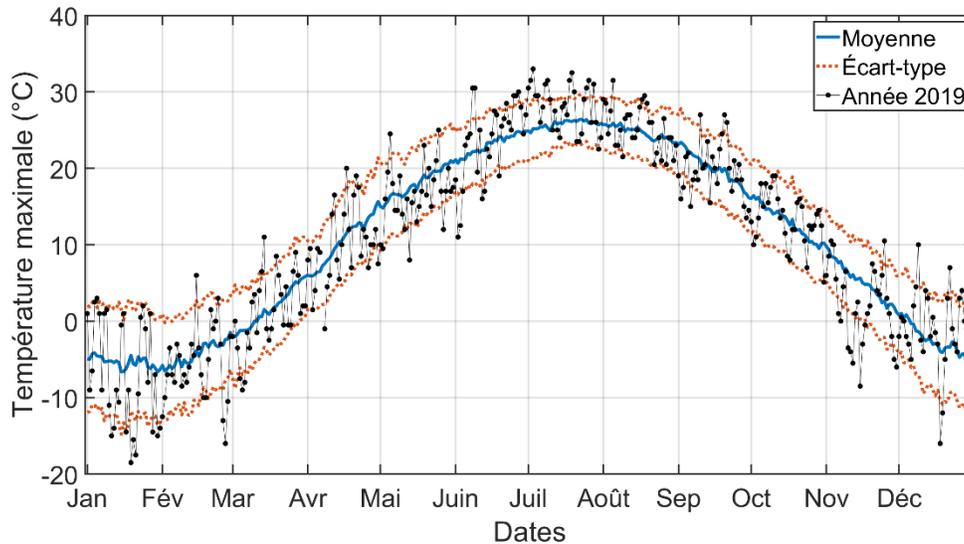


Figure A.1 Série des températures maximales journalières de 2019 à la station météorologique Les Cèdres¹ située dans la région de Montréal. La moyenne quotidienne sur la période 1913-2019 est représentée par le trait bleu et les intervalles d'un écart-type par les pointillés rouges.

1. La station Les Cèdres (7014290) est opérée par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP).

Fiche technique A.2 Qu'est-ce qu'un extrême ?

Un extrême réfère à une valeur qui s'éloigne très largement, par exemple de plusieurs écarts-types, des valeurs moyennes observées. Il n'existe pas de définition précise et universelle d'un extrême, mais ce terme désigne généralement des événements ou des conditions rares et d'amplitude exceptionnelle. Afin de bien comprendre les risques que posent ce type d'événements à nos sociétés, il est nécessaire de pouvoir estimer leur fréquence et leur intensité.

Les extrêmes sont généralement estimés de deux façons. La première consiste à identifier les valeurs au-dessus d'un certain seuil. Reprenant l'exemple de la Figure A.1, on pourrait par exemple choisir de ne retenir que les valeurs au-dessus de 31°C, seuil au-delà duquel les impacts sur la santé des populations sont jugés significatifs⁴. Une analyse statistique du type *Peak-over-Threshold* (ou POT) peut être appliquée dans ce cas¹.

La deuxième approche, qui est la plus largement utilisée, consiste à identifier les valeurs maximales enregistrées durant des sous-périodes, souvent une année. On parle alors d'approche par *block maxima*. La Figure A.2 présente la série des précipitations maximales quotidiennes enregistrées à chaque année à la station Chelsea² dans l'Outaouais. On peut constater la grande variabilité interannuelle des valeurs et que certaines années se distinguent par des précipitations maximales journalières exceptionnelles, tel qu'en 2011 où plus de 140 mm de pluie avaient été enregistrés le 23 juin. Cette pluie hors-norme surpassait les valeurs enregistrées depuis 1930 par plus de 40 mm ! Cet événement avait d'ailleurs causé plusieurs glissements de terrain dans la région de Chelsea³.

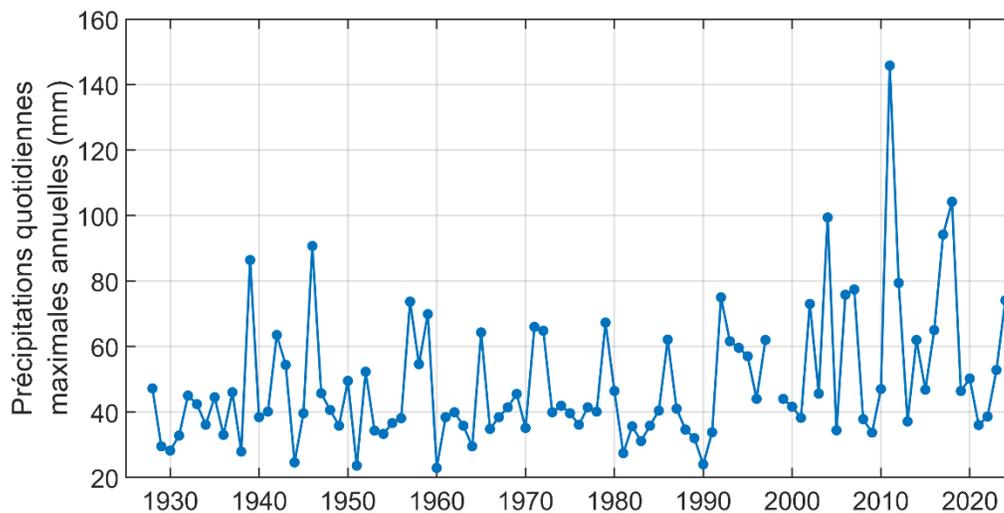


Figure A.2 Série des maxima annuels des précipitations maximales quotidiennes à la station météorologique Chelsea dans la région de l'Outaouais. Chaque point correspond à la valeur maximale de précipitation quotidienne enregistrée à cette station chaque année. À noter que les années avec plus de 20% de données quotidiennes manquantes ne sont pas retenues.

1. Voir la fiche A.7 qui traite de la méthode POT. Pour plus de détails, voir CSA (2019). Élaboration, interprétation et utilisation de l'information relative à l'intensité, à la durée et à la fréquence (IDF) des chutes de pluie : guide à l'intention des spécialistes canadiens en matière de ressources en eau, Guide Technique, *Canadian Standard Association*, 2019.
2. La station Chelsea (7031360) est opérée par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP).
3. Voir <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/521729/glisement-terrain-outaouais>

4. [Surveillance des impacts des vagues de chaleur extrême sur la santé au Québec à l'été 2018 | Institut national de santé publique du Québec](#)

Fiche technique A.3 Extrêmes, non-stationnarité et changements climatiques

L'un des impacts majeurs des changements climatiques est une modification de l'amplitude et de la fréquence de conditions météorologiques extrêmes, dont une intensification des précipitations extrêmes.

Reprenons l'exemple de la Figure A.2 afin d'illustrer comment se manifestent les changements climatiques. On constate qu'au-delà de la grande variabilité interannuelle, les précipitations maximales annuelles semblent augmenter avec le temps. Ainsi, la moyenne sur les 30 premières années (1928–1957) est de 44 mm, alors que la moyenne pour les 30 dernières années (1995–2024) est de 61 mm (Figure A.3). L'application d'un test statistique (test de Mann-Kendall au seuil de significativité de 95%; voir fiche A.6) confirme l'hypothèse d'une tendance à la hausse à cette station (p -value < 0.01). On parle alors de tendance *statistiquement significative*. Le taux de variation des précipitations extrêmes estimé pour la station de Chelsea est de 3.5 %/décennie¹. Une telle série est dite non-stationnaire.

La tendance présentée à la Figure A.3 est représentative des tendances parfois observées et généralement simulées par les modèles climatiques (hausse ou baisse progressive de la moyenne). Elle implique que la probabilité d'observer une valeur extrême supérieure à certains seuils augmente avec le temps. Considérons de nouveau la série de la Figure A.3 et plaçons-nous en 2000. On peut estimer la précipitation maximale annuelle de période de retour² 20 ans à partir de la série disponible à ce moment (1928–2000), ce qui donne 71 mm.³ Pour les fins de l'exemple, supposons que cette valeur est utilisée pour la conception d'un ouvrage de capacité suffisante pour évacuer les eaux de ruissellement d'une pluie de 71 mm. Des dépassements de capacité, et donc d'éventuels bris de services, seraient susceptible de survenir en moyenne à tous les 20 ans, un seuil jugé raisonnable selon la tolérance au risque des concepteurs. Or, si on se reporte aux valeurs de la période 2001–2024, on constate que sa capacité aurait été dépassée neuf années⁴ pendant cette période, alors que quatre années avec des dépassements sont observées pendant la période 1928–2000. Le risque encouru pendant la période 2001–2024 va bien au-delà de celui initialement établi sur la base de la série 'historique'. Cet exemple montre l'importance d'intégrer les changements climatiques dans la conception d'ouvrages.

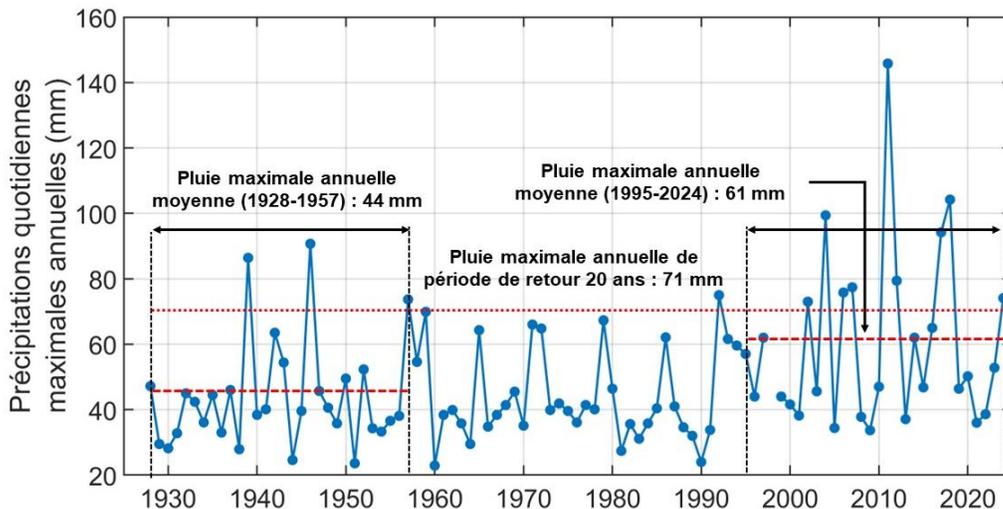


Figure A.3 Série des maxima annuels de précipitations quotidiennes à la station météorologique Chelsea. Les tirets horizontaux correspondent aux moyennes sur les périodes 1928-1957 et 1995-

2024 et la ligne en pointillée à la pluie de période de retour 20 ans calculée à partir des valeurs antérieures à 2000.

1. Le taux de variation des précipitations maximales annuelles a été estimé à l'aide de la pente de Sen aussi appelée pente de Theil-Sen ; voir https://en.wikipedia.org/wiki/Theil%E2%80%93Sen_estimator
2. La période de retour correspond au nombre moyen d'années séparant deux années d'occurrence consécutives de ces pluies. La probabilité annuelle de dépassement p correspondant à une période de retour T est $p = 1/T$.
3. Cette valeur a été obtenue après ajustement d'une loi de Gumbel à la série de 1928 à 2000 (voir la Fiche A.7).
4. On présume que la capacité est dépassée une fois par année mais il n'est pas exclu qu'elle puisse être dépassée plus d'une fois certaine année.

Fiche technique A.4 Détection de tendance dans les séries d'extrêmes

Les changements climatiques se manifestent par une modification des caractéristiques statistiques d'une série, généralement une augmentation ou une diminution progressive de la moyenne et/ou de la dispersion (voir la Fiche A.3). Or, les valeurs extrêmes sont, par définition, associées à des événements rares, d'autant plus rares qu'ils sont extrêmes. Détecter une tendance, c'est-à-dire une hausse ou une baisse de la fréquence ou de l'amplitude de tels événements, est donc difficile (voir la Fiche A.6 sur les tests de tendance). Il demeure toutefois essentiel d'estimer les tendances à long terme des valeurs extrêmes, compte tenu des impacts de ce type d'événements.

Deux facteurs font en sorte que l'identification de tendances de séries extrêmes, telles les pluies extrêmes, est difficile. Le premier est la grande variabilité de ce type de série. Les précipitations maximales annuelles à la station Chelsea présentées à la fiche A.2 en sont un bel exemple. Le deuxième facteur est que l'on doit disposer de longues séries afin de pouvoir discerner le signal associé aux changements climatiques de la variabilité naturelle de la série. De fait, les séries disponibles au Québec et au Canada sont relativement courtes et les tendances difficiles à détecter.

Afin d'illustrer ce dernier point, considérons la série des pluies maximales annuelles à la station Oka¹ présentée à la Figure A.4. Si on considère les 30 premières années, aucune tendance n'est détectée, ce que confirme l'application d'un test de tendance (p-value de 0.915 pour le test de Mann-Kendall; voir Fiche A.6). Une tendance se dessine au fur et à mesure que s'ajoutent des données et que des périodes historiques de plus en plus longues sont considérées (Tableau A.4).

L'application du test de Mann-Kendall montre en effet que l'hypothèse d'une absence de tendance peut être rejetée au seuil de significativité de 95% lorsque les séries couvrent les périodes 1953–2012 de 60 ans et 1953–2024 de 72 ans. Ainsi, bien que nous soyons en présence d'une série remarquablement longue, il faut disposer de 60 ans ou plus avant de commencer à discerner une tendance alors qu'aucune tendance significative n'est détectée lorsque la série couvre la période 1953-2002. Ce résultat montre également qu'il faut demeurer très prudent lorsque des tendances sont détectées sur de courtes séries puisqu'elles peuvent avoir été générées de façon aléatoire et ne pas être la signature de tendances réelles.

Plusieurs autres éléments sont à prendre en compte lors d'analyses de tendances et au moment d'interpréter les résultats. Ainsi pour les variables soumises à des effets de saisonnalité ou à des phénomènes cycliques (p. ex. El Niño), il est important de considérer des séries couvrant plusieurs cycles, sinon la tendance détectée sera factice. Des changements d'instruments, de sites, de protocole d'observation, des conditions environnantes (p. ex. croissance d'arbre à proximité d'une station météorologique ou encore, pour les débits, changement dans l'occupation du territoire des parties en amont d'un bassin versant) peuvent également induire des ruptures ou des tendances qui ne sont pas attribuables aux changements climatiques.

Tableau A.4. Application du test de Mann-Kendall à différentes périodes de la série des précipitations maximales annuelles à la station Oka (voir Figure A.4)

Période	p-value du test de Mann-Kendall	Tendance significative (seuil 5%)	Taux de variation (%/décennie) ^{2,3}
1953-1982	0.915	Non	-
1953-1992	0.449	Non	-
1953-2002	0.222	Non	-
1953-2012	0.034	Hausse	4.6
1953-2024	0.020	Hausse	3.7

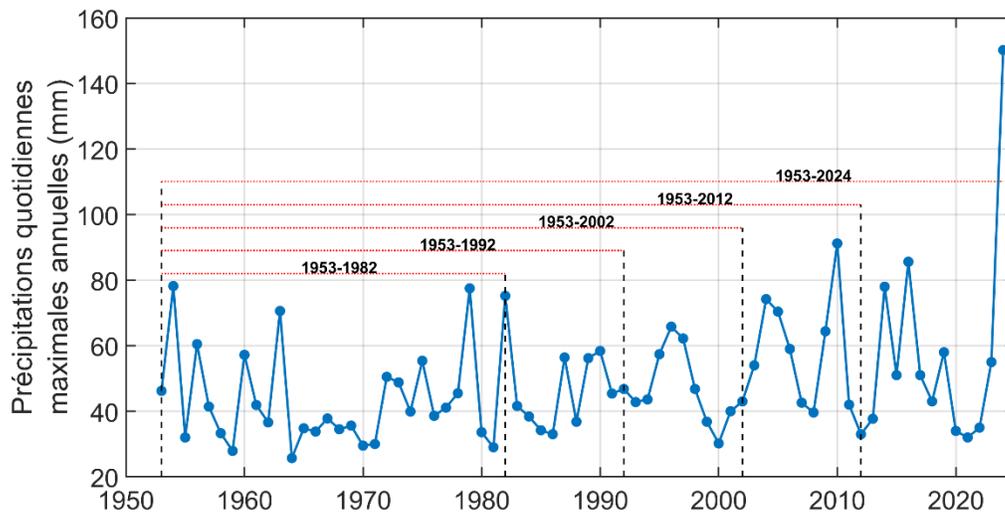


Figure A.4 Séries des maxima annuels de précipitations quotidiennes à la station météorologique Oka. Chaque point correspond à la valeur maximale de précipitation quotidienne enregistrée à cette station chaque année. À noter que les années avec plus de 20 % de données quotidiennes manquantes ne sont pas retenues. Les résultats des analyses de tendance (Mann-Kendall) pour les différentes périodes sont présentés au Tableau B.4.

1. La station Oka (7015730) est opérée par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP).
2. Le taux de variation des précipitations maximales annuelles a été estimé à l'aide de la pente de Sen aussi appelée pente de Theil-Sen ; voir https://en.wikipedia.org/wiki/Theil%E2%80%93Sen_estimator
3. Le taux de variation a été calculé que dans les cas où la tendance est statistiquement significative.

Fiche technique A.5 Représentation probabiliste des extrêmes

Les événements extrêmes ne sont pas prévisibles à moyen ou long terme. Une représentation probabiliste est donc nécessaire où la probabilité d'occurrence de ces événements est estimée. Les pluies extrêmes en sont un exemple où les probabilités annuelles d'occurrence de pluies de diverses intensités sont estimées. La présente fiche explique comment ces probabilités sont calculées et énoncent les principales hypothèses sous-jacentes.

Considérons les pluies ayant une probabilité de 5 % de se produire chaque année. La période de retour, qui correspond au nombre moyen d'années séparant deux occurrences consécutives de ces pluies, est de $T = 1/0.05 = 20$ ans. Si on considère les pluies plus rares, par exemple de période de retour 100 ans, elles auront une probabilité de 1 % de survenir chaque année.

La représentation probabiliste ainsi adoptée est tout à fait équivalente à un jeu de hasard. Pour une pluie avec une probabilité d'occurrence de 5 %, ou $1/20$, l'occurrence ou non d'un tel événement une année donnée est équivalente au lancer d'un dé à vingt faces (Figure A.5). Advenant que le dé tombe sur une face donnée, par exemple '20', alors l'événement en question survient, autrement il ne survient pas. Ceci implique que chaque résultat est 'statistiquement indépendant' du résultat précédent, c.-à-d. que la probabilité de tirer un '20' à chaque lancer demeure de $1/20$ peu importe le résultat du lancer précédent¹. Ainsi, il est possible de tirer 5 fois le nombre 20 d'affilée, même si la probabilité d'un tel résultat est très faible (moins de 1 chance sur 3 millions !). Le Tableau A.5 donne les probabilités de tirer 0, 1, 2, 3, 4 ou 5 fois ou plus une face donnée lorsqu'un dé à 20 faces est lancé 20 fois. On peut voir que le nombre de fois le plus probable est 1, avec une probabilité de 37.7 %, mais qu'il est très probable de ne pas tomber sur une face donnée (35.8 %) ou de tirer plus d'une fois cette face (26.5 %). En d'autres mots, même si une pluie de période de retour 20 ans est observée en moyenne à tous les 20 ans, il est très probable de ne pas l'observer pendant une période de 20 ans (35.8 %) ou de l'observer deux fois ou plus pendant cette même période (26.5 %)².

Tableau A.5 Probabilités de tirer 0,1, 2, 3, 4 ou 5 fois et plus une face donnée lorsque qu'un dé à 20 faces est lancé 20 fois.

Nombre de fois où la face est tirée	Probabilité
0	35.8%
1	37.7%
2	18.9%
3	6.0%
4	1.3%
5 ou plus	0.3%



Figure A.5 Dé à 20 faces.

1. L'indépendance statistique dans le cas des pluies extrêmes demeure une hypothèse puisque certains phénomènes périodiques comme El Niño peuvent faire en sorte que les pluies maximales annuelles enregistrées pendant un cycle El Niño sont plus ou moins corrélées selon la région considérée.
2. Le nombre moyen d'occurrence d'un événement de probabilité p après N tirages est pN .

Fiche technique A.6 Analyse de tendance

Les changements climatiques se manifestent par une modification des variables statistiques utilisées pour caractériser le climat, la plus connue étant la moyenne (p. ex. température moyenne ou encore le total de précipitations moyen). On dira alors que la série est 'non stationnaire' si ces variables changent avec le temps (voir Fiche A.3). Les changements climatiques se manifestent le plus souvent par une augmentation progressive de la moyenne, mais d'autres variations sont possibles, par exemple, une augmentation de la variabilité.

Les séries de variables climatiques sont assimilées à des séries aléatoires (voir Fiche A.5). Un nombre infini de séries est possible, possédant toutes les mêmes caractéristiques statistiques (p. ex. même moyenne). Il est donc réaliste de générer fortuitement une série aléatoire avec une tendance. Afin d'évaluer si une tendance dans une série n'est pas simplement le fruit du 'hasard' ou, au contraire, résulte d'une évolution des caractéristiques statistiques, un test de tendance est appliqué. Plusieurs tests de tendance ont été développés par le passé, le plus connu étant le test de Mann-Kendall.

Le test de Mann-Kendall permet de déterminer si la tendance détectée est statistiquement significative. Soit une série de n valeurs $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, le test de Mann-Kendall permet de vérifier l'hypothèse nulle H_0 qu'aucune tendance monotone n'est présente dans la série ; l'hypothèse alternative H_1 est que la série présente une tendance monotone. La statistique S du test est calculée :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

$$\text{sgn}(\phi) = \begin{cases} +1 & \text{si } \phi > 0 \\ 0 & \text{si } \phi = 0 \\ -1 & \text{si } \phi < 0 \end{cases}$$

La statistique S correspond au décompte du nombre de fois où les paires de valeurs de la série sont croissantes, égales ou décroissantes. Ainsi plus la série compte de paires croissantes $x_i < x_j$, plus S est positif et grand, alors que plus la série compte de paires décroissantes $x_i > x_j$, plus S sera négatif. $S = 0$ correspond au cas où il n'y a pas de croissance ou de décroissance nette. Sous les conditions que les valeurs de la série sont indépendantes et identiquement distribuées, que S est normalement distribué, que la moyenne de cette distribution est nulle et qu'il n'y a pas d'égalité ($x_i \neq x_j \forall i, j$), on peut montrer que la variance V est donnée par¹ :

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

La statistique Z_{MK} du test est ensuite calculée :

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{(S-1)}{\sqrt{V(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{(S+1)}{\sqrt{V(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases}$$

Une valeur positive de Z_{MK} suggère une tendance à la hausse, alors qu'une valeur négative de Z_{MK} est associée à une tendance à la baisse.

Si $Z_{MK} > 0$, l'hypothèse nulle H_0 d'une absence de tendance monotone est comparée à l'hypothèse alternative H_1 d'une tendance monotone croissante. Ainsi, pour un seuil α , on rejette l'hypothèse H_0 au profit de l'hypothèse d'une tendance à la hausse si $Z_{MK} > Z_{(1-\alpha)}$, où $Z_{(1-\alpha)}$ est le $(1 - \alpha)^e$ percentile de la loi normale centrée réduite.

Lorsque $Z_{MK} < 0$, l'hypothèse nulle H_0 d'une absence de tendance monotone est comparée à l'hypothèse alternative H_1 d'une tendance monotone décroissante. Ainsi, pour un seuil α , on rejette l'hypothèse H_0 au profit de l'hypothèse d'une tendance à la baisse si $Z_{MK} < -Z_{(1-\alpha)}$. Pour $\alpha = 0.05$, où on a $Z_{(1-\alpha)} = 1.645$, on rejette H_0 , sachant qu'il y a une probabilité de 5% que cette série soit obtenue alors que H_0 est vrai³.

1. L'expression pour $V(S)$ est différente lorsqu'il y a égalité entre valeurs de la série : Hamed, K.H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *J. Hydrol.* 349(3-4) : 350-363. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2007.11.009.
2. Attention : on ne peut jamais accepter H_0 car on ne peut jamais rejeter H_1 .
3. Un débat a cours depuis plusieurs années quant au seuil α à considérer pour rejeter l'hypothèse nulle et sur l'interprétation à donner au seuil de significativité. Sans entrer dans les détails, le lecteur intéressé par ces questions peut consulter l'article suivant : Colquhoun, D. (2014). An investigation of the false discovery rate and the misinterpretation of p-values, *Royal Society Open Science* 1(3) : 140216. DOI: 10.1098/rsos.140216

Fiche technique A.7 Distribution statistique des valeurs extrêmes et loi de Gumbel

Les probabilités d'occurrence des valeurs extrêmes d'une série aléatoire stationnaire sont souvent représentée par la loi de Gumbel, qui correspond à une forme particulière de la loi généralisée des extrêmes (*Generalized Extreme Value*; GEV)^{1,2}. La loi de Gumbel est notamment utilisée par Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) pour la construction des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)³. La fonction de densité de probabilité⁴ de la loi de Gumbel, $f_G(x)$, s'écrit :

$$f_G(x) = \sigma^{-1} z \exp(-z)$$

avec :

$$z = \exp\left[-\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right]$$

où μ est le paramètre de position et σ le paramètre d'échelle de la distribution⁵. La fonction de répartition⁶ correspondante est donnée par :

$$F_G(x) = \exp(-z)$$

La méthode des moments⁷ peut être utilisée pour estimer les paramètres de la Gumbel d'une série donnée. Soit \bar{x} et s , la moyenne et l'écart-type de la série, les paramètres de position, $\hat{\mu}$, et d'échelle, $\hat{\sigma}$, de la loi de Gumbel ajustée à cette série sont obtenus à partir des expressions suivantes :

$$\hat{\sigma} = \sqrt{6} \left(\frac{s}{\pi}\right)$$

$$\hat{\mu} = \bar{x} - \sqrt{6} \frac{\gamma s}{\pi}$$

où γ est la constante d'Euler-Mascheroni ($\gamma \approx 0.5772$) Enfin, on peut estimer un quantile pour une période de retour donnée T (en années) en inversant la fonction de répartition F :

$$X = \hat{\mu} - \hat{\sigma} \ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right]$$

La loi de Gumbel a été ajustée aux valeurs de la série des valeurs maximales annuelles de précipitations journalières à la station de l'aéroport Jean-Lesage⁸ à Québec (Figure A.7a). Les valeurs des paramètres de position et d'échelle après ajustement sont $\hat{\mu} = 46.1$ et $\hat{\sigma} = 10.9$. Le diagramme quantile-quantile⁹ comparant les quantiles estimés à partir de la loi de Gumbel aux quantiles empiriques est présenté à la Figure A.7b. On peut constater que l'accord entre les quantiles empiriques et ceux de la loi de Gumbel est satisfaisant et, donc, conclure que la loi de Gumbel ajustée représente adéquatement la série des maxima annuels de précipitations journalières à la station Jean-Lesage.

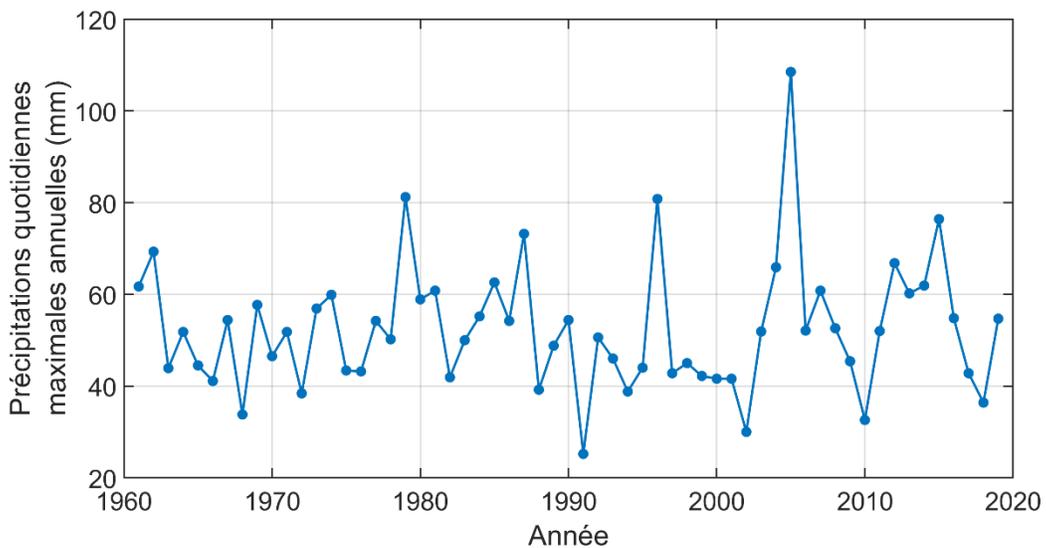


Figure A.7a Série des maxima annuels de précipitations quotidiennes à la station de l'aéroport Jean-Lesage à Québec.

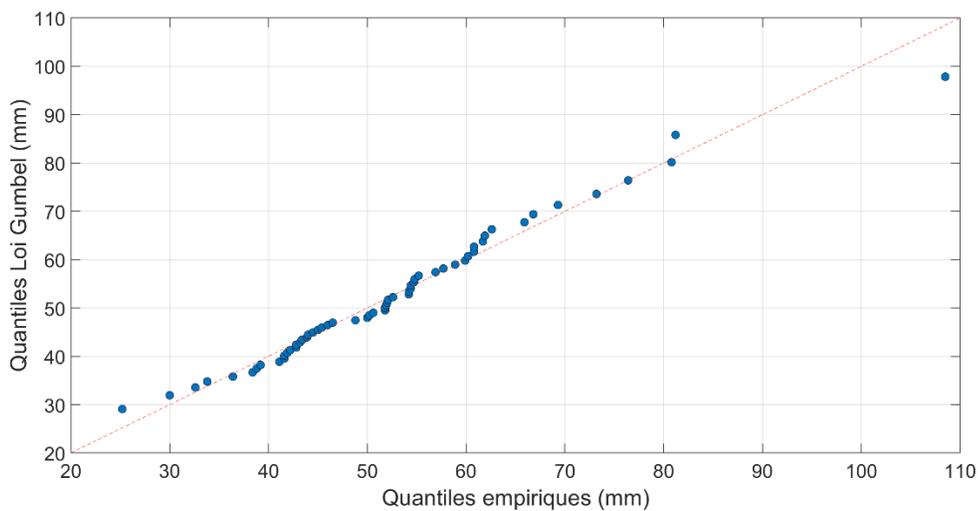


Figure A.7b Diagramme quantile-quantile (Q-Q) entre quantiles de la loi de Gumbel et quantiles empiriques⁹ pour la série des maxima annuels de précipitations quotidiennes à la station Jean-Lesage (Figure A.7a).

1. L'utilisation des lois de Gumbel et *Generalized Extreme Value* (GEV) s'appuient sur des considérations théoriques. Le lecteur souhaitant avoir plus de détails peut consulter : Coles S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer, 208 p.
2. La loi de Gumbel correspond au cas où le paramètre de forme de la loi GEV est fixé à zéro. Voir Coles (2001) pour plus de détails sur la loi GEV.
3. Pour plus de détails voir https://climat.meteo.gc.ca/prods_servs/engineering_f.html
4. La fonction de densité de probabilité $f(x)$ (*probability density function* en anglais) définit la probabilité que la valeur x soit égale à une valeur donnée. Ainsi $f(x) dx$ est la probabilité que x soit compris dans l'intervalle $[x, x + dx]$.

5. La moyenne de la loi de Gumbel est $\mu + \sigma \gamma$ où γ est la constante d'Euler-Mascheroni ($\gamma \approx 0,5772$) et la variance est donnée par $\pi^2 \sigma^2 / 6$.
6. La fonction de répartition (*cumulative distribution function* ou CDF en anglais) $F(x)$ définit la probabilité que la variable X soit inférieure à la valeur x , soit $P(X < x) = F(x)$.
7. Plusieurs autres méthodes d'estimation existent et présentent certains avantages par rapport à la méthode des moments (p. ex. maximum de vraisemblance, méthode des L-moments). La méthode des moments est celle utilisée par ECCC pour la construction des courbes IDF au Canada.
8. La station Jean-Lesage (7016294-701S001) est opérée par Environnement et Changement Climatique Canada.
9. Les diagrammes quantile-quantile ou diagramme Q-Q (*Q-Q plot* en anglais) comparent les quantiles estimés à partir de la distribution ajustée aux données aux quantiles empiriques correspondants.
10. Les quantiles empiriques ont été estimés à partir de l'estimateur de Cunnane.

Fiche technique A.8 Approche *Peak-Over-Threshold* (POT)

Les séries de maxima annuels ne retiennent que la plus grande valeur enregistrée à chaque année. Pour fin d'exemple, considérons la série des maxima annuels de précipitations quotidiennes de la station de l'aéroport Jean-Lesage¹ à Québec, présentée à la Figure A.7a. Puisqu'une seule valeur est retenue à chaque année, il est possible que des précipitations quotidiennes comprises entre le plus grand et le plus petit maxima annuel de la série aient été observées certaines années, mais n'aient pas été retenues pour fin d'analyse. Si on extrait ces valeurs, on obtient la série de la Figure A.8. On peut voir que plusieurs pluies relativement importantes, par exemple en 2005 (année où la plus grande valeur a été enregistrée), ne sont pas retenues lorsque seulement les valeurs maximales annuelles sont utilisées.

L'approche *Peak-Over-Threshold*² (POT) permet d'intégrrer ces valeurs aux analyses. Elle consiste à définir un seuil et à retenir toutes les valeurs supérieures à ce seuil. La série des valeurs au-dessus de ce seuil est appelée série de durée partielle (*partial duration series*). La loi de Pareto généralisée³ est ensuite ajustée à ces données et utilisée pour estimer différents quantiles extrêmes.

L'identification du seuil est délicate et constitue sans doute la principale difficulté de la méthode POT. Plusieurs approches ont été proposées pour fixer le seuil, mais ce seuil demeure dans une certaine mesure arbitraire et son choix influence les résultats (pour une discussion sur ce point, voir Coles, 2001). Même si l'utilisation de la méthode POT peut en principe améliorer l'inférence des quantiles extrêmes, sa mise en pratique demeure délicate et nécessite une certaine expertise.

La mise en place de l'approche POT exige également de disposer d'archives des données historiques à pas de temps courts (p. ex. séries aux 5 minutes ou horaires) afin d'être en mesure d'extraire les valeurs au-dessus de seuils donnés. Seules les pluies maximales annuelles de diverses durées sont disponibles dans les archives historiques de données au Canada ce qui fait qu'il est impossible d'extraire les valeurs au-dessus de seuil donné. L'approche POT ne peut donc être utilisée pour la construction des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF). L'utilisation de la méthode POT pourrait s'avérer avantageuse dans les cas où l'on dispose de séries continues de pluies.

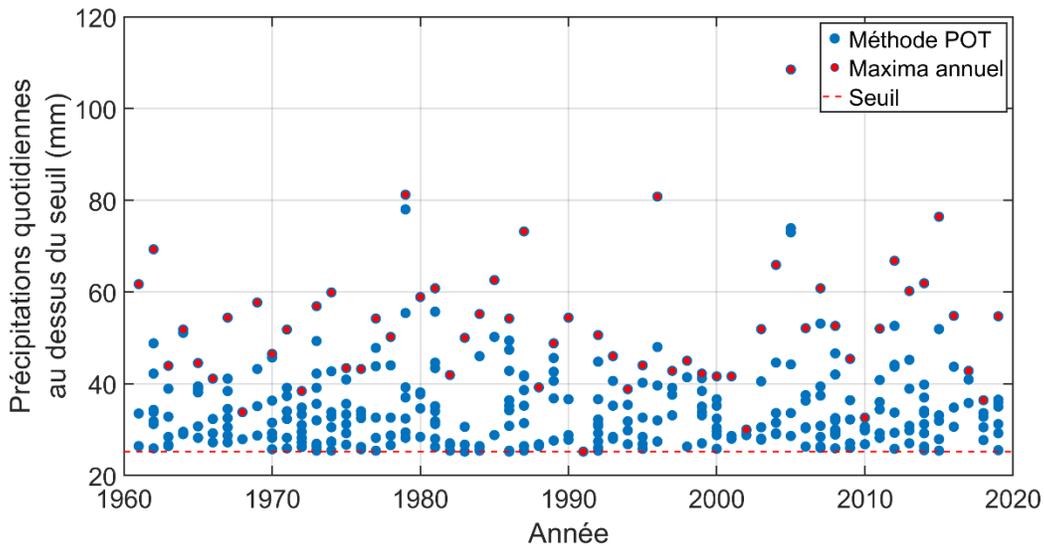


Figure A.8 Valeurs de précipitations quotidiennes à la station Jean-Lesage au-dessus de la valeur seuil de 25.2 mm (plus petit maxima annuel de la série de la Figure A.7a) à chaque année.

1. La station Jean-Lesage (7016294-701S001) est opérée par Environnement et Changement Climatique Canada.
2. Le lecteur peut consulter les deux références suivantes pour plus de détails sur l'approche POT :

Coles S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, Springer, 208 p.

Mailhot A., Lachance-Cloutier S., Talbot G., Favre A.-C. (2013). Regional estimates of intense rainfall based on the Peak-Over-Threshold (POT) approach, *J. Hydrol.*, 476:188-199. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.10.036.

3. Voir Coles (2001) pour des détails sur la loi de Pareto généralisée.

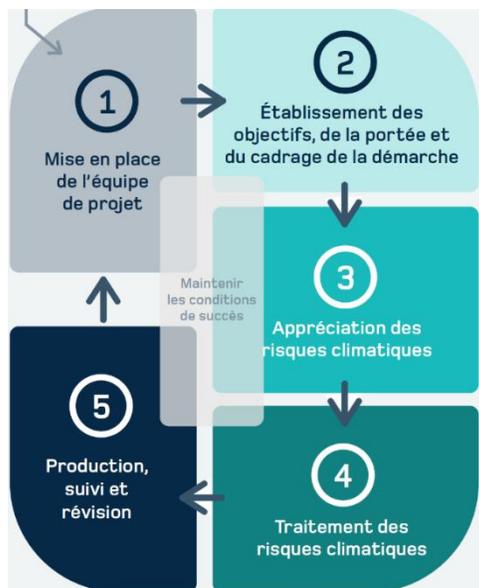
Module B – Démarche d'adaptation aux changements climatiques

Fiche technique B.1 – Démarche d'adaptation aux changements climatiques¹

Les changements climatiques entraîneront des modifications importantes de plusieurs variables climatiques. Ces conditions climatiques inédites mettront à mal la fonctionnalité de plusieurs infrastructures, compromettent plusieurs services, perturberont les activités socioéconomiques, porteront atteinte à la qualité de vie et à la santé des populations et mettront en péril divers systèmes naturels et la survie de certaines espèces. L'adaptation aux changements climatiques vise à mettre en place diverses mesures afin de limiter ces impacts, d'améliorer la résilience de nos sociétés et, le cas échéant, de tirer profit des effets bénéfiques des changements climatiques. Par ailleurs, diverses actions humaines pourront faciliter la transition climatique des systèmes naturels.

L'adaptation aux changements climatiques est donc essentielle. La Figure B.1, tirée de Ouranos et MELCCFP (2024)², présente les étapes de la démarche d'adaptation visant à identifier les risques climatiques et les mesures permettant d'atténuer les impacts de ces changements sur divers systèmes et, ultimement, à produire un plan d'adaptation. Cette démarche se décline en cinq étapes : 1) mise en place de l'équipe de projet ; 2) établissement des objectifs, de la portée et du cadrage de la démarche ; 3) appréciation des risques climatiques ; 4) traitement des risques climatiques ; 5) production, suivi et révision.

La mise en place de l'équipe de projet a principalement pour objectif d'identifier le responsable de la démarche et les membres de l'équipe qui réaliseront les travaux. Le rôle de cette équipe, qui devra inclure des représentants de divers services, est d'élaborer le plan et assurer sa mise en œuvre. Divers experts pourront également s'adjoindre à l'équipe en tant que conseillers et intervenir ponctuellement en soutien à cette démarche. L'engagement de tous les membres de l'équipe est essentiel afin de garantir le succès de la démarche d'adaptation.



Les fiches techniques B.2 à B.4 discutent des étapes 2 à 4 de la démarche d'adaptation. La fiche B.5 aborde le concept et la matrice de risque, la fiche B.6 présente un exemple d'application et, finalement, la fiche B.7 est un glossaire de la terminologie utilisée en adaptation.

L'adaptation aux changements climatiques doit impérativement s'accompagner de mesures d'atténuation* visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Au Québec, la démarche d'adaptation vient en support au plan climat³ qui permet aux organismes municipaux de se doter d'un document de planification qui couvre à la fois les enjeux d'adaptation et d'atténuation.

Figure B.1 Étapes d'une démarche d'adaptation aux changements climatiques (tirée de Ouranos et MELCCFP, 2024¹).

1. Les mots et expressions suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire de la Fiche B.7.
2. Ouranos et MELCCFP (2024). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques – Guide pour les organismes municipaux. 138 pages.
3. MELCCFP (2024). Guide d'élaboration d'un plan climat, Gouvernement du Québec, 25 pages (<https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/programmes/accelerer-transition-locale/guide-elaboration-plan-climat.pdf>.)

Fiche technique B.2 – Objectifs, portée et cadre de la démarche d'adaptation¹

Cette étape vise à : 1) définir les objectifs et la portée de la démarche d'adaptation ; 2) établir le portrait de l'organisation et du territoire; 3) identifier les aléas, systèmes et impacts à considérer ; 4) préciser les paramètres de l'analyse de risque (Figure B.2).

1. Objectifs et portée de la démarche d'adaptation

Les objectifs fondamentaux communs à toutes les démarches d'adaptation sont : a) d'évaluer les risques posés par les changements climatiques en climat actuel et futur ; b) de définir les besoins d'adaptation ; c) d'identifier et de mettre en place les mesures d'adaptation adéquates. La démarche d'adaptation est ensuite résumée dans un plan d'adaptation. Des objectifs plus spécifiques peuvent toutefois être définis en fonction d'enjeux locaux (p. ex. enjeux d'érosion côtière ou de feux de forêt).

2. Portrait de l'organisation et du territoire sous sa juridiction

Un portrait de l'organisation qui entreprend une démarche d'adaptation (ville, municipalité, communauté urbaine, etc.), de même qu'une caractérisation du territoire sous sa juridiction, doivent d'abord être réalisés. Une collaboration avec d'autres organisations dont les territoires sont connexes et les juridictions complémentaires (p. ex. les MRC) peut s'avérer essentielle pour certains enjeux communs (p. ex. gestion des risques d'inondations à l'échelle d'un bassin versant) ou afin de coordonner les démarches d'adaptation entreprises sur ces territoires.

3. Identification des aléas, systèmes et des impacts

Les aléas*, les systèmes* affectés par ces aléas et les impacts (ou conséquences*) de ces aléas sur les systèmes présents sur le territoire d'étude seront ensuite répertoriés. Les systèmes en question incluent les infrastructures (p. ex. réseau routier, réseaux d'égout unitaires et pluviales), les populations, les activités économiques, les milieux naturels et les services². Les aléas les plus pertinents pour le Québec sont les inondations fluviales (eau libre, embâcle) et pluviales (refoulement réseau d'égout et accumulation d'eau en milieu urbain), les vagues de chaleur, les glissements de terrain, les incendies de forêts et l'érosion et la submersion côtière³. D'autres aléas peuvent être pertinents pour certaines régions aux prises avec certaines problématiques, telle la fonte du pergélisol, la dégradation de la qualité de l'air ou encore les sécheresses. Les impacts de ces aléas sur les systèmes doivent ensuite être répertoriés. Il s'agit donc de documenter la chaîne aléa → système → impacts à partir des données et des documents historiques disponibles. Cet exercice exige de colliger des informations sur les aléas passés et leurs impacts sur les systèmes présents pour le territoire sous étude. Cette analyse sera complétée par une réflexion sur des aléas qui, sans qu'ils se soient produits par le passé, risquent de survenir plus fréquemment en climat futur et sur les systèmes qui pourraient être affectés par ces aléas. Les informations relatives à l'évolution future de ces aléas en climat futur doivent ainsi être colligées. Plusieurs ressources sont disponibles à ce sujet (voir les Fiches C.1 et C.2).

4. Préciser les paramètres de l'analyse de risque

L'analyse de risque (Fiches B.3, B.4 et B.5) exige de procéder au préalable à : a) l'identification et la caractérisation des aléas, et à la sélection d'indicateurs climatiques* ; b) l'établissement de seuils climatiques* ; c) l'identification des horizons temporels* ; d) la sélection des scénarios d'émissions* (Figure B.2a).

a. Aléas et indices climatiques

Une caractérisation plus fine des aléas doit être entreprise sur la base des données colligées à l'étape précédente. Elle vise à définir de façon qualitative ou quantitative, selon la nature des données

disponibles, la vraisemblance* (ou la probabilité d'occurrence) de cet aléa en climat passé et futur. Une évaluation qualitative s'appuiera sur les connaissances empiriques disponibles ou l'avis d'experts. Autrement, lorsque des données historiques ou des projections climatiques sont disponibles, une analyse statistique de ces données permettra d'estimer ces probabilités d'occurrence.

Des indices climatiques*, qui consistent en des valeurs combinant une ou plusieurs variables climatiques, sont utiles pour caractériser les aléas lorsque l'on dispose de données historiques ou de projections climatiques⁴. Ainsi, l'aléa 'vague de chaleur' peut être défini comme le nombre annuel d'épisodes où la température maximale quotidienne dépasse 30°C pendant 3 jours consécutifs ou plus⁵. Les indices climatiques servent à établir la fréquence d'occurrence et à quantifier l'amplitude des aléas en climat passé et futur. Ils sont également utilisés comme *proxy* pour établir les impacts d'un aléa sur un système donné. À titre d'exemple, le nombre de cycles de gel-dégel est souvent utilisé pour évaluer les impacts du réchauffement climatique sur la dégradation des chaussées, une augmentation du nombre de cycles de gel-dégel étant associée à une dégradation plus importante. Les indices climatiques dépendent non seulement de l'aléa, mais également du système et du type d'impact (Figure B.2a).

b. Seuils climatiques

Des seuils climatiques, variables selon les séquences aléa-système-impact à l'étude, doivent être fixés au-delà desquels les conséquences ou les impacts (dommages, dégradation, pertes d'usages, bris de services, etc.) sont jugés significatifs et importants. Ce seuil peut, par exemple, correspondre à la capacité d'une infrastructure, à un événement historique de référence ou encore à un point au-delà duquel les responsables estiment qu'il y aura bris de services. Les connaissances empiriques acquises par le passé par divers groupes, tels les employés municipaux, les opérateurs de divers équipements ou les équipes d'intervention, de même qu'une analyse des aléas passés, pourront être des sources d'informations utiles pour fixer ces seuils. À titre d'exemple, un seuil de 10 cycles de gel-dégel par hiver pourrait être considéré, au-dessus duquel la dégradation des chaussées deviendrait préoccupante (Figure B.2b). Ces seuils seront utilisés pour l'analyse de risque (voir Fiches B.4 à B.5). La Figure B.2b présente d'autres exemples de séquences aléa → système → impact → indice → seuil.

c. Période de référence et horizons temporels

La démarche d'adaptation exige de préciser quelles périodes passée et future seront considérées. On désigne par *période de référence*, la période passée, préférablement d'une durée minimale de 30 ans, à laquelle seront comparées les conditions climatiques futures. Cette période doit être récente et représentative des conditions historiques. Elle dépend toutefois de plusieurs facteurs, notamment, la période pour laquelle on dispose de données observées. Les *horizons temporels** désignent les périodes futures qui seront comparées à la période de référence. Deux périodes sont recommandées pour représenter des horizons à moyen et long terme : 2041-2070 et 2071-2100.

d. Scénarios d'émission

Divers scénarios d'émissions, chacun correspondant à une évolution future possible des émissions et des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, doivent être considérés. Trois scénarios sont couramment utilisés, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5, correspondant à des forçages radiatifs* croissants. Ainsi, chaque séquence aléa → système → impact → indice → seuil devra être évaluée pour chacun des horizons temporels et SSP retenus, et les résultats comparés à la période de référence (Figure B.2a). Ces résultats serviront à réaliser l'appréciation des risques (Fiche B.3) et à procéder au traitement des risques (Fiche B.4).

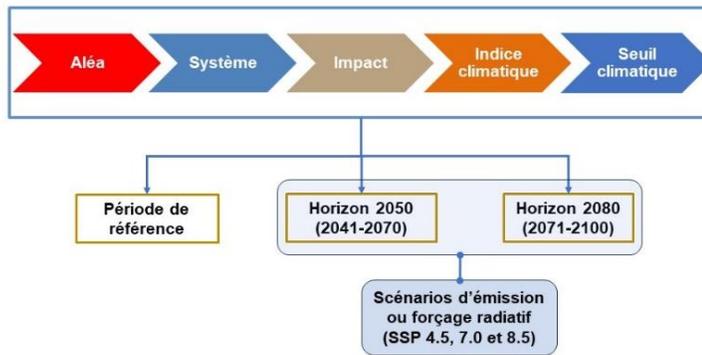


Figure B.2a Établissement du cadre de la démarche d'adaptation.



Figure B.2b Exemples de séquences aléa → système → impact → indice → seuil

1. Les mots et expressions suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire de la Fiche B.7.
2. L'Annexe F de Ouranos et MELCCFP (2024) présente une liste non-exhaustive des systèmes municipaux à considérer.
3. L'Annexe B de Ouranos et MELCCFP (2024) propose une liste des aléas possibles avec leurs impacts potentiels sur différents systèmes.
4. L'Annexe A de Ouranos et MELCCFP (2024) propose une liste d'indices climatiques avec leurs valeurs en climat passé et futur pour diverses régions du Québec.
5. Définition utilisée dans Ouranos et MELCCFP (2024). D'autres définitions sont toutefois possibles.

Fiche technique B.3 – Appréciation des risques climatiques

Cette étape a pour objectif d'affiner les analyses précédentes afin d'identifier et de prioriser les séquences aléa-système-impact qui présentent les plus grands risques et qui seront retenues pour les analyses ultérieures. Un système ou ses composantes sont à risque s'ils sont exposés et vulnérables à un aléa. L'appréciation des risques comporte trois étapes : 1) l'identification des risques ; 2) l'analyse de risques ; 3) l'évaluation des risques.

1. Identification des risques

L'identification des risques a pour objectif d'identifier et d'évaluer de façon plus précise les risques associés à chaque combinaison aléa-système-impact à partir des informations climatiques, des vulnérabilités et des conséquences potentielles en climat actuel et futur. Cette étape se divise en trois sous-étapes.

- A. Identification des systèmes et des composantes : réalisée en reprenant les listes des impacts potentiels pour chaque combinaison aléa-système¹ et évaluer si chacun de ces aléas peut affecter chaque système et ainsi identifier les paires aléa-système pertinentes à considérer pour la suite. À ce stade, les impacts identifiés restent génériques et demandent à être contextualisés dans le cadre de l'analyse de risques.
- B. Analyse de vulnérabilités : vise à déterminer la propension ou prédisposition d'un système à être affecté négativement. Il s'agit d'une étape facultative, toutefois la réalisation de l'analyse de vulnérabilités peut s'avérer très utile pour déterminer les conséquences lors de l'analyse de risques (Étape 2). Un exemple d'analyse de vulnérabilités est donné dans la Fiche B.6.
- C. Analyse d'exposition : permet d'établir si le système est effectivement exposé à chaque aléa. Ainsi, un système pourrait théoriquement être impacté par l'aléa, mais, dans le contexte spécifique d'application, ne pas y être exposé et conséquemment ne pas être retenu. Cette analyse peut simplement, dans un premier temps, se limiter à déterminer si l'élément est ou n'est pas exposé (analyse de type oui/non). La liste des systèmes à risque en climat passé et futur pourra ainsi être établie.

2. Analyse de risques

L'analyse de risques consiste à attribuer un niveau de risque à chaque combinaison aléa-système. Le niveau de risque (R) est défini comme le produit de la vraisemblance de l'aléa (V) et de ses conséquences (C) sur le système ou ses composantes, ce qui s'écrit $R = V \cdot C$ (Fiche B.5). Une matrice de risque est créée pour chaque combinaison aléa-système en considérant l'ensemble des impacts de cet aléa sur ce système. Les seuils climatiques identifiés à l'étape précédente (Fiche B.2) pourront être utilisés afin d'évaluer les risques associés au dépassement de ces seuils. Plusieurs seuils pourront aussi être considérés afin d'évaluer les risques d'aléas d'amplitudes différentes.

3. Évaluation des risques

Les valeurs obtenues au cours de l'analyse de risques permettent d'établir un niveau de risque et d'identifier et de prioriser les composantes ou les systèmes les plus à risque face à un aléa donné. Les aléa-système comportant des risques majeurs et extrêmes doivent être priorisés (voir Fiche B.5). On dispose, une fois cette analyse réalisée pour chaque combinaison aléa-système, d'une évaluation des risques selon deux horizons futurs et minimalement deux SSP. Généralement, les risques seront d'autant plus grands que l'horizon futur est lointain et le forçage radiatif* important. Le Tableau B.3 présente un exemple de synthèse des résultats de l'étape d'appréciation des risques pour différents aléa-système-impact. Ce tableau montre que les inondations causées par les pluies extrêmes posent les risques les plus importants à l'horizon 2071-2100.

Tableau B.3 Exemple de résumé d'appréciation des risques pour différents aléas-systèmes-impacts (inspiré de Ouranos et MELCCFP, 2024²)

Aléa-système-impact	Période de référence	Horizon 2041-2070		Horizon 2071-2100	
		SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP2-4.5	SSP3-7.0

Dommmages aux bâtiments à la suite de refoulements d'égout causés par des pluies extrêmes	Modéré	Modéré	Majeur	Majeur	Extrême
Mortalité et morbidité au sein de la population des personnes âgées à la suite de vagues de chaleur	Négligeable	Mineur	Mineur	Mineur	Majeur
Dégradation des chaussées causée par les cycles gel-dégel	Mineur	Mineur	Majeur	Majeur	Majeur

1. L'Annexe B de Ouranos et MELCCFP (2024) propose une liste plus exhaustive des aléas possibles avec leurs impacts potentiels sur différents systèmes.
2. Ouranos et MELCCFP (2024). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques – Guide pour les organismes municipaux. 138 pages

Fiche technique B.4 – Traitement des risques climatiques

Le traitement des risques climatiques a pour objectif la planification de la mise en œuvre des mesures d'adaptation. Il comporte les étapes suivantes : 1) identification des objectifs spécifiques d'adaptation ; 2) identification et sélection des mesures d'adaptation ; 3) développement des indicateurs de suivi ; 4) planification de la mise en place, du suivi et de l'évaluation des mesures d'adaptation.

1. Identification des objectifs spécifiques d'adaptation

Les objectifs spécifiques d'adaptation servent à établir les cibles à atteindre et les échéances à respecter en matière de réduction des risques et d'adaptation. Ces objectifs spécifiques permettent de baliser l'effort d'adaptation et de donner des pistes sur le type de mesures à mettre en place. Ils servent également de 'tableau de bord' et de guide afin de coordonner et mobiliser les parties prenantes. Cette étape est l'occasion de jeter un regard critique sur les résultats de l'analyse de risque afin de moduler la stratégie d'adaptation selon les enjeux. Ainsi, pour une situation avec des enjeux de sécurité ou de possibles pertes de vies et une fenêtre temporelle d'adaptation à long terme, il pourra s'avérer pertinent d'être plus conservateur et de considérer le scénario SSP5-8.5 et un horizon temporel à plus long terme pour établir les objectifs d'adaptation, dans le but de minimiser les risques et de maximiser la résilience. En présence de risques plus modérés, une adaptation progressive, basée sur le scénario SSP3-7.0, pourra être envisagée, accompagnée de mesures d'adaptation ajustables avec le temps. Les objectifs d'adaptation et la stratégie à adopter pour la mise en œuvre de la démarche d'adaptation dépendent de plusieurs facteurs, notamment la tolérance au risque, les ressources disponibles, la fenêtre temporelle dont on dispose pour mettre en place les mesures et les niveaux de risque cibles de l'adaptation.

2. Identification et sélection des mesures d'adaptation

Un inventaire de mesures d'adaptation potentielles peut être réalisé dans un premier temps sans considération des contraintes spécifiques à leur mise en application (coûts, faisabilité technique, acceptabilité sociale, etc.). Plusieurs guides et listes génériques de ces mesures sont disponibles¹. La sélection des mesures doit reposer sur des critères liés au risque (p. ex. capacité de réduction des risques, durée de vie utile du système, conséquences socioéconomiques et environnementales des mesures) et aux volets technique, opérationnel et financier (p. ex. faisabilité technique, coûts de mise en place et de maintenance, disponibilité des financements, capacité à obtenir les approbations pour le financement, la planification, leur mise en œuvre et leur suivi). Une sélection des mesures à partir de méthodes plus structurées de priorisation est aussi à envisager². Il convient de noter que les mesures dites 'd'adaptation' sont souvent des mesures connues et documentées. À titre d'exemple, les infrastructures vertes sont souvent évoquées à titre de mesures d'adaptation aux changements climatiques dans le contexte de la gestion des eaux pluviales. Elles sont également reconnues comme de 'bonnes pratiques', puisqu'elles présentent plusieurs avantages complémentaires.

3. Développement des indicateurs de suivi

L'élaboration d'indicateurs de suivi est essentielle, quoique difficile. Trois types d'indicateurs doivent être définis pour couvrir différents aspects de la démarche d'adaptation : a) suivi des objectifs spécifiques et de réduction des risques climatiques ; b) suivi de l'état d'avancement du calendrier d'implantation des mesures ; c) efficacité et performance des mesures d'adaptation mises en place. Ces indicateurs doivent être clairs, simple à estimer et à interpréter, liés à des cibles mesurables et accompagnés d'un calendrier indiquant quand ils seront estimés. Le Tableau B.4 présente des exemples d'indicateurs.

4. Mise en œuvre, suivi et évaluation des mesures d'adaptation

Les mesures d'adaptation sélectionnées doivent être organisées selon un calendrier de planification. Ce calendrier doit être établi en fonction des risques jugés prioritaires (voir Fiche B.3), mais également en fonction de facteurs tels les opportunités de financement ou encore la volonté d'agir des principaux acteurs. Plusieurs informations devront être compilées pour la planification et le suivi des mesures sélectionnées nécessaires à l'estimation des indicateurs retenus. Ces informations serviront à obtenir une vision globale de l'état d'avancement de la mise en œuvre des mesures, des rôles et responsabilités des différents acteurs et de l'efficacité des mesures mises en place. Le suivi

et l'évaluation du programme d'adaptation est un exercice ardu, qui demande du temps et des efforts importants et qui est souvent négligé.

Tableau B.4 Exemples d'indicateurs de suivi de l'implantation des mesures

Indicateurs	Métrique évaluée
Pourcentage de mesures d'adaptation identifiées et mises en place	Permet de suivre l'évolution de la mise en place de la démarche d'adaptation
Total des surfaces imperméables déminéralisées ou dont les eaux sont redirigées vers des zones d'infiltration	Permet d'évaluer les volumes d'eau non acheminés au réseau contribuant ainsi à réduire les risques associés aux inondations urbaines et aux surverses
Nombre de décès attribuables aux épisodes de chaleurs extrêmes	Permet d'évaluer l'efficacité des mesures d'adaptation mise en place pour contrer les risques associés aux vagues de chaleur

1. L'Annexe I de Ouranos et MELCCFP (2024) propose une liste de mesures selon différents risques climatiques.
2. L'annexe J de Ouranos et MELCCFP (2024) présente trois méthodes de priorisation : l'analyse multicritère, l'analyse par scénario et l'analyse coût-avantage.

Fiche technique B.5 – Concept et matrice de risque¹

Considérons un système* (infrastructure, populations, écosystèmes, etc.) subissant les impacts (ou les conséquences*) (dommages, mortalité, perturbations, interruptions de services, etc.) lorsqu'exposé à un aléa* (vague de chaleur, inondations, etc.). L'ampleur et l'étendue des conséquences seront fonctions du caractère plus ou moins extrême de l'aléa. Ainsi, une inondation de faible ampleur, donc plus fréquente, affectera un territoire plus petit avec des profondeurs d'inondation plus faibles et des dommages moins importants, alors qu'une inondation de plus grande ampleur, donc survenant plus rarement, aura des conséquences plus importantes. Il existe donc un lien entre l'amplitude, le caractère extrême de l'aléa et l'ampleur des conséquences.

Le concept de risque permet de mettre en balance la vraisemblance* d'un aléa et l'ampleur des conséquences sur un système exposé à cet aléa. Le risque (R) s'exprime sous la forme du produit de la vraisemblance (V) et des conséquences (C) :

$$R = V \times C$$

Ainsi un système exposé à un aléa sera d'autant plus à risque ($R \nearrow$) que l'aléa est probable ($V \nearrow$) et les conséquences importantes ($C \nearrow$). La vraisemblance réfère à la probabilité qu'un aléa survienne sur un territoire donné. Elle peut être qualitative (peu probable, probable, très probable, etc.) ou encore quantitative sous la forme d'une probabilité d'occurrence. Dans ce dernier cas, cette valeur peut être estimée à partir d'une analyse statistique des données historiques et s'exprimer comme une probabilité annuelle d'occurrence ou encore d'une période de retour (voir les Fiches A.3 et A.5).

La matrice de risque est utilisée afin d'évaluer les risques. La vraisemblance de l'aléa et ses conséquences sur un système donné sont classées selon diverses catégories. Le Tableau B.5 présente l'exemple d'une matrice de risque comportant cinq catégories pour la vraisemblance (de 'très improbable' à 'presque certain') et pour les conséquences (de 'négligeables' à 'très élevées'). L'attribution des catégories demeure dans une large mesure subjective, particulièrement pour les conséquences qui peuvent intégrer plusieurs dimensions (dommages matériels, pertes d'usages, mortalité, dégradation d'habitats, etc.).

Le risque est calculé en faisant le produit des catégories de la vraisemblance et des conséquences (Tableau B.5). Ainsi si un aléa 'très probable' (catégorie 4) entraîne des conséquences 'majeures' (catégorie 4), le risque associé est 16 (4×4) et il est qualifié de 'majeur'. Suivant la classification du Tableau B.5, le risque peut aller de 'négligeable' à 'extrême'. Le risque croît donc lorsque l'on se déplace du coin inférieur gauche au coin supérieur droit de la matrice de risque (Tableau B.5).

D'autres classifications de la vraisemblance, des conséquences et du risque sont possibles. Les membres du comité responsable de la démarche d'adaptation doivent convenir entre eux de la classification à adopter. L'organisation d'un atelier de réflexion sur le sujet, de même que la consultation d'experts (science du climat, adaptation aux changements climatiques, aménagement du territoire, sécurité civile, etc.) sont à envisager. Il est primordial que ces classes, bien que subjectives, soient comprises et acceptées de tous. Il faut toutefois éviter un nombre trop élevé ou trop petit de classes.

Tableau B.5. Matrice de risque à cinq niveaux intégrant la vraisemblance et les conséquences (adaptée de Ouranos et MELCCFP, 2024¹).

		Vraisemblance					
		1	2	3	4	5	
		Très improbable	Improbable	Probable	Très probable	Presque certain	
○	5	Très élevées	5	10	15	20	25

4	Majeures	4	8	12	16	20
3	Modérées	3	6	9	12	15
2	Mineures	2	4	6	8	10
1	Négligeables	1	2	3	4	5
Niveau de risque		Négligeable $R \leq 2$	Mineur $2 < R \leq 4$	Modéré $4 < R \leq 9$	Majeur $9 < R \leq 16$	Extrême $16 < R \leq 25$

1. Les mots et expressions suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire de la Fiche B.7.
2. Ouranos et MELCCFP (2024). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques – Guide pour les organismes municipaux. 138 pages.

B.6 Exemple de démarche d'adaptation pour les inondations pluviales¹

Cette fiche décrit un exemple de démarche d'adaptation d'une municipalité pour l'aléa d'inondations pluviales. Les étapes décrites dans les Fiches B.2 à B.4 sont reprises dans les paragraphes qui suivent. Pour plus de détails et d'autres exemples d'application, le lecteur est invité à consulter Ouranos et MELCCFP (2024)², de même que les cahiers de travail³ accompagnant ce document. L'exemple qui suit est purement fictif. La mise en place d'une démarche d'adaptation exige des ressources humaines et financières pouvant être importantes. Elle devra donc être ajustée en fonction des ressources disponibles. L'exemple qui suit ne prétend donc pas être transposable à toutes les municipalités. La procédure utilisée pour estimer les intensités de pluie en climat futur présentée au Tableau B.6b est décrite au Chapitre 7 de Mailhot *et al.* (2024)⁴.

1. Objectifs, portée et cadre de la démarche d'adaptation

L'objectif est de déterminer si l'intensification des pluies extrêmes en climat futur entraînera une augmentation des risques d'inondations pluviales pour certains secteurs de la municipalité sous étude et, le cas échéant, d'identifier des mesures d'adaptation et de développer un plan de mise en place de ces dernières afin de maintenir ou de réduire les risques à long terme à des niveaux jugés acceptables.

2. Portrait de l'organisation et du territoire sous sa juridiction

La municipalité est située dans la région de Québec. Elle offre les services et possède les pouvoirs habituels d'une municipalité du Québec. Elle a notamment la responsabilité de la gestion du système de collecte des eaux pluviales et de collecte et de traitement des eaux usées. Une partie de son territoire est desservie par des réseaux séparés (pluvial et sanitaire) et une autre partie par un réseau unitaire. Plusieurs ouvrages de surverses sont présents, avec des fréquences élevées de surverses pour certains. Le milieu récepteur est jugé vulnérable. Le recensement des systèmes, des infrastructures avec leurs caractéristiques (techniques, maintenance, etc.), de même qu'un portrait des budgets, responsabilités, réglementations et juridictions en matière de gestion des eaux pluviales est réalisé.

3. Identification des aléas, systèmes et des impacts

L'aléa **inondation pluviale** considéré est lui-même lié à l'aléa **pluie extrême**. Or, selon les projections climatiques disponibles, ces pluies sont appelées à augmenter en fréquence et en intensité en climat futur. Les systèmes en jeu sont les **infrastructures de gestion des eaux pluviales** et l'aménagement et l'occupation du territoire (surfaces perméables et imperméables, infrastructures de stockage, zones d'accumulation des eaux, cuvettes, etc.), qui déterminent les volumes d'eau stockés en surface, infiltrés et qui ruissellent jusqu'au réseau, ainsi que les secteurs susceptibles d'être inondés.

Une séance de réflexion est organisée afin d'identifier les systèmes et composantes susceptibles d'être affectés par cet aléa. Quatre secteurs, A, B, C et D, de la municipalité ont été identifiés comme à risque au terme de cet exercice. Cette évaluation se base sur les expériences passées et sur l'appréciation des risques par les gestionnaires du réseau. Ces secteurs sont présentés au Tableau B.6a. À noter que le secteur D a été inclus même s'il n'a pas été inondé par le passé, puisque les conséquences d'une inondation de ce secteur seraient dramatiques. D'autres secteurs pourront aussi être éventuellement intégrés pour des raisons similaires. L'évaluation des risques dans ces cas consiste à s'assurer que l'évolution future des pluies extrêmes n'entraînera pas une augmentation indue des risques d'inondations pour ces secteurs.

La pluie horaire de période de retour 25 ans a été retenue comme indice et seuil climatique pour les **secteurs A, B et C**. La valeur correspondante pour la période de référence est de **40.2 mm en une heure**. Cette valeur, proposée par les gestionnaires du réseau et basée sur leur expérience passée, définit le seuil au-delà duquel la pluie est susceptible de causer des refoulements d'égout et des perturbations significatives dans ces secteurs⁵. **La pluie horaire de période de retour 100 ans** a été considérée pour le **secteur D**, puisque les gestionnaires estiment que les inondations pluviales

sont possibles au-delà de ce seuil et qu'elles auront des conséquences importantes pour ce secteur. La valeur correspondante est de **49.7 mm en une heure** pour la période de référence.

Le Tableau B.6b présente les valeurs de ces indices pour la période de référence et pour les horizons futurs à moyen (2041-2070) et long (2071-2100) termes selon les SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5⁶. Les probabilités annuelles d'occurrence de pluie de 40.2 mm ou plus en une heure pour les secteurs A, B et C et de 49.7 mm en une heure pour le secteur D pour les différents horizons futurs sont également indiquées. Par exemple, la probabilité annuelle d'avoir une pluie de 40.2 mm ou plus en une heure est de 0.14 pour la période 2071-2100 selon le SSP3-7.0, ce qui signifie que pendant cette période, de telles pluies seront enregistrées en moyenne à tous les 7 ans alors qu'elles surviennent en moyenne à tous les 25 ans pendant la période de référence. Les hausses des intensités et des probabilités d'occurrence des pluies extrêmes rapportées dans le Tableau B.6b sont majeures. Ces probabilités seront utilisées pour établir les échelles de vraisemblance (Tableau B.6g). Les impacts d'éventuelles inondations pluviales pour les différents secteurs sont répertoriés au Tableau B.6c.

4. Appréciation des risques climatiques

Cette étape (Fiche B.3) débute par l'identification des risques associés à chaque combinaison aléa-système-impact à partir des informations climatiques, des vulnérabilités et des conséquences potentielles en climat actuel et futur.

Une analyse d'exposition est d'abord réalisée en utilisant les seuils climatiques du Tableau B.6b. Les évaluations préliminaires ont permis d'établir que le dépassement de ces seuils entraînerait l'exposition de plusieurs éléments de ces quatre secteurs. La liste des éléments exposés, de même que leur niveau d'exposition, dépendront du seuil climatique fixé; un seuil plus élevé résultant en un plus grand nombre d'éléments exposés et à un niveau d'exposition plus important. Le seuil climatique doit être fixé de sorte que son franchissement entraîne des conséquences significatives. Certains secteurs pourraient être subdivisés et divers seuils climatiques considérés pour ces sous-secteurs. Plusieurs seuils climatiques pourraient également être considérés dans l'éventualité où le dépassement de ces seuils marquerait une augmentation importante des niveaux de conséquences et des risques. L'appréciation des risques consiste à déterminer dans quelle mesure ce ou ces seuils seront plus fréquemment dépassés en climat futur.

Dans le présent cas, en utilisant comme référence une pluie de 40.2 mm ou plus ou de 49.7 mm ou plus en une heure selon les secteurs, les éléments exposés et les niveaux de vulnérabilités de chacun des éléments exposés sont évalués. Une liste d'éléments exposés est ensuite dressée et une cote de vulnérabilité est attribuée à chaque secteur.

La vulnérabilité est estimée en combinant la sensibilité* et la capacité d'adaptation*, les éléments les plus vulnérables étant ceux avec une sensibilité élevée et une faible capacité d'adaptation. L'attribution de cotes à chaque secteur repose sur une série de critères à définir par le comité responsable de la démarche d'adaptation. Le Tableau B.6d propose une liste possible de ces critères. Plusieurs reposent sur un examen des inondations passées ou encore sur l'expertise et l'expérience du personnel en charge de ces systèmes ou appelé à intervenir en cas de situations d'urgence (ingénieurs, gestionnaires, cols bleus, services d'urgence, professionnels de la santé publique, etc.).

Les cotes de sensibilité et de capacité d'adaptation sont ensuite attribuées par les membres du comité responsable de la démarche d'adaptation. Des experts externes pourront être consultés au besoin. Ces cotes sont ensuite utilisées pour établir la cote de vulnérabilité (VU), qui est obtenue en faisant le produit des cotes de sensibilité (S) et de capacité d'adaptation (VU = S x CA). L'attribution des cotes de vulnérabilité peut être directement réalisée sans passer par une décomposition en cotes de sensibilité et de capacité d'adaptation en utilisant les critères du Tableau B.6d.

Le Tableau B.6e présente la grille d'évaluation des vulnérabilités pour l'exemple considéré. Il convient de noter que les analyses préliminaires antérieures avaient déjà identifié ces secteurs comme exposés et vulnérables. On note que la cote de vulnérabilité la plus élevée a été attribuée au secteur

B, suivi par le secteur C. Quant au secteur A, une cote de vulnérabilité 'modérée' lui a été octroyée, alors que le secteur D a une cote de vulnérabilité 'faible'. Ces cotes s'expliquent de la façon suivante :

- Le secteur A a déjà été exposé aux inondations et présente certaines caractéristiques qui le rendent vulnérables à cet aléa (p. ex. contre-pente, sous-sols aménagés); cependant les citoyens de ce secteur sont socioéconomiquement mieux armés pour faire face aux sinistres et la capacité d'adaptation est jugée élevée (cote de vulnérabilité modérée);
- Le secteur B a déjà été fortement exposé par le passé et présente une communauté très vulnérable et socioéconomiquement mal outillée pour l'adaptation (cote de vulnérabilité élevée);
- Le secteur C est critique en matière de mobilité (p. ex. services d'urgence) et est déjà problématique; des travaux sont déjà planifiés pour ce secteur et donc la capacité d'adaptation est jugée élevée (cote de vulnérabilité modérée);
- Le secteur D n'a pas connu d'inondation par le passé; cependant les conséquences d'une inondation pourraient être catastrophiques advenant une hausse des pluies extrêmes, d'où sa cote de sensibilité 'élevée'; l'enjeu pour ce secteur est donc d'évaluer le risque en climat futur à la suite de l'accroissement des probabilités d'occurrence d'inondation sur ce secteur (cote de vulnérabilité élevée).

L'analyse de risque est ensuite réalisée. Elle consiste à estimer le niveau de risque de chaque système et composante exposé et ce, pour tous les aléas climatiques, horizons temporels et scénarios de forçage radiatif retenus. Elle implique d'estimer, dans un premier temps, la vraisemblance de l'aléa inondation et les conséquences de cet aléa pour chacun des secteurs identifiés comme vulnérables ou potentiellement vulnérables. Une matrice de risque similaire à celle de la Fiche B.5 est utilisée, où la vraisemblance et les conséquences sont divisées en cinq niveaux.

Les cotes de vraisemblance sont fixées sur la base des valeurs de l'indice climatique 'pluie maximale annuelle de durée 1 heure' présenté au Tableau B.6.b. On peut constater que les hausses projetées augmentent pour les horizons futurs plus lointains et les scénarios de forçage plus importants. L'échelle de vraisemblance a été établie sur la base des probabilités annuelles d'occurrence des pluies de durée 1 heure de période de retour 25 ans et 100 ans en période de référence (Tableau B.6g).

Les cotes de conséquence sont établies par les membres du comité sur la base des analyses de vulnérabilités présentées au Tableau B.6e. Elles sont représentatives de la sévérité des dommages, des perturbations et d'autres conséquences d'un dépassement du seuil fixé. Largement subjectives, elles doivent avoir été l'objet de discussions et adoptées de façon consensuelle par les membres du comité.

Un point important à considérer est que si la probabilité de franchir le seuil est plus grande en climat futur, l'intensité moyenne de l'aléa franchissant ce seuil sera plus grande. Dans ce cas, il peut s'avérer utile de considérer plusieurs seuils, afin de mieux étalonner l'évolution progressive des conséquences. Ainsi si l'ampleur des refoulements et de la zone exposée aux inondations augmente de façon importante lorsqu'un deuxième seuil est franchi, alors il pourrait être judicieux d'ajouter ce nouveau seuil à l'analyse afin de mieux apprécier l'évolution des conséquences et des risques pour des aléas plus extrêmes. À titre d'exemple, les analyses précédentes indiquent que la pluie maximale 1 heure de période de retour 100 ans en période de référence surviendra à toutes les 12-13 années à l'horizon 2071-2100 selon le SSP5-8.5. Le corolaire de cette assertion est que des pluies d'intensité largement supérieures au seuil historique seront possibles dans le futur avec des conséquences encore plus dévastatrices. Une analyse des risques associés à ce type d'événements plus extrêmes pourrait s'avérer pertinente.

Les matrices de risque des secteurs sont ensuite construites (Fiche B.3). Les Tableaux B.6h et B.6i présentent ces matrices de risques pour les périodes 2041-2070 et 2071-2100 respectivement, selon les trois SSP considérés. Un examen de ces matrices montre que les secteurs B et D seront à risques majeurs à l'horizon 2041-2070 (cotes de risque de 12 et 10 respectivement) selon le SSP3-7.0, auxquels s'ajoute le secteur A lorsque l'horizon 2071-2100 est considéré. La situation devient

beaucoup plus critique selon le SSP5-8.5, puisque les secteurs A, C et D sont à risques majeurs et que le secteur B est à risque extrême à l'horizon 2041-2070. Le secteur D passe de risque majeur à l'horizon 2041-2070 à risque extrême à l'horizon 2071-2100, selon ce même SSP.

Les cotes de conséquences de la matrice de risque sont intentionnellement inchangées entre la période de référence et les horizons futurs. On souhaite ainsi analyser l'impact de l'évolution de la fréquence d'occurrence des aléas sur le risque. Considérant les intensifications projetées des pluies extrêmes, des événements de pluies inédits qui dépasseront largement les valeurs historiques sont susceptibles de frapper le territoire. Ainsi, non seulement le seuil climatique sera dépassé plus souvent, mais il sera dépassé plus largement et les conséquences seront encore beaucoup plus importantes que les événements antérieurs. Afin de tenir compte de cet aspect, plusieurs seuils climatiques associés à des cotes de conséquences plus élevées pourront être définis. De même, différents scénarios d'évolution des conséquences résultant, par exemple, d'un déficit d'entretien ou un sous-investissement dans les infrastructures, ou encore à un accroissement de la vulnérabilité des populations, peuvent être explorés de cette façon.

Un examen élargi des autres secteurs de cette municipalité devrait sans doute être entrepris au vu de ces résultats, puisque même des secteurs historiquement à l'abri d'inondations pourraient très bien devenir exposés à cet aléa et subir ses contrecoups.

Au regard des résultats de l'analyse de risque, les secteurs B et D sont à prioriser, puisqu'ils sont les secteurs les plus à risque aux horizons 2041-2070 et 2171-2100, tant selon le SSP3-7.0 que selon le SSP5-8.5.

5. Traitement des risques

Le traitement des risques climatiques a pour principal objectif de définir les objectifs spécifiques d'adaptation, d'identifier et de sélectionner des mesures d'adaptation, de planifier leur mise en place et de développer des indicateurs de suivi.

En vue d'identifier les mesures d'adaptation pertinentes et applicables à chacun des secteurs, une liste générique des types de mesures possible est dressée avec les critères de pertinence et de faisabilité à considérer pour leurs mises en place. Le Tableau B.6j présente un exemple d'une telle liste et de critères. Le Tableau B.6j met également en exergue certains facteurs importants à considérer. Cette analyse exige de la part de la municipalité de colliger un nombre important d'information sur les ouvrages en place, les défaillances connues, la planification des travaux à venir et le développement projeté des secteurs. Le diagnostic le plus précis possible de l'état du réseau et des ouvrages et des sites critiques est essentielle. Ces informations sont essentielles afin d'établir un portrait, même global, des options d'adaptation possibles pour chacun des secteurs. Enfin, sur la base de ces critères, les secteurs où ces mesures pourraient être mises en place sont identifiés (Tableau B.6k).

Tableau B.6a. Secteurs problématiques ou potentiellement problématiques.

Secteur	Caractéristiques	Historique inondation
A	Réseau séparé, résidentiel de densité moyenne, plusieurs entrées en contre-pente, niveau d'imperméabilisation modéré à élevé, quelques espaces verts	Plusieurs sous-sols inondés lors de pluies de fortes intensités
B	Réseau combiné, appartements, fortement urbanisé et imperméabilisé, plat avec plusieurs points bas, plusieurs appartements aux sous-sols, problèmes d'ilot de chaleur	Fortes accumulations d'eau en surface en certains endroits lors d'événement de pluies de moyennes intensités, inondations d'appartements dans les sous-sols à la suite de refoulements d'égout suite à des pluies intenses

C	Points bas situés sous des viaducs ou sur des axes majeurs de circulation	Plusieurs épisodes avec des accumulations d'eau importantes en certains points bas
D	Secteur avec plusieurs bâtiments et infrastructures critiques (p. ex. hôpitaux, CHSLD) et plusieurs populations vulnérables	Sans avoir connu d'épisodes d'inondation par le passé, les conséquences d'inondations seraient dramatiques pour ce secteur.

Tableau B.6b. Intensité de la pluie de durée 1 heure (mm) de période de retour 25 ans (secteurs A, B et C) et 100 ans (secteur D) pour la période de référence (1961-2021)¹ et les horizons futurs moyen (2041-2070) et long (2071-2100) termes selon les scénarios SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5².

Forçage radiatif	Période	Secteurs A, B, C		Secteur D	
		Intensité (mm/h)	Probabilité annuelle d'occurrence d'une pluie de 40.2 mm pendant une heure	Intensité (mm/h)	Probabilité annuelle d'occurrence d'une pluie de 49.7 mm pendant une heure
Historique	1961-2021 (référence)	40.2	0.04	49.7	0.01
SSP2-4.5	2041-2070	46.1	0.09	57.0	0.03
	2071-2100	48.3	0.11	59.7	0.04
SSP3-7.0	2041-2070	46.5	0.09	57.5	0.03
	2071-2100	51.0	0.14	62.9	0.05
SSP5-8.5	2041-2070	48.3	0.11	59.7	0.04
	2071-2100	54.8	0.18	67.7	0.08

1. Les valeurs en climat de référence proviennent des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de la station Jean-Lesage à Québec produites par Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC). Ces valeurs ont été établies à partir des séries de la période 1961-2021.
2. Ces valeurs ont été estimées pour le point de grille couvrant la ville de Québec. La procédure utilisée pour estimer ces valeurs est décrite au Chapitre 7 de Mailhot *et al.* (2024).

Tableau B.6c. Liste des principaux impacts d'une inondation pluviale pour chacun des secteurs.

Secteur	Impacts
A, B	Sous-sols et rues inondés, dommages aux biens (ameublement, électroménagers, etc.) et aux bâtiments, perturbations des activités socioéconomiques, corvée de nettoyage pour les citoyens touchés et pour la ville, problème d'insalubrité, iniquité économique entre citoyens assurés et non assurés, stress et détresse psychologique, perte de valeurs des propriétés
C	Perturbation à la circulation routière, véhicules en panne, accessibilité réduite pour certains secteurs et pour les services d'urgence
D	Problèmes d'accessibilité, services critiques interrompus ou fortement perturbés, secteurs enclavés

Tableau B.6d. Liste non exhaustive d'éléments/critères à considérer afin d'établir les cotes de sensibilité et de capacité d'adaptation utilisées pour estimer la cote de vulnérabilité pour l'aléa inondation pluviale.

Variable	Liste de éléments/critères à considérer
Sensibilité	<ul style="list-style-type: none"> • Comment les éléments/infrastructures des différents secteurs se sont comportés par le passé face aux pluies extrêmes ? • Est-ce que le secteur a connu plusieurs inondations par le passé et, si oui, dans quelle mesure les pluies associées étaient 'extrêmes' ? • Existe-t-il des problèmes structurels connus (p. ex. sous-dimensionnement, points bas) ou suspectés pour ce secteur ? • Est-ce que les infrastructures en place (p. ex. le réseau de collecte des eaux pluviales) sont souvent à pleine capacité ? • Quel est âge du secteur et dans quel état de vétusté sont les bâtiments et les infrastructures qui s'y trouvent ? • Est-ce qu'il y a beaucoup de cuvettes, d'appartements au sous-sol, de configurations en contre-pente ou favorisant l'accumulation d'eau en certains points ? • Existe-t-il des systèmes stratégiques (p. ex. infrastructures, bâtiments municipaux, hôpitaux, services publiques) ou des communautés (p. ex. populations vulnérables, économiquement défavorisées) qui font en sorte que l'occurrence d'une inondation, même très improbable, aurait des conséquences catastrophiques ?
Capacité d'adaptation ¹	<ul style="list-style-type: none"> • Quel est le portrait socioéconomique et démographique des secteurs exposés ? • Quelle est la fraction de locataires/propriétaires ? • Dans quelle mesure les citoyens des secteurs exposés ont-ils les moyens financiers pour se préparer (p. ex. mise en place d'ouvrages de protection temporaire autour des maison), récupérer en cas de sinistre (p. ex. couverture d'assurances) et mettre en place certaines mesures d'adaptation (p. ex. imperméabilisation des bâtiments) ? • Est-ce que des travaux de réhabilitation de certaines infrastructures (p. ex. réseaux, rues, parcs) sont prévus à court ou moyen terme ? • Dans quelle mesure la configuration et le type d'occupation du secteur offre des options d'adaptation ? Lesquels ?

1. La capacité d'adaptation intègre également des considérations sur les capacités techniques et financières de la municipalité à s'adapter. Ces facteurs s'appliquent uniformément aux quatre secteurs considérés, mais pourront varier sensiblement entre municipalités, notamment entre petites et grandes municipalités.

Tableau B.6e Analyse de vulnérabilité détaillant les éléments exposés pour chacun des secteurs (voir Tableau B.6a) et les cotes de sensibilité, de capacité d'adaptation et de vulnérabilité qui leurs sont attribuées. Les valeurs et les échelles de vulnérabilité sont présentées au Tableau B.6f.

Secteur	Éléments exposés	Sensibilité	Capacité d'adaptation	Vulnérabilité
A	Maisons des rues AA entre numéros civiques A.1, A.2 ; bâtiments A.1, petit centre d'achat au sud du secteur ; maisons en rangée avec contre-pente sur la rue X	Modérée (2)	Modérée (2)	Modérée (4)
B	Appartements au sous-sol entre les numéros civiques B.1 à B7 sur les rues	Élevée (3)	Faible (3)	Élevée (9)

	BB ; clinique médicale et caserne de pompiers sur la rue Laflamme			
C	Intersection des boulevards CC et DD et sur la rue EE	Élevée (3)	Élevée (1)	Modérée (3)
D	Plusieurs bâtiments et infrastructures critiques (p. ex. hôpitaux, CHSLD) ou plusieurs populations vulnérables	Élevée (3)	Modérée (2)	Élevée (6)

1. Échelle de vulnérabilité : faible (1 à 2), modérée (3 à 5), élevée (6 à 9).

Tableau B.6f Matrice de vulnérabilité⁴.

		Sensibilité ^{1,3}		
		1. Faible	2. Modérée	3. Élevée
Capacité d'adaptation ^{2,3}	1. Élevée	1	2	3
	2. Modérée	2	4	6
	3. Faible	3	6	9

1. Échelle de sensibilité : faible (1), modérée (2), élevée (3)

2. Échelle de capacité d'adaptation : élevée (1), modérée (2), faible (3)

3. À noter que les échelles de sensibilité et de capacité d'adaptation sont inversées ; une faible valeur de sensibilité correspond à la valeur 1 alors qu'une faible capacité d'adaptation est associée à la valeur 3.

4. Échelle de vulnérabilité : faible (1-2 en vert), modérée (3-4 en jaune), élevée (6-9 en rouge).

Tableau B.6g. Échelle de vraisemblance en fonction des probabilités d'occurrence des pluies maximales annuelles de durée 1 heure et nombre moyen d'années d'occurrence de ces événements sur une période de 30 ans.

Cote de vraisemblance	Dénomination	Probabilité d'occurrence annuelle	Nombre moyen d'années d'occurrence pendant une période de 30 ans
1	Très peu fréquent ¹	$0.0 \leq p \leq 0.03$	$0 \leq N < 1$
2	Peu fréquent	$0.03 < p \leq 0.07$	$1 \leq N < 2$
3	Modérément fréquent	$0.07 < p \leq 0.15$	$2 \leq N < 5$
4	Fréquent	$0.15 < p \leq 0.3$	$5 \leq N \leq 10$
5	Très fréquent	$0.3 < p \leq 1$	$15 < N \leq 30$

1. La cote de vraisemblance 1 est définie en fonction des pluies maximales annuelles 1 heure de période de retour 25 ($p = 0.04$) ou 100 ans ($p = 0.01$). Ainsi des probabilités annuelles d'occurrence de 4% pour les secteurs A, B ou C, ou de 1% pour le secteur D, sont qualifiées de 'très peu fréquente'. Les cotes 2 à 5 correspondent à une augmentation progressive des probabilités d'occurrence de ces pluies.

Tableau B.6h. Analyse de risque pour les quatre secteurs retenus pour l'horizon 2041-2070 (V : Vraisemblance ; C : Conséquence ; R : Risque). La classification du risque, et le code de couleur correspondant, sont décrits à la Fiche B.3.

Secteur	Période de référence			SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
	V	C	R	V	C	R	V	C	R	V	C	R
A	1	3	3	2	3	6	3	3	9	5	3	15
B	1	4	4	2	4	8	3	4	12	5	4	20
C	1	2	2	2	2	4	3	2	6	5	2	10
D	1	5	5	1	5	5	2	5	10	3	5	15

Tableau B.6i. Analyse de risque pour les quatre secteurs retenus pour l'horizon 2071-2100 (V : Vraisemblance ; C : Conséquence ; R : Risque). La classification du risque, et le code de couleur correspondant, sont décrits à la Fiche B.3.

Secteur	Période de référence			SSP2-4.5			SSP3-7.0			SSP5-8.5		
	V	C	R	V	C	R	V	C	R	V	C	R
A	1	3	3	3	3	9	4	3	12	5	3	15
B	1	4	4	3	4	12	4	4	16	5	4	20
C	1	2	2	3	2	6	4	2	8	5	2	10
D	1	5	5	1	5	5	3	5	15	5	5	25

Tableau B.6j Types de mesures possibles, critères de pertinence et de faisabilité et secteurs possibles pour leurs mises en place¹

Types de mesures	Critères de pertinence et de faisabilité	Commentaires
Réfection, reconfiguration, réhabilitation de rues et de réseau ²	<ul style="list-style-type: none"> Parties de réseaux vétustes ou jugées problématiques Réaménagement planifié des rues et réfection du réseau Ajouts de rétention (bassin, conduites, etc.) Possibilités d'aménagements de zones de rétention temporaire (p. ex. parcs, terrain sportif, <i>water square</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> Mesures efficaces pour les pluies de moyennes et fortes intensités Caractérisation et diagnostic détaillés des réseaux en place essentiels Profiter au maximum des interventions planifiées pour maximiser l'adaptation Prévoir ouvrages de rétention et les zones de rétention temporaires conçus pour la gestion des pluies plus extrêmes Doit s'inscrire dans le plan de gestion des actifs
Contrôle à la source et infrastructures vertes	<ul style="list-style-type: none"> Apport important en eaux de ruissellement et potentiel de réduction ou de redirection des eaux de ruissellement vers des zones d'infiltration ou de stockage (p. ex. débranchement de gouttières ou redirection eaux de ruissellement vers des zones d'infiltration) Examen détaillé des secteurs afin d'identifier les sites possibles pour la mise en place d'un nombre significatif de ces mesures 	<ul style="list-style-type: none"> Mesures visant à réduire les apports d'eau au réseau Inclus les mesures de types débranchement de gouttières, infrastructures vertes (ou végétalisés) Efficace pour les pluies de faibles et moyennes intensités Enjeu d'acceptabilité sociale pour certaines de ces mesures Importance d'un engagement et évaluation des coûts pour assurer un entretien adéquat à long terme de ces ouvrages
Aménagement du territoire	<ul style="list-style-type: none"> Présence de nombreuses cuvettes et points bas² et possibilités de réduction ou redirection des eaux provenant des zones amont 	<ul style="list-style-type: none"> Mesures d'aménagements du territoire afin de réduire les apports d'eau au réseau (p. ex. déminéralisation, maintien des milieux humides, de parcs et

	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité de réduction des surfaces imperméables (p. ex. réduction de la largeur des rues, déminéralisation) 	<ul style="list-style-type: none"> • d'espace verts dans la trame urbaine) • Mesures s'inscrivant dans les plans d'urbanisme et de réaménagement de secteurs
Règlementation, fiscalité, gouvernance et financement	<ul style="list-style-type: none"> • Resserrement de la réglementation (p. ex. restriction présence d'appartements au sous-sol ou sur la construction et reconstruction dans certains secteurs) • Baliser les apports des nouveaux développements et de ceux en réhabilitation • Inciter (ou contraindre) les secteurs commerciaux, institutionnels et industriels à réduire leur 'empreinte pluviale' • Resserrement et application de la réglementation sur le contrôle des eaux de ruissellement provenant des chantiers de construction • Incitatif financier afin de favoriser l'adaptation (p. ex. aménagements de jardins de pluie, plantations d'arbre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les leviers réglementaires et fiscaux pour inciter les citoyens et les institutions à adopter des comportements ou mettre en place certaines mesures (réduction des surfaces imperméables, mises en place d'infrastructures vertes, imperméabilisation, etc.) • Enjeux majeurs d'acceptabilité sociale • Évaluation des impacts socioéconomiques de toute nouvelle réglementation • Envisager de nouvelles formes de partage des responsabilités et de gouvernances en matière de gestion des eaux pluviales
Prévention et mesures d'urgence	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les défaillances dans la prévention et les interventions passées et les améliorations possibles (p. ex. amélioration des communications entre services municipaux, avec les citoyens) • Sensibilisation des citoyens de certains secteurs afin qu'ils considèrent certaines options (p. ex. imperméabilisation bâtiments, débranchement gouttières, inspection clapet anti-refoulement, amélioration drainage des lots) 	<ul style="list-style-type: none"> • Enjeux majeurs de communications et de consultations avec les citoyens • S'informer auprès d'autres municipalités sur leur façon de faire dans des situations d'urgence • Prévoir des mécanismes d'entraides entre municipalités voisines • Maximiser la coordination avec les différentes instances gouvernementales et les services publiques (p. ex. ministère de la Sécurité Publique, Hydro-Québec)
Événements catastrophiques ⁴	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures visant à limiter les impacts si les capacités des ouvrages en place sont largement dépassées (où ira l'eau et comment on peut la rediriger vers des zones de moindre risque ?) 	<ul style="list-style-type: none"> • Considérer un seuil climatique très élevé associé à une inondation rare mais dont les conséquences seraient catastrophiques • Scénarisation des impacts d'un événement de pluie majeur ayant frappé une autre municipalité pour fin d'analyse

	<ul style="list-style-type: none"> • Planification des mesures d'urgence en cas de situation catastrophique (p. ex. accès aux zones les plus impactés par les services d'urgence) • Prévoir les modalités des processus d'évacuation des citoyens en cas d'urgence • Identification de sites où les citoyens évacués pourront se réfugier ou être relocalisés à court et moyen termes • Revoir et simplifier les processus d'aide et d'assistances financières post-événements 	<ul style="list-style-type: none"> • Portrait des inondations suite au passage d'un tel événement • Recensement des impacts (quartiers, rues affectés et population déplacée) • Liste des services essentiels perturbés (p. ex. panne électrique, incapacité des services d'urgence à intervenir) • Répertorier les possibles chaînes d'impacts, aussi appelés 'effets dominos' (p. ex. pluies torrentielles → surcharge des réseaux → déversement eaux usées en milieu récepteur → contamination des sources d'eau potable)⁵
--	--	--

1. La présente liste n'est pas exhaustive. Plusieurs documents peuvent être consultés à ce sujet. Pour plus de détails, le lecteur peut consulter Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. Mars 2017. 102 p. et annexes (<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/manuel-calcul-conception/index.htm>).
2. Les capacités des ouvrages devront être adaptées en fonction des majorations des pluies présentées au Tableau B.6b.
3. Une cartographie des cuvettes et points bas pourra s'avérer très utile où serait également indiquée les zones amont et les directions des écoulements de surface vers ces points.
4. Il s'agit ici d'examiner ce qui arriverait si un événement catastrophique hors norme frappait la municipalité et quelles mesures devraient être mises en place afin d'améliorer la gestion des risques dans une situation où les capacités des infrastructures, les ouvrages en place ou les seuils de tolérance sont largement dépassés. Cet exercice 'théorique' est essentiel dans un contexte où des événements sans précédents sont susceptibles de survenir dans un contexte de changements climatiques.
5. L'Annexe G de Ouranos et MELCCFP (2024) discute de cette question et donne divers exemples de chaînes d'impacts possibles pour différents aléas.

Tableau B.6k Liste des mesures retenues à l'échelle de la municipalité et pour les secteurs avec les livrables à produire et les indicateurs de performances retenues¹

Territoire	Mesures	Livrables et indicateurs de performances
Municipalité	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la coordination entre les différents services municipaux par la mise en place d'un 'Bureau de coordination de l'adaptation aux changements climatiques' (BCACC)² • Définir les rôles, pouvoirs et responsabilités du BCACC • Réviser la gouvernance municipale afin d'accorder les pouvoirs nécessaires au BCACC • Définir les mandats du BCACC (coordination des activités d'adaptation aux CC, élaboration et mise en place d'un plan d'adaptation, coordination entre services pour la mise en place des mesures, etc.) • Production d'un plan d'adaptation • Examiner des mesures réglementaires ou des incitatifs financiers (p. ex. incitatifs pour inspection des clapets anti-refoulements, 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse détaillée des inondations passées et diagnostic sur les causes des défaillances observées et les solutions envisageables • Plan d'adaptation aux changements climatiques • Informations et outils pertinents pour la mise en place du plan d'adaptation (p. ex. données météorologiques historiques, carte des cuvettes, données sur les infrastructures, cartes d'occupation du territoire)

	<p>restriction sur la présence d'appartements au sous-sol ou sur la construction et reconstruction dans certains secteurs)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Développer une stratégie de consultation et un programme de communication auprès des citoyens et des institutions 	<ul style="list-style-type: none"> • Indicateurs : respect des échéances dans les travaux du BCACC, niveau d'engagement des divers services dans l'adaptation aux CC
Secteur A	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs contre-pentes et portions de rues en cuvette problématiques : solutions locales afin de rediriger les eaux de ruissellement et de stocker temporairement les eaux en surface • Aménagement d'infrastructures vertes • Mise en place d'un programme d'inspection des clapets anti-refoulements et de sensibilisation sur les enjeux liés aux eaux pluviales (p. ex. vulnérabilités des sous-sols) 	<ul style="list-style-type: none"> • Liste des mesures retenues et plan détaillé de leur mise en place • Indicateurs de suivi de la mise en place des mesures (p. ex. nombre de maisons visitées) • Documenter les impacts de tous les épisodes de pluie, même des pluies mineures
Secteur B	<ul style="list-style-type: none"> • Intégrer dans le cadre de la réfection de certaines zones du secteur pour séparer le réseau combiné, augmenter la capacité des ouvrages et reconfigurer le ruissellement de surface • Profiter de tous les travaux de réfection ou d'aménagements afin d'y intégrer des mesures afin de réduire les surfaces imperméables (p. ex. réduction de la largeur des rues, déminéralisation) ou de réduire les apports au réseau (p. ex. stockage en surface ou souterrain) • Développer un plan d'intervention en cas de sinistre adapté à la réalité de ce secteur (p. ex. travailler en collaboration avec les organismes communautaires afin d'identifier les personnes ou familles les plus vulnérables) 	<ul style="list-style-type: none"> • Liste des mesures retenues et plan détaillé de leur mise en place • Indicateurs de suivi de la mise en place des mesures (p. ex. nombre de maisons visitées) • Documenter les impacts de tous les épisodes de pluie, même des pluies mineures
Secteur C	<ul style="list-style-type: none"> • Ajout d'ouvrage de rétention et augmentation de la capacité des collecteurs • Ajout d'un système de signalisation afin d'aviser les automobilistes qu'un tronçon de route est inondé • Adapter les plans d'intervention en situation d'urgence afin de rediriger les véhicules d'urgence en cas d'inondation de ces tronçons 	<ul style="list-style-type: none"> • Liste des mesures retenues et plan détaillé de leur mise en place • Indicateurs de suivi de la mise en place des mesures (p. ex. nombre de maisons visitées) • Documenter les impacts de tous les épisodes de pluie, même des pluies mineures
Secteur D	<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer l'étendue des zones exposées aux inondations • Développer un plan d'intervention et d'évacuation d'urgence pour ce secteur en cas d'inondation • Examiner si certains aménagements sont possibles afin de réduire les impacts 	<ul style="list-style-type: none"> • Déterminer l'étendue des zones exposées en cas d'inondation • Établir la liste des services inaccessibles • Documenter les chaînes d'impacts possibles dans le cas d'inondation de ce secteur

1. Cette liste est hypothétique.
2. Dans le cas d'une petite municipalité, ce rôle pourrait être assumé par un individu. Dans le cas de très petites municipalités, ce type de ressources pourrait être attribué par les gouvernements supérieures.

Notes :

1. Les mots et expressions suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire de la Fiche B.7.
2. Ouranos et MELCCFP (2024). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques – Guide pour les organismes municipaux. 138 pages.
3. Quatre cahiers de travail accompagnent le guide Ouranos et MELCCFP (2024) : Cahier 1 – Outil pour réaliser une appréciation des risques climatiques ; Cahier 2 – Outil pour réaliser une appréciation des risques climatiques (exemple fictif) ; Cahier 3 – Planification de la mise en œuvre des mesures ; Cahier 4 – Planification du suivi des mesures. Il est à noter que l'exemple de la fiche est différent de celui présenté dans le Cahier 2.
4. Mailhot A., Bolduc S., Talbot G. (2024). Outils d'analyse des risques aux infrastructures posés par les changements climatiques – Contribution INRS, Rapport de recherche, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, 126 p.
5. D'autres indices du même type sont aussi possibles. Le choix des indices dépend des configurations locales et doit être fixé après discussion avec les intervenants du milieu. Il demeure approximatif mais utile pour la démarche d'adaptation. Ainsi la durée effective de cette pluie de 40.2 mm aura des impacts majeurs, les impacts étant d'autant plus grands que sa durée est courte. La modélisation hydrologique/hydraulique du secteur (surface et réseaux d'égout) pourrait également être utilisée afin d'établir un lien entre l'évolution future des pluies extrêmes et les risques d'inondation. Toutefois la mise en place d'un tel modèle exige des ressources importantes qui ne sont pas à la portée de toutes les municipalités.
6. Le SSP5-8.5 peut être considéré pour certains ouvrages critiques ayant une durée de vie utile s'étendant jusqu'en 2100 et localisés dans des secteurs très vulnérables. Les majorations correspondantes seront toutefois très élevées.

Fiche technique B.7 – Glossaire

Le présent glossaire reprend globalement les définitions proposées dans Ouranos et MELCCFP (2024)¹ et dans GIEC (2021)². Certaines définitions ont toutefois été légèrement modifiées. Des définitions parfois différentes de certains de ces termes sont proposées dans la littérature^{2,3}.

Aléa : Phénomènes naturels ou résultant d'activités anthropiques pouvant causer des dommages, pertes de biens, d'infrastructures, de moyens de subsistance, de fourniture de services, d'écosystèmes et de ressources environnementales ou encore entraîner des pertes de vies humaines, des blessures ou d'autres impacts sur la santé. L'expression *aléa climatique* est également utilisée et réfère plus précisément aux aléas susceptibles d'être impactés par les changements climatiques. Ce terme inclut également des aléas naturels influencés par le climat, comme la présence de pollens allergènes ou de vecteurs de maladies. Un aléa peut se produire subitement (p. ex. pluies torrentielles) ou plus progressivement (p.ex. fonte du pergélisol).

Atténuation : Ensemble de mesures visant à limiter les changements climatiques et le réchauffement global et qui consiste principalement en mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et augmenter la captation du carbone atmosphérique.

Capacité d'adaptation : Prédilection d'un système ou d'une organisation à anticiper, se prémunir, résister, s'ajuster, se rétablir ou encore bénéficier des opportunités des impacts des changements climatiques. Ainsi définie, la capacité d'adaptation s'inscrit dans une perspective de planification à moyen et long termes.

Conséquence (ou impact) : Désigne les effets, sur les systèmes naturels et humains, des aléas, notamment des aléas climatiques. Les impacts font généralement référence aux effets sur la vie des personnes, les modes de subsistance, la santé, les écosystèmes, le patrimoine économique, social et culturel, les services et les infrastructures, des changements climatiques qui sont fonction de la sensibilité et de la capacité d'adaptation des systèmes exposés.

Exposition : État d'un système ou d'une composante d'un système (personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de fonctions, de ressources ou services environnementaux, d'éléments d'infrastructure ou de systèmes ou biens économiques, sociaux ou culturels) pouvant être affecté par un aléa.

Forçage radiatif : Variation du flux radiatif net de l'atmosphère terrestre (exprimé en W/m^2) résultant des variations des concentrations de gaz à effet de serre, des aérosols volcaniques ou de l'intensité du rayonnement solaire.

Horizon temporel : Périodes futures considérées dans le cadre d'une démarche d'adaptation et d'évaluation des risques climatiques. Les horizons temporels suivants sont recommandés : 2011-2040 pour le court terme, 2041-2070 pour le moyen terme et 2071-2100 pour le long terme.

Impact : voir *Conséquence*.

Indice climatique : Valeur qui définit et caractérise un aléa. Ainsi l'aléa 'vague de chaleur' peut être défini par l'indice suivant : nombre annuel d'événements où la température est au-dessus de 30°C durant 3 jours consécutifs. De même l'aléa 'pluie extrême' peut être défini comme une pluie de plus de 50 mm d'une heure ou moins.

Période de référence : Période passée servant de base de comparaison pour évaluer le changement climatique futur. Il est recommandé d'utiliser des périodes comportant minimalement 30 ans, p. ex.

1990-2019. Le choix de la période de référence peut être dicté par la disponibilité des données historiques.

Période de retour : Nombre moyen d'années entre deux occurrences consécutives d'un événement d'amplitude égale ou supérieure à une valeur donnée. Si p est la probabilité d'occurrence annuelle d'un aléa alors $1/p$ correspond à la période de retour. Ainsi un aléa avec $p = 0.01$ correspond à un aléa de période de retour 100 ans.

Projections climatiques : Simulation à partir de modèles climatiques de la réponse du système climatique terrestre à un scénario futur d'émissions ou de concentration de gaz à effet de serre et d'aérosols et à des changements d'affectation des terres.

Risque : Dans un contexte de changements climatiques, le risque décrit les impacts potentiels de ceux-ci pour un système exposé à un ou des aléas climatiques et peut également découler des réponses humaines aux changements climatiques notamment en matière d'adaptation. Dans le cadre d'une analyse de risques, le risque (R) repose sur la vraisemblance (V) d'un aléa ainsi que de ses conséquences (C) ou $R=V*C$.

Scénario d'émission : Évolution future plausible des émissions de gaz à effets de serre et aérosols reposant sur différentes hypothèses en terme de développement socioéconomique et démographique et d'avancées technologiques.

SSP (Shared Socioeconomic Pathways) : Ces scénarios des émissions et du forçage radiatif futur repose sur diverses hypothèses d'évolution future des conditions socioéconomiques et d'autres facteurs climatiques. Les SSP les plus communément utilisés sont les SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5. Ainsi le SSP5-8.5 correspond à un forçage radiatif qui atteint 8.5 W/m^2 en 2100. Le forçage radiatif, et donc les impacts des changements climatiques, augmente donc progressivement du SSP1-2.6 (faible émission) jusqu'au SSP5-8.5 (forte émission).

Sensibilité : Amplitude à laquelle un système est influencé, positivement ou négativement, par la variabilité du climat ou les changements climatiques. Les effets peuvent être directs (p. ex. la modification des rendements agricoles à la suite d'un changement dans la variabilité des températures) ou indirects (p. ex. les dommages causés par une augmentation de fréquence des inondations côtières en raison d'une élévation du niveau de la mer).

Seuil climatique : Seuil au-delà duquel un système devient exposé à un aléa et est susceptible de subir des dysfonctionnements, des dépassements de capacité ou des impacts de diverses natures. Ainsi, pour une infrastructure, le seuil climatique peut correspondre à la valeur de l'indicateur climatique au-delà duquel la capacité de l'ouvrage est dépassée. En matière de santé publique, il peut s'agir d'un seuil, p. ex. une température moyenne sur un certain nombre de jours, à partir duquel les responsables de la santé publique estiment que le taux de morbidité devient préoccupant. Plusieurs seuils climatiques peuvent être considérés dans certains cas afin de mieux représenter la gradation progressive des conséquences et des risques en fonction de l'ampleur de l'aléa.

Système : Désigne une entité, que ce soit une région, une collectivité, un foyer, un secteur économique, une activité commerciale, une population, un écosystème, une infrastructure, etc., susceptible d'être impactée par un ou des aléas climatiques selon son niveau d'exposition, sa sensibilité et sa capacité d'adaptation.

Vague de chaleur : Période où la température dépasse certains seuils jugés critiques qui peuvent avoir des impacts et être dommageable à la santé des populations. La définition de vague de chaleur utilisée dans Ouranos et MELCCFP (2024) est le nombre annuel d'événements où la température maximale quotidienne est au-dessus de 30°C durant 3 jours consécutifs ou plus.

Vraisemblance : Dans un contexte de changements climatiques, la vraisemblance se rapporte à la plus ou moins grande plausibilité d'un aléa. Elle peut être exprimée de manière qualitative ou quantitative selon les informations disponibles. Dans un cadre plus quantitatif, la vraisemblance est définie comme la probabilité d'occurrence d'un aléa donné. Elle peut s'exprimer sous la forme d'une probabilité annuelle d'occurrence ou encore sous la forme d'une période de retour. On utilise également le terme récurrence. Ainsi on dit d'un événement de période de retour 50 ans, qu'il est de récurrence 1 fois en 50 ans.

Vulnérabilité : Propension ou prédisposition d'un système à être affecté négativement. Elle est fonction de la sensibilité du système exposé aux aléas climatiques et de sa capacité ou son incapacité à s'adapter aux changements climatiques.

1. Ouranos et MELCCFP (2024). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide pour les organismes municipaux, 138 pages.
2. GIEC (2021). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Annexe VII: Glossaire. (https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Glossary_French.pdf).
1. ISO (2021). Adaptation au changement climatique – Lignes directrices sur la vulnérabilité, les impacts et l'évaluation des risques. Norme Internationale, ISO 14091, 45 p.

Module C – Hydrologie fluviale et urbaine et changements climatiques

Fiche technique C.1 - Crues, inondations et changements climatiques : portrait global

Les changements climatiques entraîneront des variations parfois importantes de plusieurs variables météorologiques cruciales en hydrologie. Ces variations auront des conséquences majeures sur les inondations, qu'elles soient fluviales, pluviales, côtières ou encore dues aux débâcles et embâcles. Ainsi, il paraît clair que la hausse des pluies intenses en été et en automne mènera à des inondations pluviales en milieu urbain plus fréquentes et importantes en raison de l'incapacité des réseaux actuels à évacuer ces importants volumes d'eau (voir la fiche technique C.3). La situation est cependant plus complexe pour les inondations fluviales et la submersion en milieu côtier, où plusieurs facteurs entrent en jeu¹. Les fiches du module C s'intéressent plus spécifiquement aux inondations fluviales et pluviales.

Les plus grandes crues annuelles surviennent généralement au printemps sur les grands bassins versants au Québec et au Canada. L'ampleur de ces crues printanières est fonction du stock de neige accumulé pendant l'hiver, de la vitesse de fonte de ce stock de neige et de l'occurrence d'épisodes de pluie sur neige au cours de la période de fonte. Or, les projections actuelles indiquent une hausse des précipitations totales pendant la saison hivernale accompagnée d'une augmentation marquée des températures pendant cette même saison. Cette hausse des températures signifie que les épisodes de fonte et de pluies seront plus fréquents en hiver. L'impact sur le stock de neige disponible au moment de la fonte est donc très incertain, puisqu'une partie des précipitations hivernales supplémentaires pourrait être sous forme liquide. De même, une augmentation des températures moyennes pourrait se traduire par des épisodes de pluie sur neige plus fréquents et plus intenses au printemps. L'impact cumulatif de ces facteurs sur les crues printanières est donc très incertain et dépendra de la situation géographique des bassins versants, de leur altitude, de leur superficie et de certaines de leurs caractéristiques physiographiques. Ainsi, il est vraisemblable que les crues printanières des bassins situés plus au nord augmenteront à cause d'une augmentation du stock de neige disponible pour la fonte, alors que la situation inverse pourra survenir pour des bassins versants situés plus au sud où l'alternance de période d'accumulation de neige et de redoux entraînera une diminution du stock de neige au printemps. Dans tous les cas, la crue printanière sera plus hâtive.

Une intensification des pluies estivales et automnales aura des impacts majeurs sur les crues, particulièrement pour les petits bassins versants où les pluies intenses peuvent s'abattre sur l'ensemble du bassin et où les temps de concentration sont plus courts. Les crues les plus extrêmes seront les plus impactées, parce que les pluies seront elles aussi plus extrêmes et généreront des volumes de ruissellement plus importants. L'effet pour les bassins versants de plus grandes superficies demeure plus incertain et sera fonction de l'évolution future des conditions antérieures d'humidité.

En résumé, les impacts des changements climatiques sur le régime de crues dépendent de nombreux facteurs dont plusieurs sont encore mal ou incomplètement représentés par les modèles. Globalement, on pourrait assister à une augmentation de l'occurrence des crues maximales annuelles en été/automne au détriment des crues printanières dans plusieurs petits bassins versants situés plus au sud. De même, les crues les plus importantes risquent d'être les plus impactées par les changements climatiques. Ces crues seront plus soudaines et associées à des systèmes convectifs ou des tempêtes extratropicales qui terminent leur parcours au Canada. Enfin, il est primordial de réaliser que le devenir des crues dépend aussi de façon majeure de l'évolution future de l'occupation du territoire sur ces bassins.

1. Les constats de la présente fiche sont tirés de l'Atlas hydroclimatique du Québec (voir fiche technique C.2) et de Sharma A, Hettiarachchi S, Wasko C. (2021). Estimating design hydrologic extremes in a warming climate: alternatives, uncertainties and the way forward. *Phil. Trans. R. Soc. A* 379: 20190623. DOI : 10.1098/rsta.2019.0623

Fiche technique C.2 - Atlas hydroclimatique du Québec¹

L'Atlas hydroclimatique du Québec, développé par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP), est un outil décrivant le régime hydrique des rivières en climat actuel et futur. La plus récente version de l'Atlas, mise en ligne en 2022, couvre la partie méridionale du Québec et donne également accès aux données historiques de débits de 307 stations hydrométriques déployées sur ce territoire (Figure C.2).

L'Atlas hydroclimatique permet d'explorer le devenir hydrologique des bassins versants du Québec méridional dans un contexte de changements climatiques. Les simulations de plusieurs modèles climatiques ont été utilisées comme données d'entrée d'un modèle hydrologique. Un total de 76 indicateurs hydrologiques sur les crues, les étiages et les débits moyens saisonniers et annuels ont ainsi été simulés sur les tronçons des bassins versants du Québec méridional.

Les indicateurs hydrologiques sont évalués pour quatre périodes de 30 ans, l'une en climat passé, 1981–2010, utilisée comme période de référence, et trois en climat futur, 2011–2040, 2041–2070, 2071–2100. Les variations des indicateurs entre périodes future et de référence sont aussi estimées selon deux scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre.

Un niveau de confiance sur les conclusions générales tirées de ces analyses est attribué, basé sur un jugement d'expert. Un **niveau de confiance élevé** est attribué lorsque l'on estime les processus clés en jeu adéquatement modélisés. Un **niveau de confiance modéré** est attribué lorsque les conclusions à grande échelle pourraient être différentes à l'échelle locale ou qu'une amélioration de la modélisation puisse conduire à des résultats légèrement différents. Ces conclusions demeurent toutefois suffisamment solides et pertinentes pour être diffusées et être utilisées dans un contexte d'adaptation.

Les principales conclusions de l'Atlas au sujet des indicateurs de crues sont les suivantes² : 1) les crues printanières seront plus hâtives [confiance élevée] ; 2) les débits de pointe des crues printanières des bassins versants situés au nord augmenteront [confiance modérée] ; 3) les débits de pointe des crues printanières pour les bassins situés au sud diminueront pour les récurrences de 2 et 5 ans et augmenteront pour les récurrences de 100 ans et plus [confiance modérée] ; 4) les débits de pointe des crues d'été-automne augmenteront [confiance modérée] ; 5) le volume des crues printanières diminuera pour les bassins situés au sud [confiance modérée].

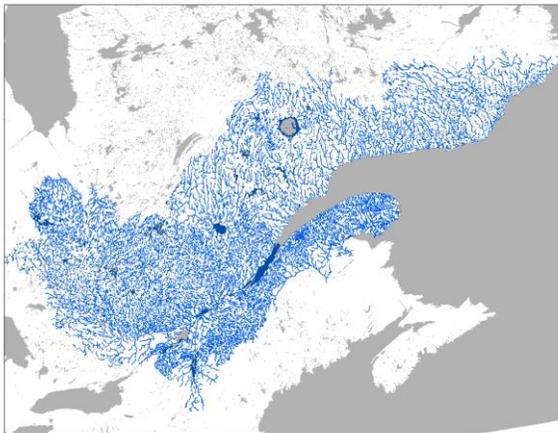


Figure C.2 Réseau hydrographique considéré dans l'Atlas hydroclimatique

5. Les informations de cette fiche technique sont tirées de : Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 2022. Rapport technique de l'Atlas hydroclimatique (www.cehq.gouv.gc.ca/atlas-hydroclimatique/rapport-atlas-hydroclimatique-2022.pdf)
6. Le lecteur est invité à consulter le rapport technique de l'Atlas pour connaître les conclusions au sujet des indicateurs sur les étiages et l'hydraulicité.

Fiche technique C.3 - Gestion des eaux pluviales et changements climatiques

Les pluies extrêmes seront fortement affectées par les changements climatiques (voir Fiche A.3 pour une définition des pluies extrêmes). Considérant que plusieurs infrastructures et ouvrages hydrauliques actuellement en place ont été dimensionnés en fonction des intensités des pluies extrêmes historiques, une modification de l'intensité et de la fréquence des pluies aura des conséquences majeures, notamment pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain.

Bien que l'amplitude des variations projetées demeure incertaine et variable selon les modèles climatiques, le signal vers une intensification des pluies extrêmes fait consensus¹. Cette intensification sera vraisemblablement d'autant plus importante que l'événement de pluie sera de courte durée et plus extrême. On assistera donc à une augmentation de la fréquence et de l'intensité de pluies extrêmes, de même qu'à l'occurrence d'événements pluvieux sans précédents. Les dépassements des capacités des ouvrages en place seront plus fréquents et entraîneront des conséquences majeures. Plusieurs événements pluvieux ayant frappés des territoires urbains au cours des dernières années en sont l'illustration.

Il est donc essentiel de mettre en place des mesures afin de réduire le risque associé à ce type d'aléa en milieu urbain^{2,3}. Celles-ci peuvent avoir pour objectif de : 1) convertir les surfaces imperméables en surfaces perméables (p. ex. pavés perméables); 2) rediriger les eaux de ruissellement de surfaces imperméables vers des aménagements favorisant leur infiltration ou leur stockage temporaire (p. ex. infrastructures vertes); 3) de revoir les critères de conception de certains ouvrages tels les réseaux, les bassins et les ponceaux afin d'augmenter leur capacité. Ces mesures doivent cependant faire l'objet d'une mise en place à grande échelle pour être efficaces, ce qui ne peut se faire qu'au fil de la réhabilitation des réseaux et des secteurs urbains. Elles amélioreront la résilience face aux pluies de faibles intensités ou d'intensités modérées, mais leur efficacité sera limitée face aux pluies extrêmes qui satureront les sols, entraîneront des accumulations d'eau, des refoulements de réseaux et inonderont certains secteurs.

D'autres mesures doivent être envisagées pour les pluies les plus extrêmes. Il est aussi important de réfléchir à ce qui se passera lorsque la capacité des ouvrages sera dépassée et de s'interroger sur les parcours que ces eaux excédentaires emprunteront afin de mettre en place des mesures adaptées à ces situations exceptionnelles. Un exemple est d'utiliser des espaces publics stratégiquement placés sur le territoire où ces eaux excédentaires ruisselleront et pourront être stockées temporairement. Elles pourront ensuite être infiltrées ou redirigées vers le réseau. La place multifonctionnelle inondable (*water square* en anglais) de la Place des Fleurs de Macadam à Montréal est un exemple de tel aménagement (Figure C.3). Il s'agit d'un espace public inondable qui recueille les eaux de ruissellement lors d'événements de pluie majeure. En absence de précipitations, ce lieu public aménagé est accessible aux citoyens.



Figure C.3 – Place multifonctionnelle inondable (*water square*) de la Place des Fleurs de Macadam à Montréal (image tirée du site de la ville de Montréal).

1. Bush E., Lemmen D.S. (2019). Rapport sur le climat changeant du Canada, gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 2019, 446 p. (www.Climatenchangement.ca/RCCC2019)
2. Ouranos et MELCCFP (2024). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques – Guide pour les organismes municipaux. 138 pages.
3. MELCCFP (2024) Guide de gestion des débordements et des dérivations d'eaux usées – Tome 1 – Connaissance de base, Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs, 240 p.

ANNEXE B - Modèles et simulations de l'ensemble CMIP6 sélectionnés

Tableau B.1 - Liste et caractéristiques des simulations de l'ensemble CMIP6 utilisées dans le cadre de l'étude⁵

CMIP6 Model ID	Institut et pays d'origine	Historique	SSP 4.5	SSP 7.0	SSP 8.5	Humidité relative disponible	Résolution spatiale (°lat x °lon)	Résolution spatiale (km) ⁶¹
ACCESS-CM2	CSIRO-BOM, Australie	1	1	1	1	X	1.25 x 1.9	140 x 160
ACCESS-ESM1-5	CSIRO-BOM, Australie	1	0	0	1	X	1.25 x 1.9	140 x 160
BCC-CSM2-MR	BCC, CMA, Chine	1	1	1	1	-	1.1 x 1.1	120 x 95
CAMS-CSM1-0	CAMS, Chine	1	1	1	1	-	1.1 x 1.1	120 x 95
CESM2	NCAR, États-Unis	1	1	1	1	-	0.94 x 1.25	105 x 105
CESM2-WACCM	NCAR, États-Unis	1	1	1	1	X	0.94 x 1.25	105 x 105
CMCC-CM2-SR5	CMCC, Italie	1	1	1	1	X	0.94 x 1.25	105 x 105
CMCC-ESM2	CMCC, Italie	1	1	1	1	X	0.94 x 1.25	105 x 105
CNRM-CM6-1	CNRM-CERFACS, France	1	1	1	1	X	1.4 x 1.4	155 x 120
CNRM-CM6-1-HR	CNRM-CERFACS, France	1	0	0	1	X	0.5 x 0.5	55 x 45
CNRM-ESM2-1	CNRM-CERFACS, France	1	1	1	1	X	1.4 x 1.4	155 x 120
CanESM5	CCCMA, Canada	1	1	1	1	X	2.8 x 2.8	310 x 240
EC-Earth3	EC-EARTH, Europe	1	1	1	1	X	0.7 x 0.7	80 x 60
EC-Earth3-AerChem	EC-EARTH, Europe	1	0	1	0	X	0.7 x 0.7	80 x 60
EC-Earth3-CC	EC-EARTH, Europe	1	1	0	1	X	0.7 x 0.7	80x 60
EC-Earth3-Veg	EC-EARTH, Europe	1	1	1	1	X	0.7 x 0.7	80 x 60
EC-Earth3-Veg-LR	EC-EARTH, Europe	1	1	1	1	X	1.1 x 1.1	120 x 95
FGOALS-g3	LASG, Chine	1	1	1	0	X	2.25 x 2	250 x 170
GFDL-CM4	NOAA, GFDL, États-Unis	1	1	0	1	X	1 x 1.25	120 x 105
GFDL-ESM4	NOAA, GFDL, États-Unis	1	1	1	1	X	1 x 1.25	120 x 105
HadGEM3-GC31-LL	MOHC, UK	1	1	0	1	X	1.25 x 1.9	140 x 160
HadGEM3-GC31-MM	MOHC, UK	1	0	0	1	X	0.56 x 0.83	60 x 70

⁵ Source des données : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=form>.

⁶ Approximé à 5 km près pour une latitude de 40°N.

CMIP6 Model ID	Institut et pays d'origine	Historique	SSP 4.5	SSP 7.0	SSP 8.5	Humidité relative disponible	Résolution spatiale (°lat x °lon)	Résolution spatiale (km) ⁶¹
IITM-ESM	IITM ESM, Inde	1	1	1	1	X	1.9 x 1.9	210 x 160
INM-CM4-8	INMRAS, Russie	1	1	1	1	-	1.5 x 2	165 x 170
INM-CM5-0	INMRAS, Russie	1	1	1	1	-	1.5 x 2	165 x 170
IPSL-CM5A2-INCA	IPSL, France	1	0	1	0	X	1.9 x 3.75	210 x 320
IPSL-CM6A-LR	IPSL, France	1	1	1	1	X	1.3 x 2.5	145 x 210
KACE-1-0-G	Corée du Sud	1	1	1	1	X	1.25 x 1.9	140 x 160
KIOST-ESM	Corée du Sud	1	1	0	1	X	1.9 x 1.9	210 x 160
MIROC-ES2L	JAMSTEC, Japon	1	1	1	1	-	2.8 x 2.8	310 x 240
MIROC6	JAMSTEC, Japon	1	1	1	1	-	1.4 x 1.4	155 x 120
MPI-ESM1-2-HR	MPI-N, Allemagne	1	1	1	1	X	0.94 x 0.94	105 x 80
MPI-ESM1-2-LR	MPI-N, Allemagne	1	1	1	1	X	1.9 x 1.9	210 x 160
MRI-ESM2-0	MRI, Japon	1	1	1	1	X	1.1 x 1.1	120 x 95
NESM3	NUIST, Chine	1	1	0	1	-	1.9 x 1.9	210 x 160
NorESM2-LM	NCC, Norvège	1	1	1	1	X	1.9 x 2.5	210 x 210
NorESM2-MM	NCC, Norvège	1	1	1	1	X	0.94 x 1.25	105 x 105
TaiESM1	RCEC-AS, Taïwan	1	1	0	1	X	0.94 x 1.25	105 x 105
UKESM1-0-LL	MOHC, UK	1	1	1	1	X	1.25 x 1.9	140 x 160
Total	--	39	34	30	36	--	--	--