CHANGEMENT CLIMATIQUE ET COURBES IDF (INTENSITÉ, DURÉE, FRÉQUENCE): VUE D'ENSEMBLE DE LA SCIENCE ET LIGNES DIRECTRICES POUR L'ADAPTATION

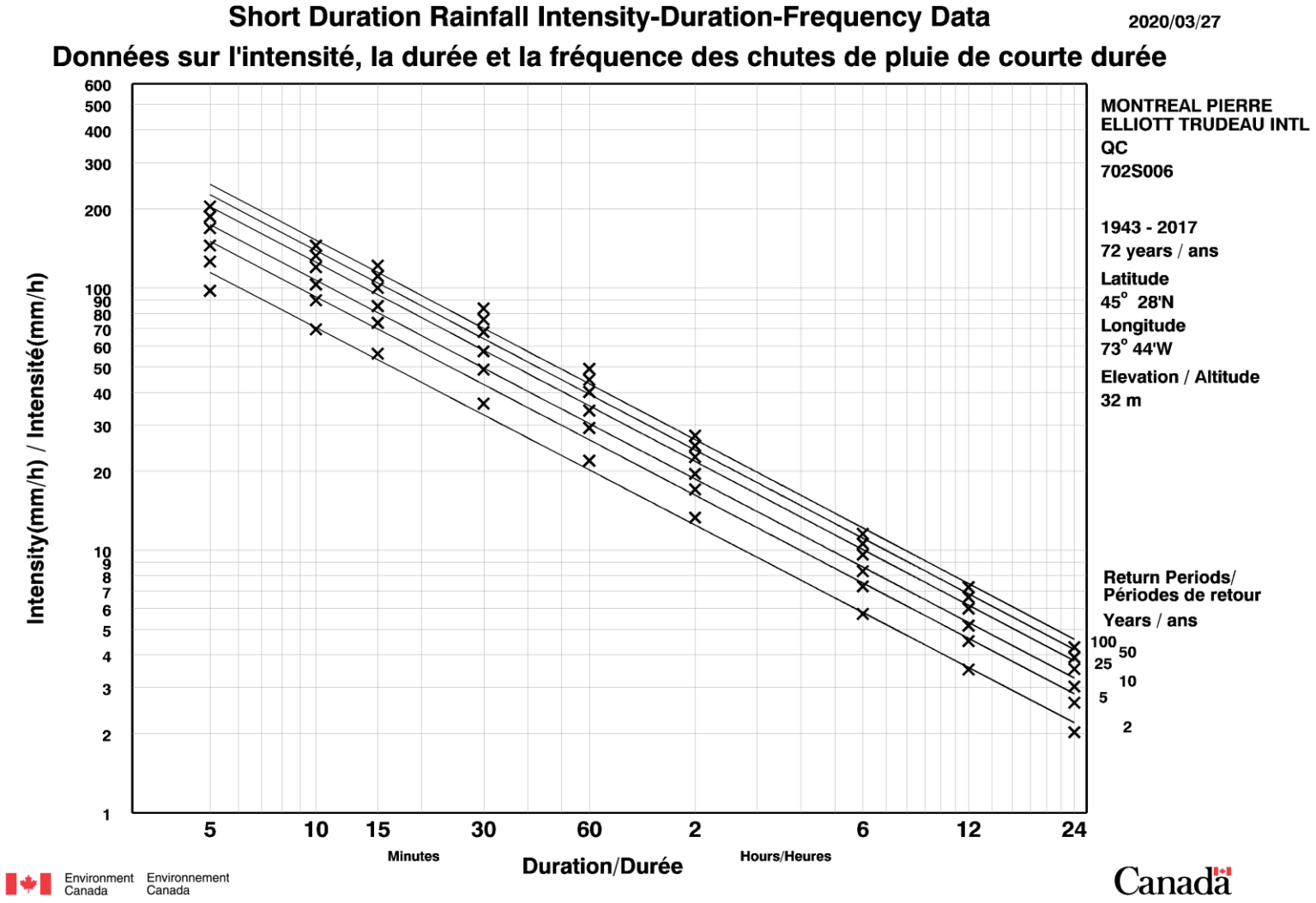
Jean-Luc Martel[1], François P. Brissette[1], Philippe Lucas-Picher[2], Magali Troin[1,3] & Richard Arsenault[1]
[1] École de technologie supérieure (ÉTS) – Laboratoire de recherche Hydrologie, climat et changements climatiques (HC[3])
[2] Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat (GMGEC), Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)
[3] HydroClimat

Association des ingénieurs municipaux du Québec

ÉTS
Le génie pour l'industrie

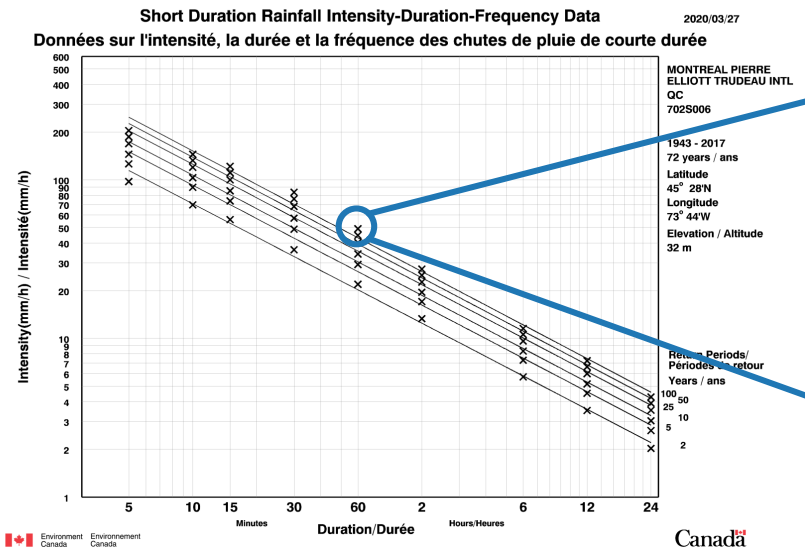
HC3
Groupe de recherche
Hydrologie
Climat
Changements climatiques

LES COURBES INTENSITÉ-DURÉE-FRÉQUENCE (IDF)

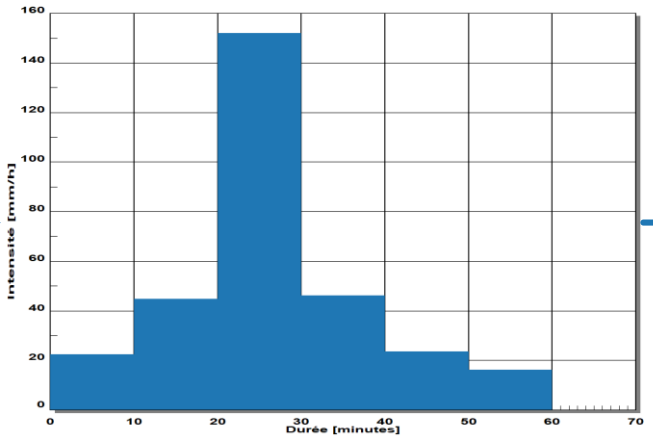


LES COURBES INTENSITÉ-DURÉE-FRÉQUENCE (IDF)

Courbes IDF



Hyétogramme (p. ex. pluie Chicago)



PCSWMM

Méthode rationnelle:

$$Q_p = \frac{1}{360} \cdot C \cdot i \cdot A$$

où:

- Q_p : débit de pointe (m^3/s)
- A : aire du bassin (ha)
- i : intensité de précipitation (mm/h)
- C : coefficient de ruissellement (0 à 1)

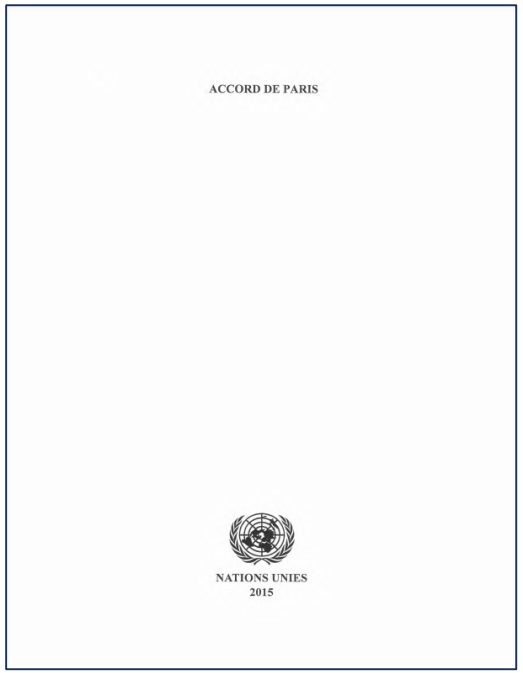
Conception:

- Débit de pointe
- Volume de ruissellement
- etc.

LES COURBES INTENSITÉ-DURÉE-FRÉQUENCE (IDF)

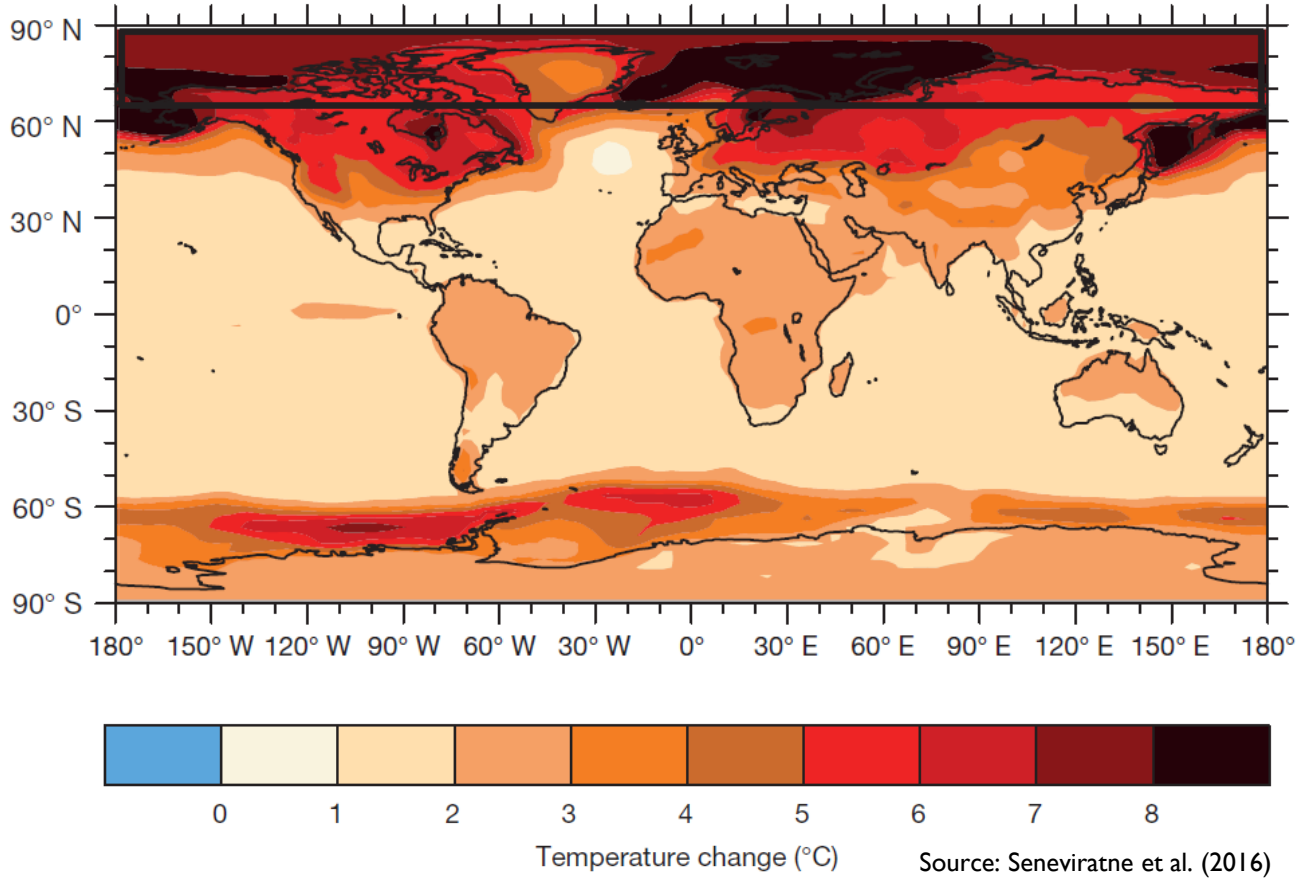
POURQUOI LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SONT IMPORTANTS?

COP21 · CMP11
PARIS 2015
UN CLIMATE CHANGE CONFERENCE



« L'**accord de Paris** définit un cadre mondial visant à éviter un changement climatique dangereux en limitant le réchauffement de la planète à un niveau nettement **inférieur à 2 °C** et en poursuivant les efforts pour **le limiter à 1.5 °C**. »

Augmentation de 2 °C:

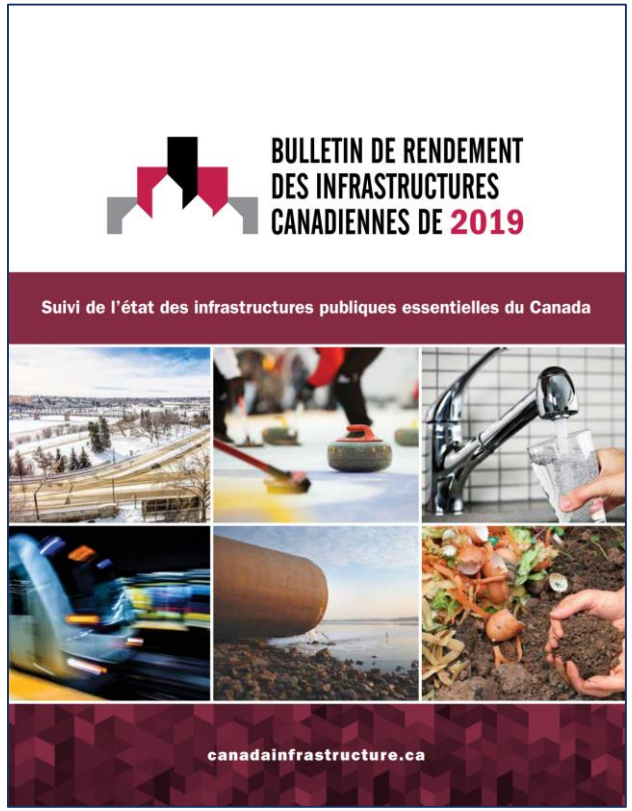


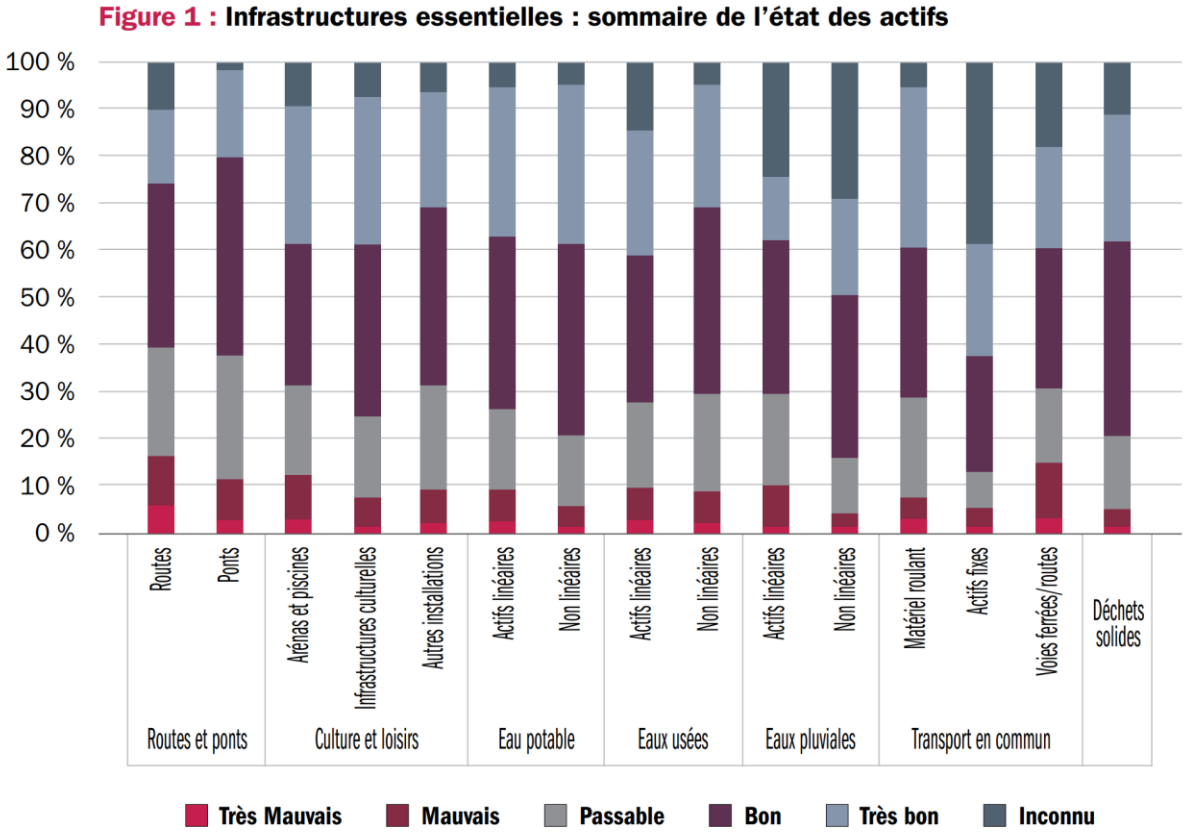
Source: Seneviratne et al. (2016)

Relation de Clausius-Clapeyron:

↑ 1 °C ≈ ↑ 7 % vapeur d'eau

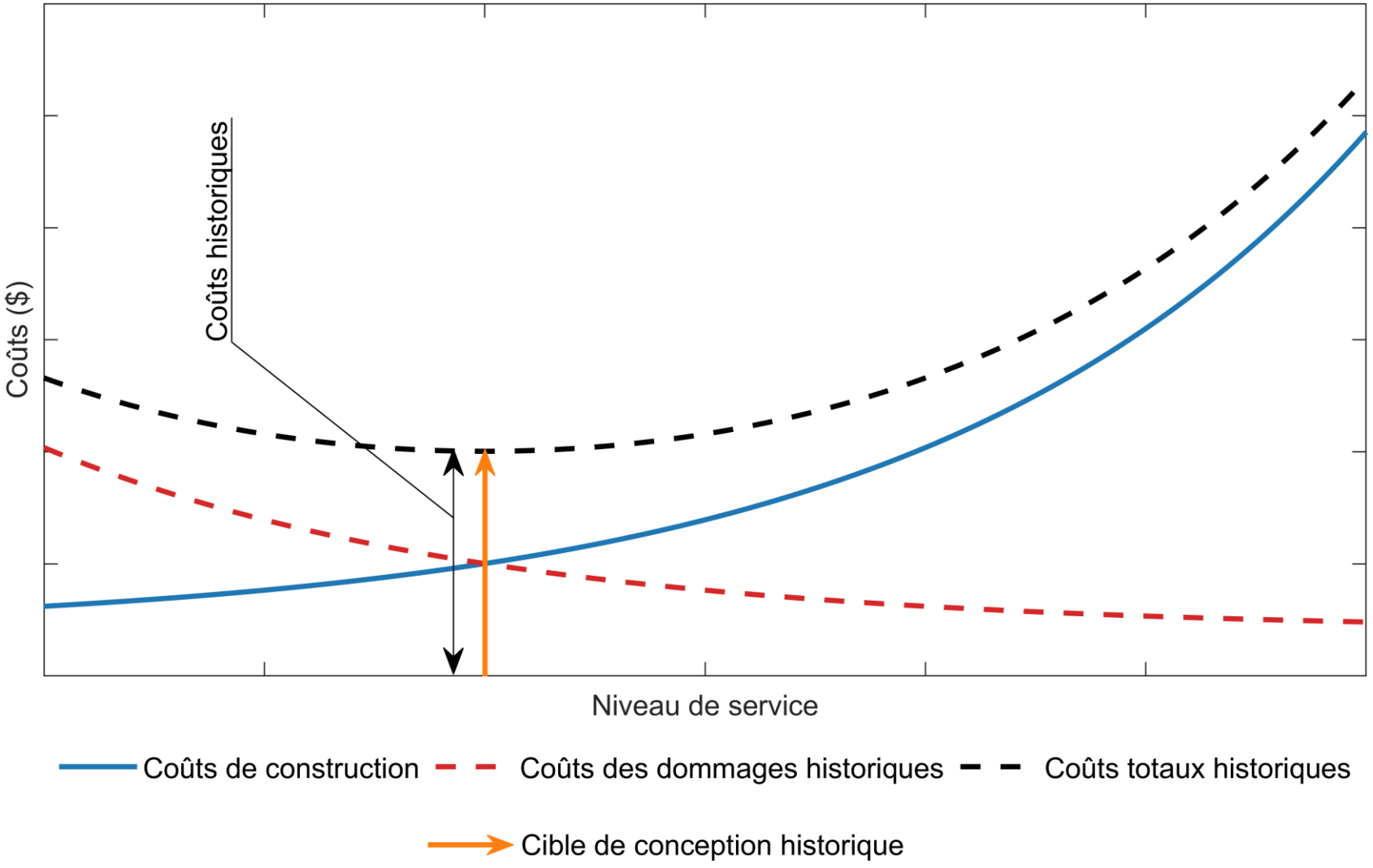
POURQUOI LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SONT IMPORTANTS?



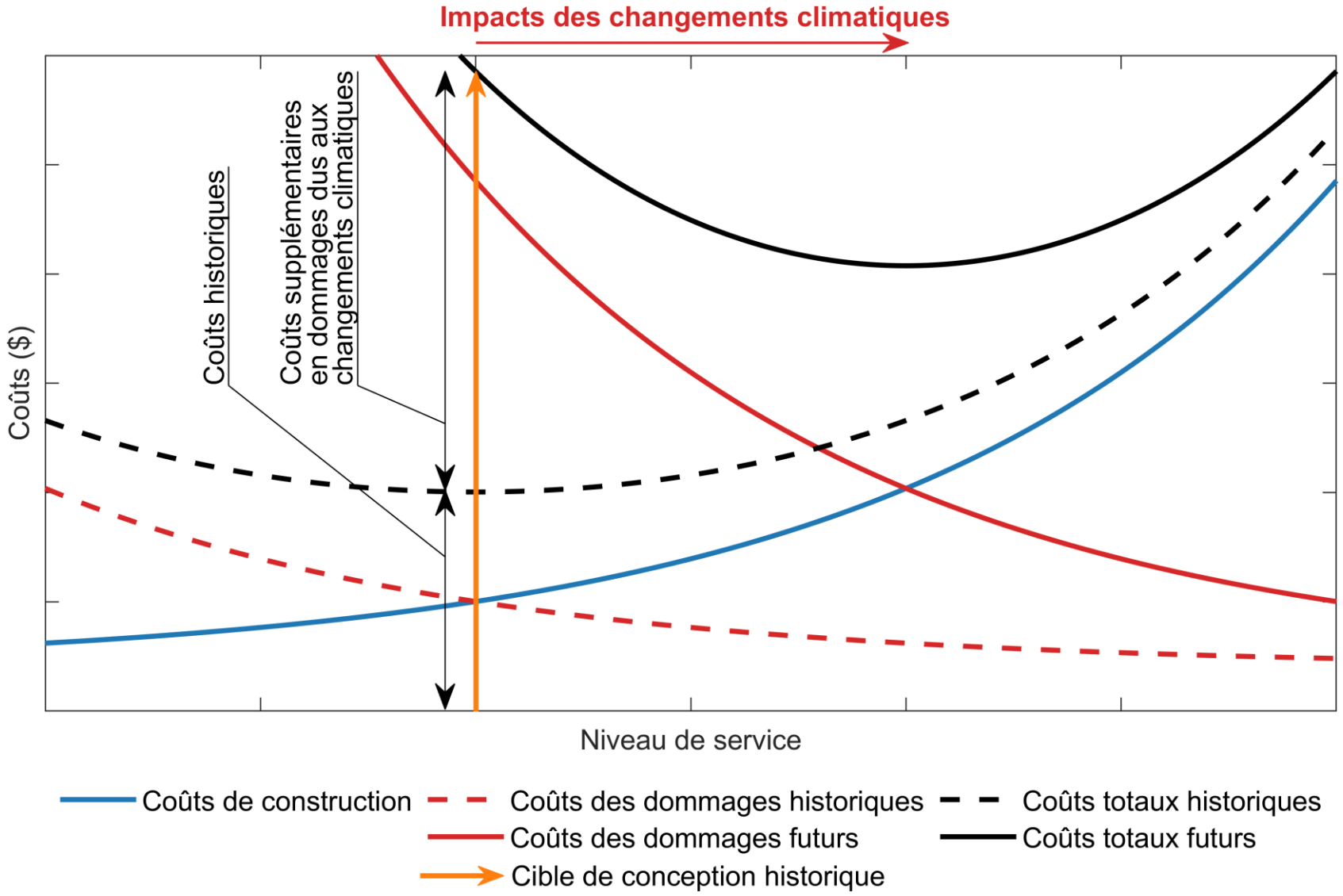


- ~30% des infrastructures sont dans un état **très mauvais**, **mauvais** ou **passable**, et sont dues pour être remplacées dans le court terme.
- Les infrastructures de remplacement sont typiquement conçues pour durer **~75 à 100 ans**.

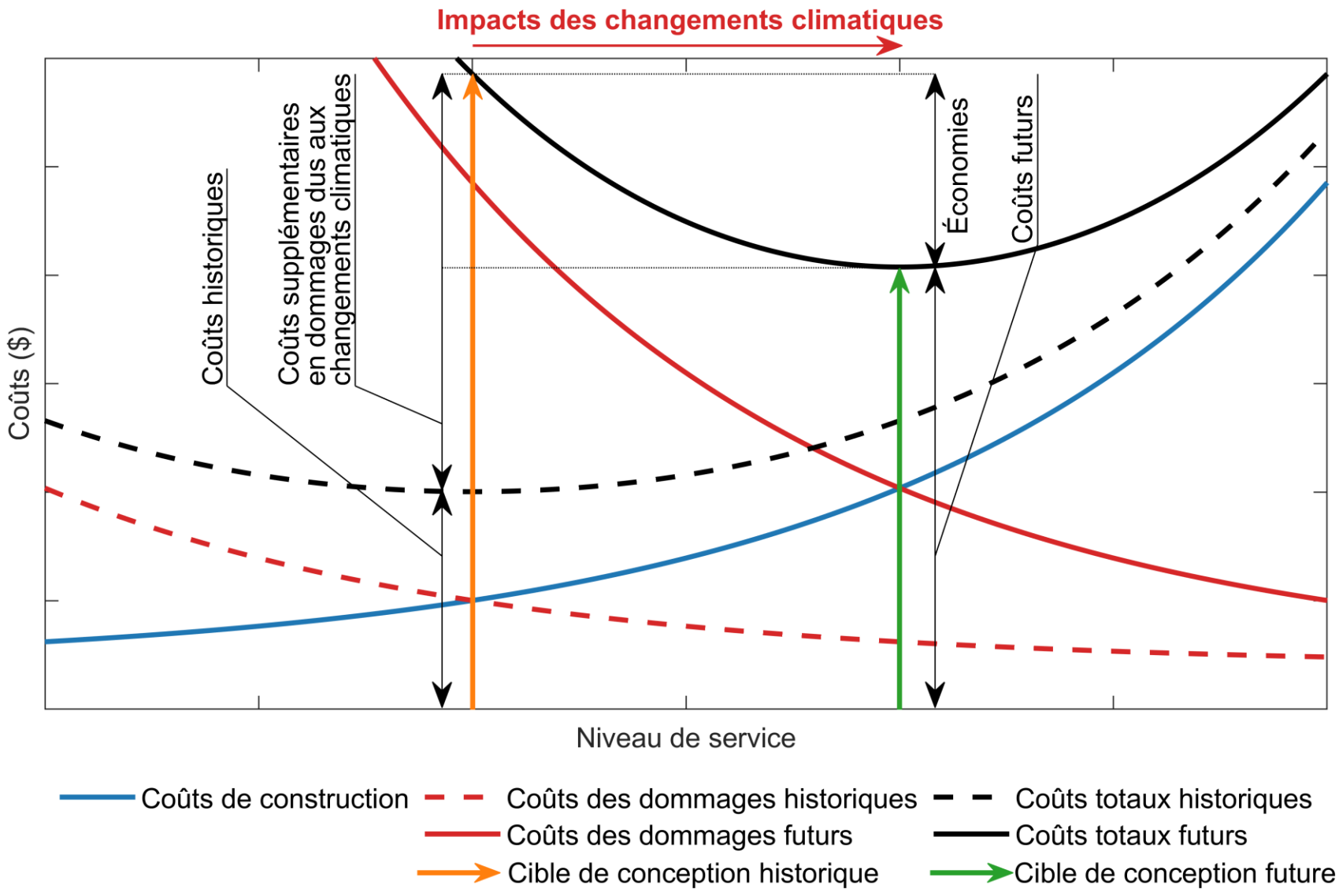
LE COMPROMIS DANS LA CONCEPTION DES INFRASTRUCTURES



LE COMPROMIS DANS LA CONCEPTION DES INFRASTRUCTURES

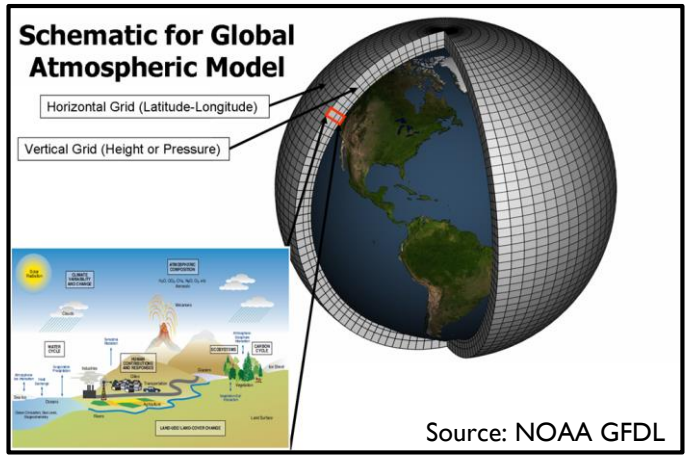


LE COMPROMIS DANS LA CONCEPTION DES INFRASTRUCTURES

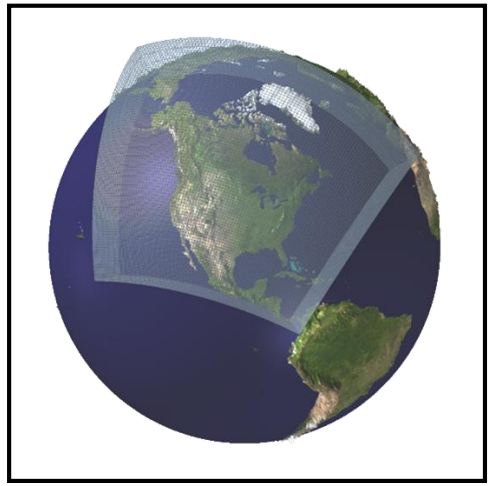


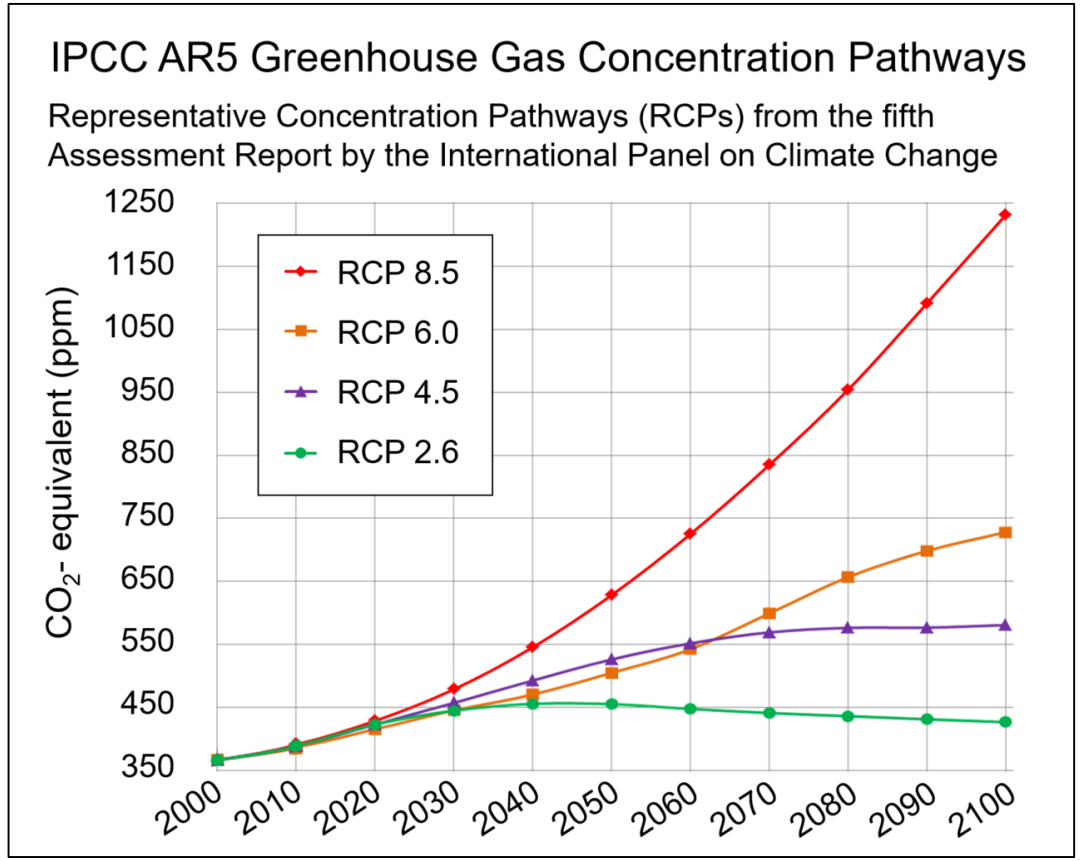
COMMENT EST-CE QU'ON ÉTUDIE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES?

Modèles globaux du climat (GCM)



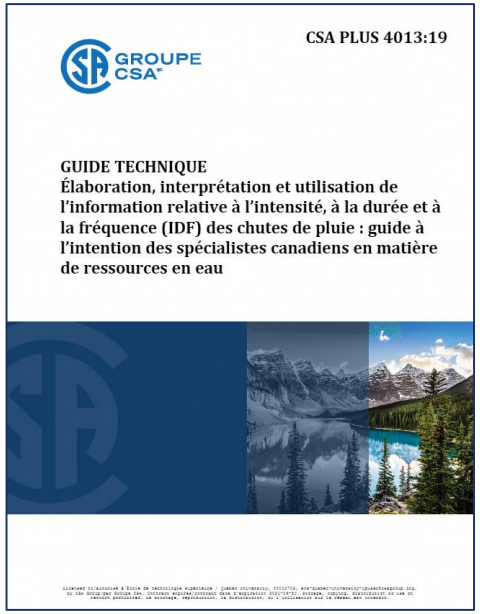
Modèles régionaux du climat (RCM) &
Modèles permettant la convection (CPM)





LIGNES DIRECTRICES ACTUELLEMENT UTILISÉES POUR LES COURBES IDF

- Augmentation simple en pourcentage constant (**p. ex.: Québec/MELCC: 18% > 2 ans**)
- Augmentation adaptative en pourcentage (p. ex.: UK: 10%, 20% et 40% pour 2040, 2070, 2115 respectivement)
- Augmentation en fonction de la relation de Clausius-Clapeyron (**p. ex.: norme CSA, 2019**):


CSA PLUS 4013:19

GROUPE CSA

GUIDE TECHNIQUE
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

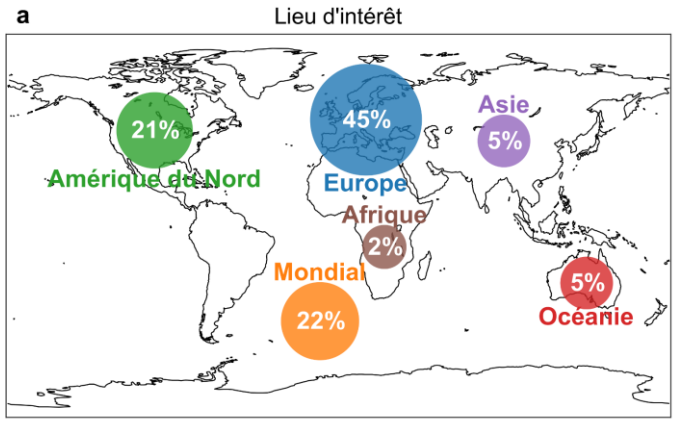
$$I_{fut} = I_{ref} \times \left[\frac{100 + R_{sc}}{100}\right]^{\Delta T}$$

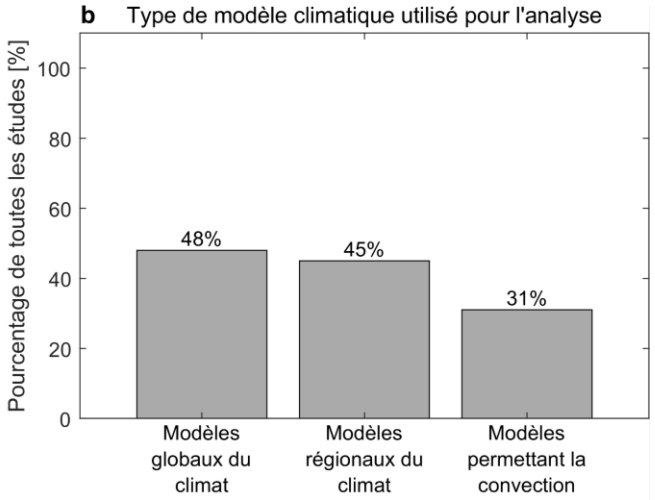
où:

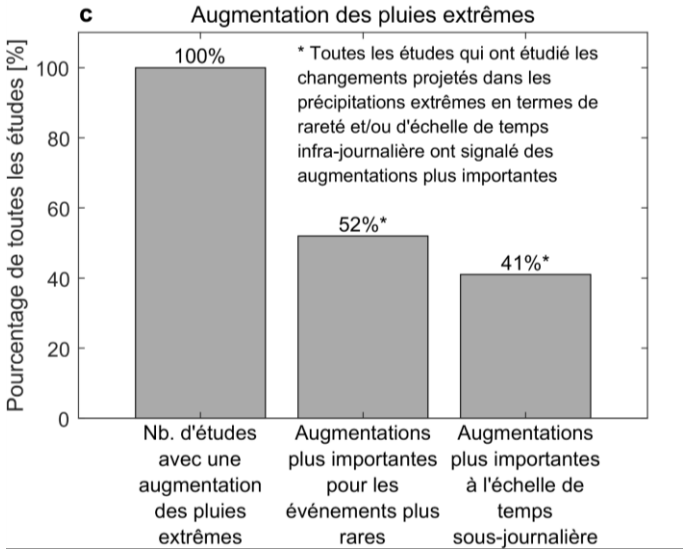
- I_{ref} et I_{fut} sont les intensités de pluies de référence et future
- R_{sc} est le facteur d'échelle des précipitations
- ΔT est le changement projeté de la température locale

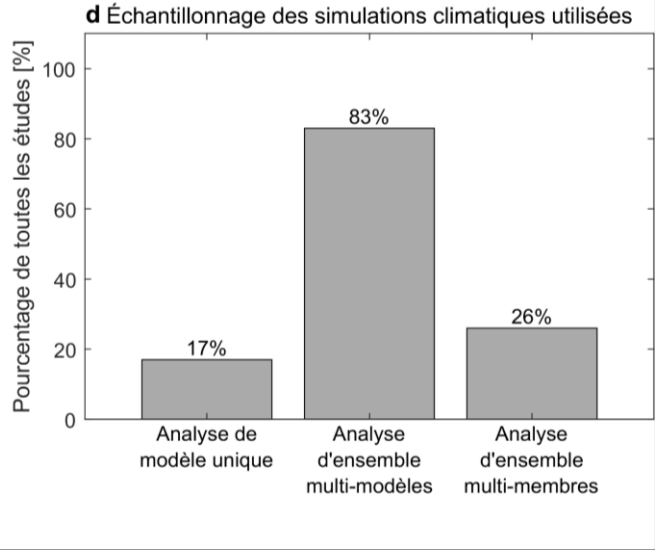
- Courbes IDF en climat futur (p. ex.: Ville de Vancouver, MTO, etc.)
  → **typiquement basée sur des GCM seulement**

REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES CHANGEMENTS PROJETÉS









Quatre constats importants:

1. Toutes les études projettent une augmentation de la fréquence et l'intensité des pluies extrêmes
2. Les augmentations projetées sont plus importantes pour les événements moins fréquents (plus rares)
3. Les augmentations sont plus importantes pour les pluies de courtes durées
4. Le nombre d'études sur des modèles permettant la convection est encore limité

RECOMMANDATIONS – ÉQUATION ADAPTÉE

- Une nouvelle équation qui tient compte des constats précédents:

$$I_{fut,D,T} = I_{ref,D,T} \times F_T \times F_D \times \left(\frac{100 + \boxed{R_{sc,24,2}}}{100}\right)^{\boxed{\Delta T}}$$

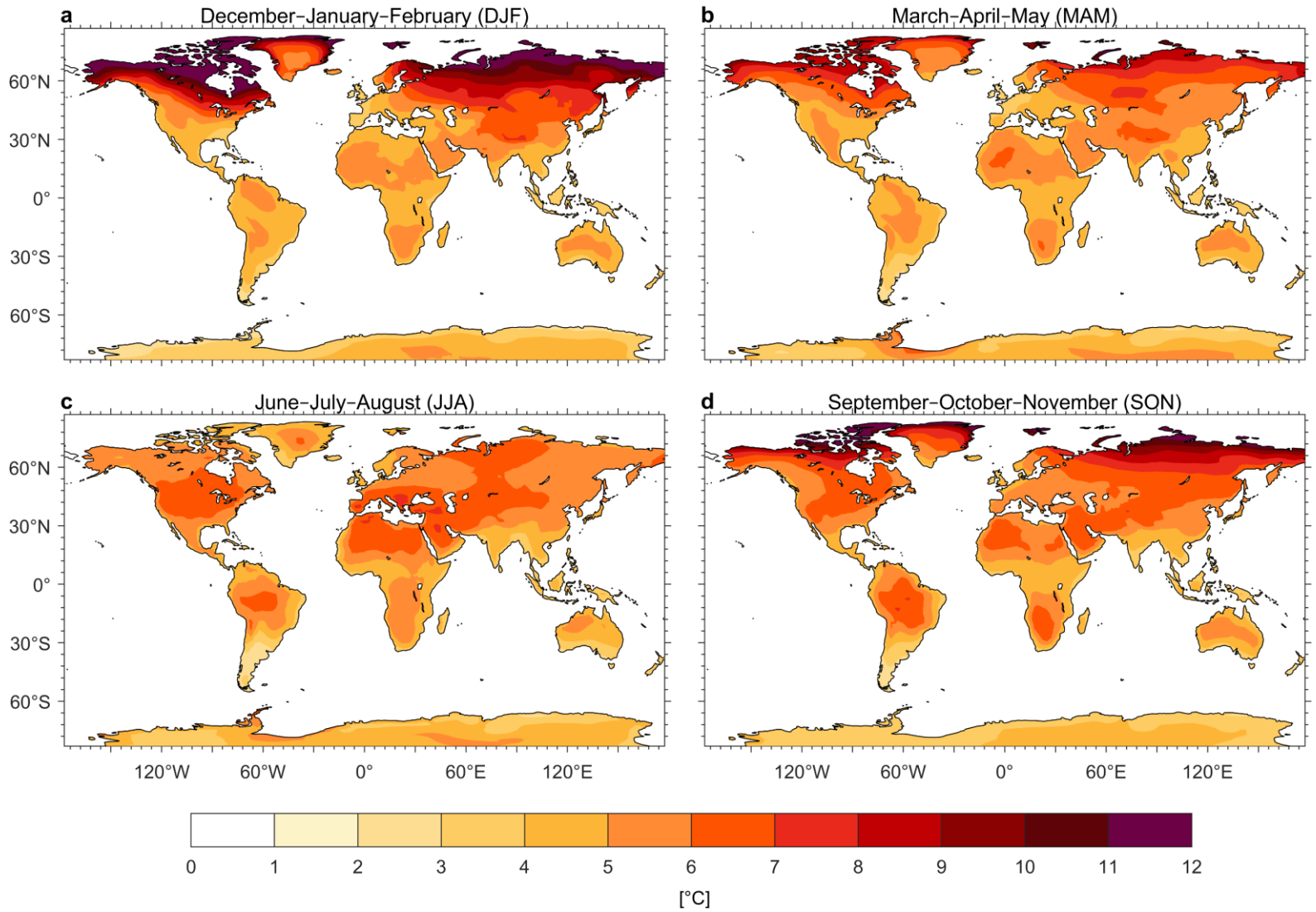
où:

- $I_{fut,D,T}$: intensité future projetée des pluies de durée D et de période de retour T
- $I_{ref,D,T}$: intensité de référence des pluies de durée D et de période de retour T
- F_T : facteur d'ajustement pour la période de retour T ($T > 2$ ans, $F_T \geq 1$)
- F_D : facteur d'ajustement pour une durée D inférieur à 24 h ($D < 24$ h, $F_D \geq 1$)
- $R_{sc\ 24,2}$: facteur d'échelle des précipitations (% °C^{-1}) pour la pluie 24 h d'une période de retour 2 ans
- ΔT : changement projeté de la température moyenne saisonnière (°C)

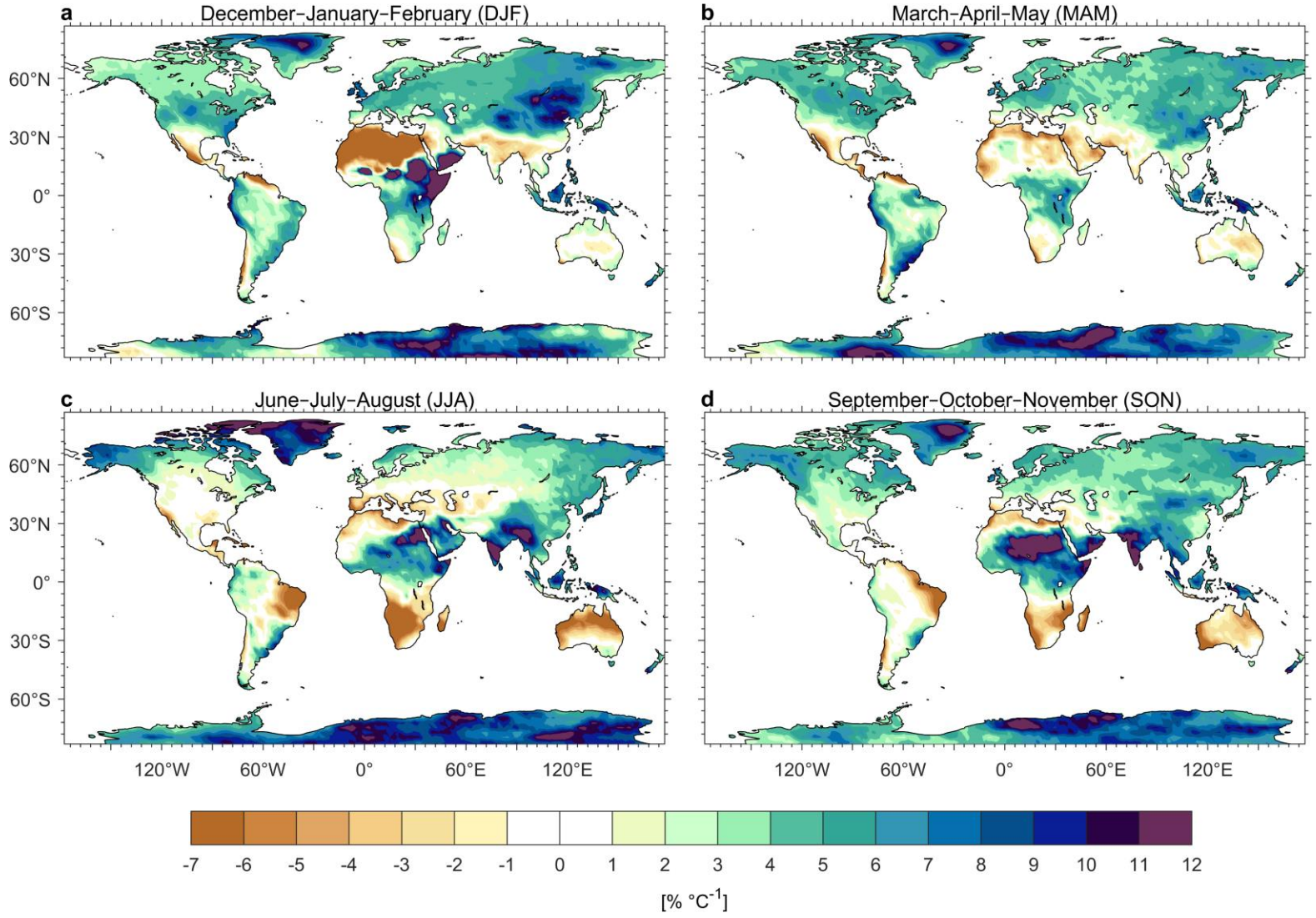
26 modèles CMIP5

#	Institution	Model name
1	CSIRO-BOM	ACCESS1.0
2	CSIRO-BOM	ACCESS1.3
3	BCC	BCC-CSM1.1
4	BCC	BCC-CSM1.1(m)
5	CCCMA	CanESM2
6	CMCC	CMCC-CESM
7	CMCC	CMCC-CM
8	CMCC	CMCC-CMS
9	CNRM-CERFACS	CNRM-CM5
10	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0
11	LASG-CESS	FGOALS-s2
12	NOAA-GFDL	GFDL-CM3
13	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2G
14	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M
15	MOHC	HadGEM2-CC
16	MOHC	HadGEM2-ES
17	INM	INM-CM4
18	IPSL	IPSL-CM5A-LR
19	IPSL	IPSL-CM5A-MR
20	IPSL	IPSL-CM5B-LR
21	MIROC	MIROC5
22	MIROC	MIROC-ESM
23	MIROC	MIROC-ESM-CHEM
24	MPI-M	MPI-ESM-LR
25	MPI-M	MPI-ESM-MR
26	NCC	NorESM1-M

RECOMMANDATIONS – ΔT POUR 2081-2100 AVEC RCP8.5

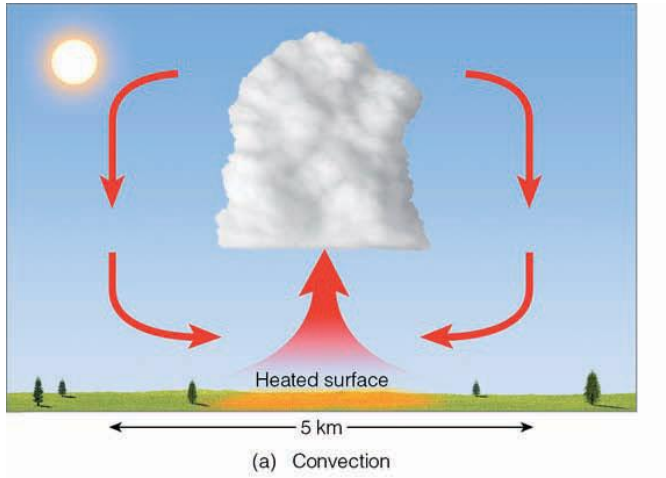


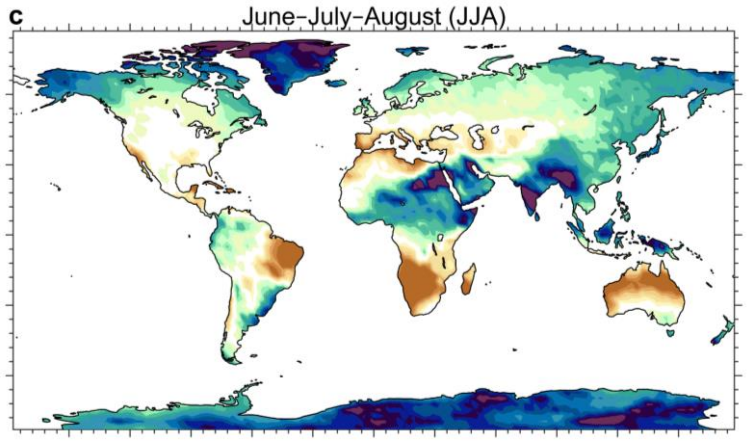
RECOMMANDATIONS – $R_{SC,24,2}$ POUR 2081-2100 AVEC RCP8.5



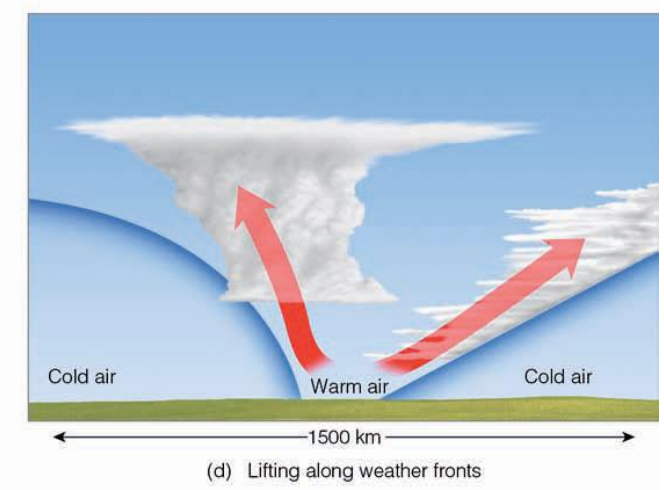
RECOMMANDATIONS – UTILISATION DE L'ÉQUATION

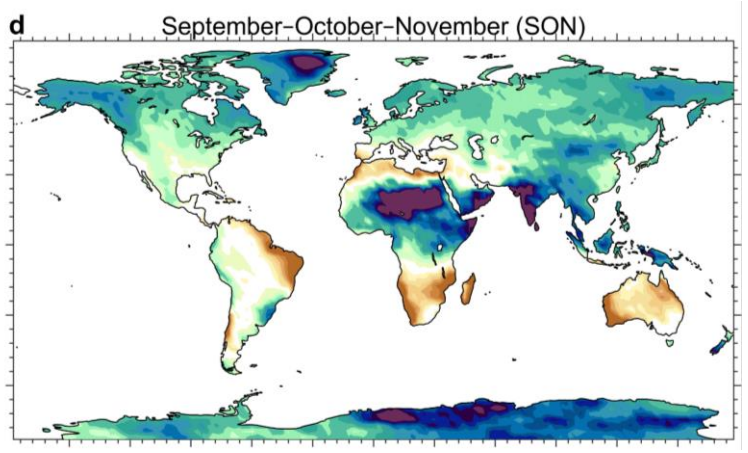
- Courtes durées < 24 heures (p. ex. précipitations convectives)





- Longue durées ≥ 24 heures (p. ex. précipitations stratiformes)





Source: Figures tirées de Ahrens, Meteorology Today

RECOMMANDATIONS – UTILISATION DE L'ÉQUATION

- Actuellement, des estimations des facteurs de durée (F_D) et de fréquence (F_T) sont **possibles seulement à l'échelle locale** en utilisant **les simulations à haute résolution disponibles (idéalement de CPM)**.
- Considérant la vitesse à laquelle des simulations de CPM plus nombreuses et plus longues sont générées, des **estimations fiables à l'échelle mondiale** des deux facteurs devraient être **possible au cours de la prochaine décennie**.
- Néanmoins, nous pouvons fournir **une plage de valeurs plausibles**:
  - $F_D > 1$ pour durée < 24 heures
  - $F_T > 1$ pour période de retour $T > 2$ ans
  - La limite supérieure des deux facteurs est donnée par leur interprétation physique :
    Les coefficients supérieurs à 1.5 sont peu probables.
- À l'heure actuelle, **il n'y a pas vraiment de simulations de CPM qui couvrent le Québec** pour une longue période de temps. Cependant, il commence à y avoir des projets visant à générer ce type de simulations.
- Il y a quand même **plusieurs simulations à relativement haute résolution (RCM) qui peuvent servir d'alternative** en attendant les simulations de CPM (p. ex. le projet ClimEx piloté par Ouranos)
- **Possibilité de faire appel à des experts en climat pour vous aider à estimer ces facteurs!**

RECOMMANDATIONS – UTILISATION DE L'ÉQUATION

Exemple pour une ville quelconque dans le sud du Québec:

- Durée: 1 heure
- Période de retour: 100 ans

$$\mathbf{I_{ref,1,100} = 50\ mm/h}$$

Méthode du MELCC (18% d'augmentation):

$$I_{fut,D,T} = 50\ mm/h \times 1.18 = \mathbf{59\ mm/h}$$

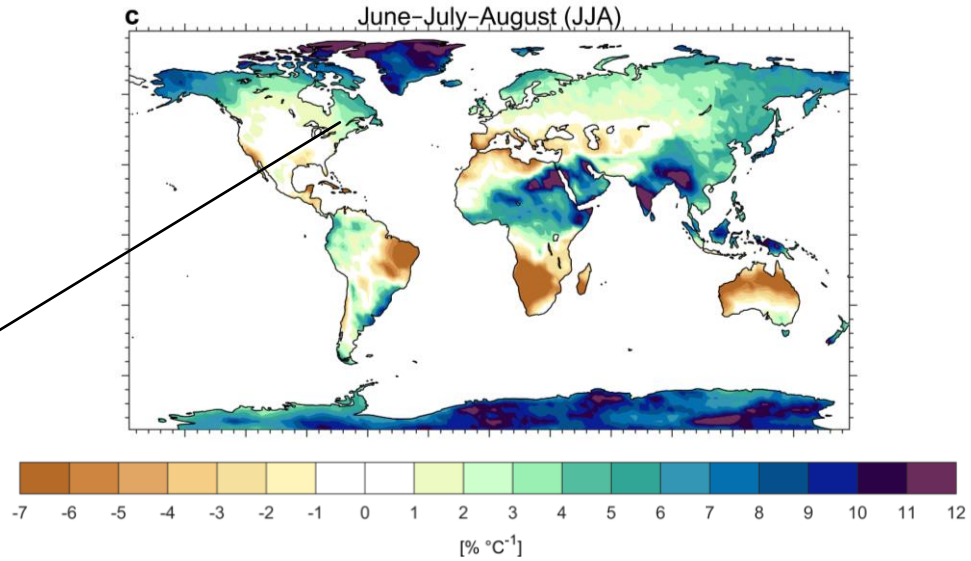
Méthode recommandée:

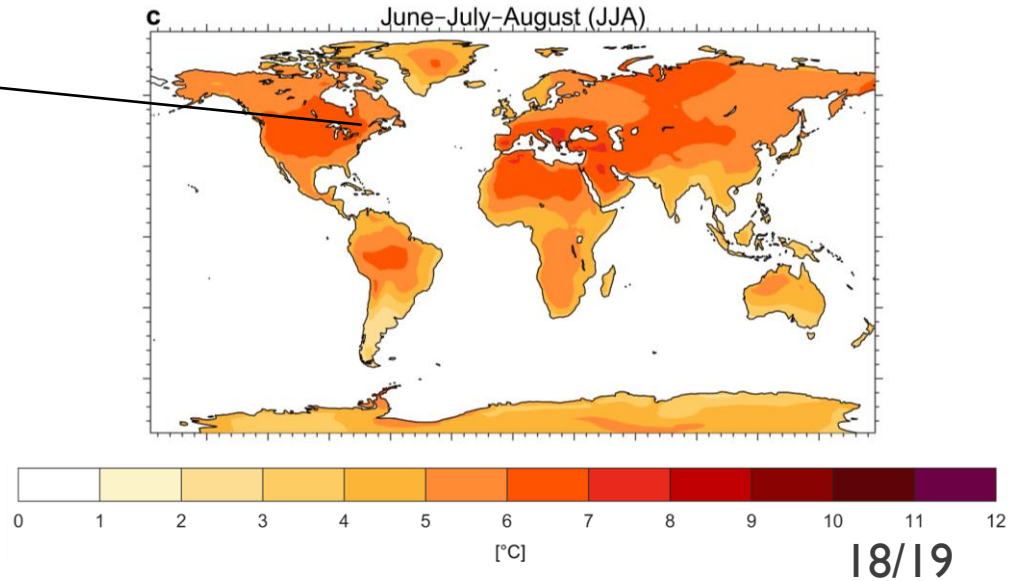
$$I_{fut,D,T} = I_{ref,D,T} \times F_T \times F_D \times \left(\frac{100 + R_{sc,24,2}}{100}\right)^{\Delta T}$$

$$I_{fut,D,T} = 50 \times 1.06 \times 1.10 \times \left(\frac{100 + 2.5}{100}\right)^{6.5}$$

$$I_{fut,D,T} = 50 \times 1.06 \times 1.10 \times 1.17 = 50 \times 1.36$$

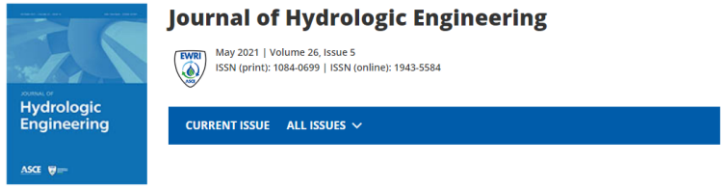
$$I_{fut,D,T} = \mathbf{71\ mm/h} \rightarrow \mathbf{36\% \gg 18\%\ (double!)}$$

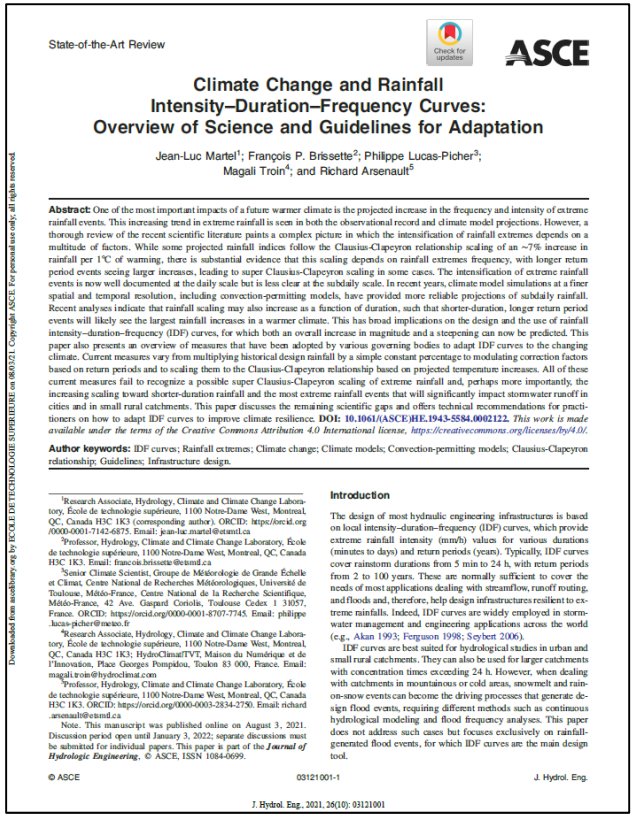




CONCLUSIONS

- Il faut continuer de sensibiliser les ingénieurs, les preneurs de décisions et le public par rapport aux impacts des changements climatiques sur nos infrastructures.
- En raison des changements climatiques observables et projetés, les ingénieurs ne peuvent pas continuer à s'appuyer sur des codes, des normes et des directives professionnelles qui sont uniquement basées sur des informations climatiques historiques lors de la conception de structures à longue durée de vie. Le fait de ne pas tenir compte de l'impact du changement climatique pourrait être considéré comme une violation de la norme de diligence d'un ingénieur (ASCE, 2018; Ingénieurs Canada, 2018).
- Des stratégies d'adaptation ont déjà été mises en place par certains organismes de réglementation en ce qui concerne les courbes IDF utilisées par les ingénieurs. Ces stratégies sont un pas dans la bonne direction, mais elles ne reconnaissent pas l'impact de la durée et de la rareté sur l'amplification des futures pluies extrêmes.
- Il est important de garder en tête que le coût d'adaptation aux changements climatiques pourrait être relativement faible comparativement aux coûts engendrés par les dommages des aléas climatiques plus fréquents et plus intenses.





State-of-the-Art Review

ASCE

Climate Change and Rainfall Intensity–Duration–Frequency Curves: Overview of Science and Guidelines for Adaptation

Jean-Luc Martel[1]; François P. Brissette[2]; Philippe Lucas-Picher[3]; Magali Troin[4]; and Richard Arsenault[5]

Abstract: One of the most important impacts of a future warmer climate is the projected increase in the frequency and intensity of extreme rainfall events. This increasing trend in extreme rainfall is seen in both the observational record and climate model projections. However, a thorough review of the recent scientific literature paints a complex picture in which the intensification of rainfall extremes depends on a multitude of factors. While some projected rainfall indices follow the Clausius-Clapeyron relationship scaling of an ~7% increase in rainfall per 1°C of warming, there is substantial evidence that this scaling depends on rainfall extremes frequency, with longer return period events seeing larger increases, leading to super Clausius-Clapeyron scaling in some cases. The intensification of extreme rainfall events is now well documented at the daily scale but is less clear at the subdaily scale. In recent years, climate model simulations at a finer spatial and temporal resolution, including convection-permitting models, have provided more reliable projections of subdaily rainfall. Recent analyses indicate that rainfall scaling may also increase as a function of duration, such that shorter-duration, longer return period events will likely see the largest rainfall increases in a warmer climate. This has broad implications on the design and the use of rainfall intensity–duration–frequency (IDF) curves, for which both an overall increase in magnitude and a steepening can now be predicted. This paper also presents an overview of measures that have been adopted by various governing bodies to adapt IDF curves to the changing climate. Current measures vary from multiplying historical design rainfall by a simple constant percentage to modulating correction factors based on return periods and to scaling them to the Clausius-Clapeyron relationship based on projected temperature increases. All of these current measures fail to recognize a possible super Clausius-Clapeyron scaling of extreme rainfall and, perhaps more importantly, the increasing scaling toward shorter-duration rainfall and the most extreme rainfall events that will significantly impact stormwater runoff in cities and in small rural catchments. This paper discusses the remaining scientific gaps and offers technical recommendations for practitioners on how to adapt IDF curves to improve climate resilience. **DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002122.** *This work is made available under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.*

Author keywords: IDF curves; Rainfall extremes; Climate change; Climate models; Convection-permitting models; Clausius-Clapeyron relationship; Guidelines; Infrastructure design.

[1]Research Associate, Hydrology, Climate and Climate Change Laboratory, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, QC, Canada H3C 1K3 (corresponding author). ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7142-6875. Email: jean-luc.martel@etsmtl.ca

[2]Professor, Hydrology, Climate and Climate Change Laboratory, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, QC, Canada H3C 1K3. Email: francois.brissette@etsmtl.ca

[3]Senior Climate Scientist, Groupe de Météorologie de Grande Échelle et Climat, Centre National de Recherches Météorologiques, Université de Toulouse, Météo-France, Centre National de la Recherche Scientifique, Météo-France, 42 Ave. Gaspard Coriolis, Toulouse Cedex 1 31057, France. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8707-7745. Email: philippe.lucas-picher@meteo.fr

[4]Research Associate, Hydrology, Climate and Climate Change Laboratory, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, QC, Canada H3C 1K3; HydroClimat/TVT, Maison du Numérique et de l'Innovation, Place Georges Pompidou, Toulon 83 000, France. Email: magali.troin@hydroclimat.com

[5]Professor, Hydrology, Climate and Climate Change Laboratory, École de technologie supérieure, 1100 Notre-Dame West, Montreal, QC, Canada H3C 1K3. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2834-2750. Email: richard.arsenault@etsmtl.ca

Note. This manuscript was published online on August 3, 2021. Discussion period open until January 3, 2022; separate discussions must be submitted for individual papers. This paper is part of the ***Journal of Hydrologic Engineering***, © ASCE, ISSN 1084-0699.

Introduction

The design of most hydraulic engineering infrastructures is based on local intensity–duration–frequency (IDF) curves, which provide extreme rainfall intensity (mm/h) values for various durations (minutes to days) and return periods (years). Typically, IDF curves cover rainstorm durations from 5 min to 24 h, with return periods from 2 to 100 years. These are normally sufficient to cover the needs of most applications dealing with streamflow, runoff routing, and floods and, therefore, help design infrastructures resilient to extreme rainfalls. Indeed, IDF curves are widely employed in stormwater management and engineering applications across the world (e.g., Akan 1993; Ferguson 1998; Seybert 2006).

IDF curves are best suited for hydrological studies in urban and small rural catchments. They can also be used for larger catchments with concentration times exceeding 24 h. However, when dealing with catchments in mountainous or cold areas, snowmelt and rain-on-snow events can become the driving processes that generate design flood events, requiring different methods such as continuous hydrological modeling and flood frequency analyses. This paper does not address such cases but focuses exclusively on rainfall-generated flood events, for which IDF curves are the main design tool.

© ASCE 03121001-1 J. Hydrol. Eng.

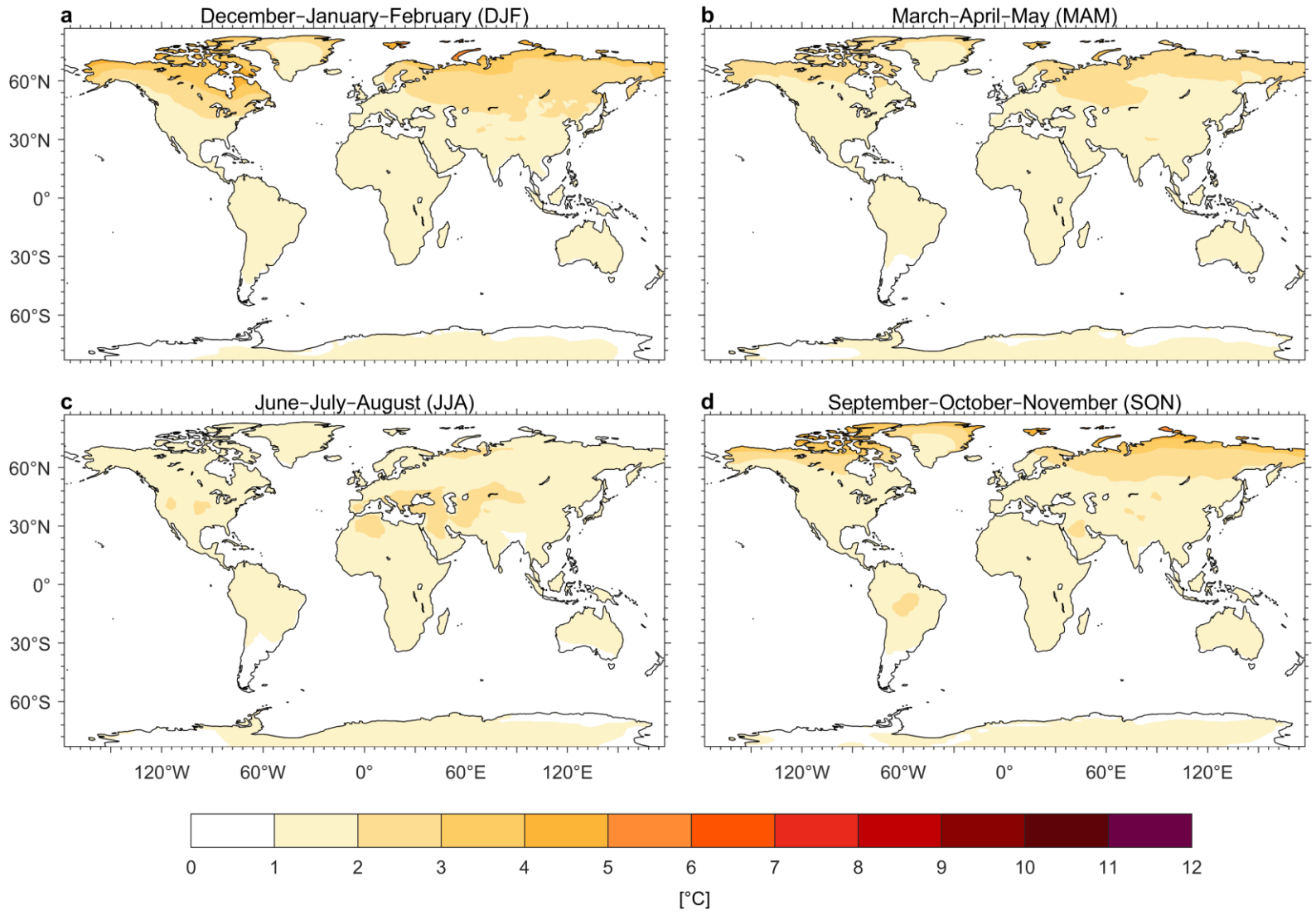
J. Hydrol. Eng., 2021, 26(10): 03121001

Downloaded from ascelibrary.org by ECOLE DETECHNOLOGIE SUPERIEURE on 08/03/21. Copyright ASCE. For personal use only; all rights reserved.

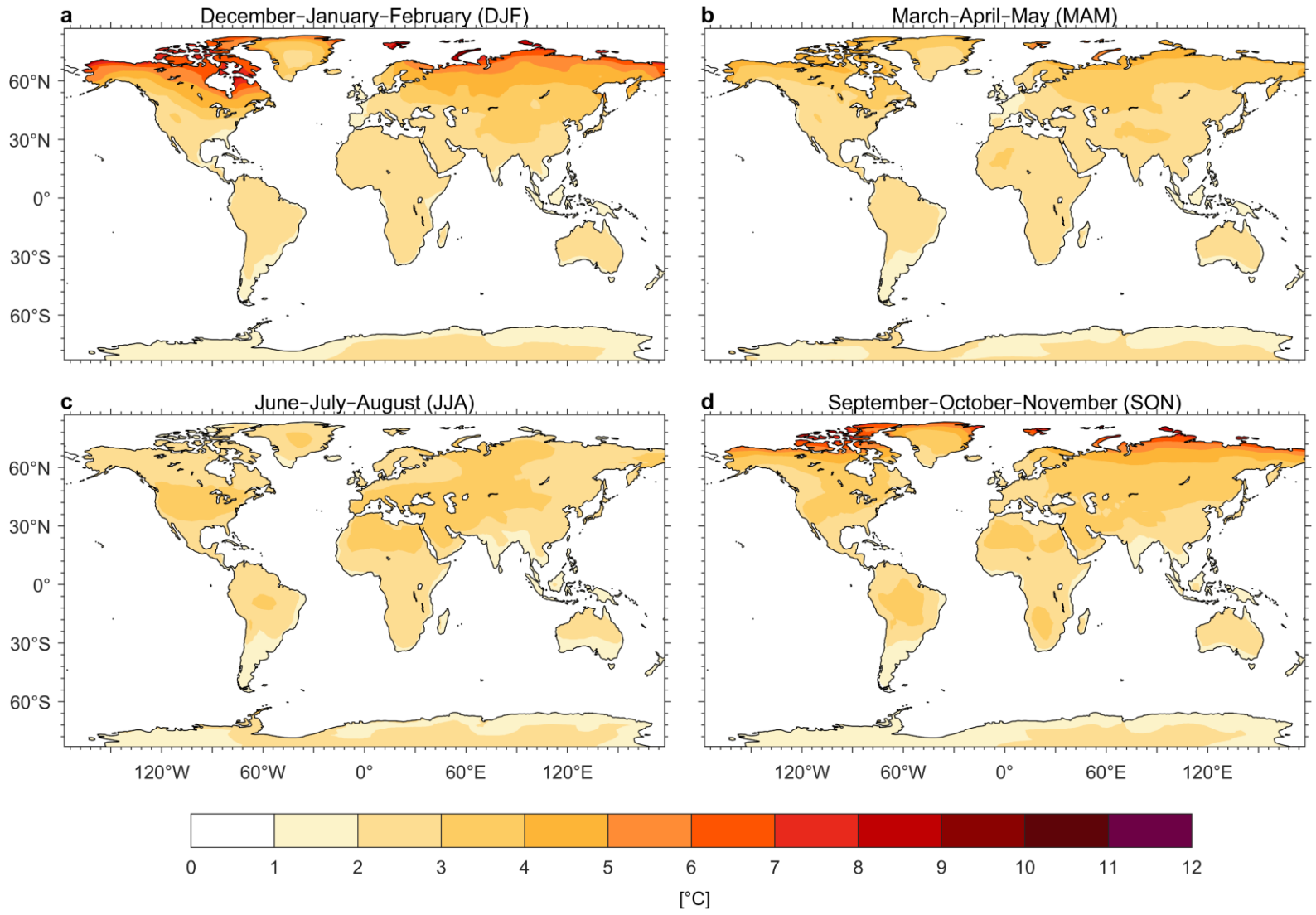
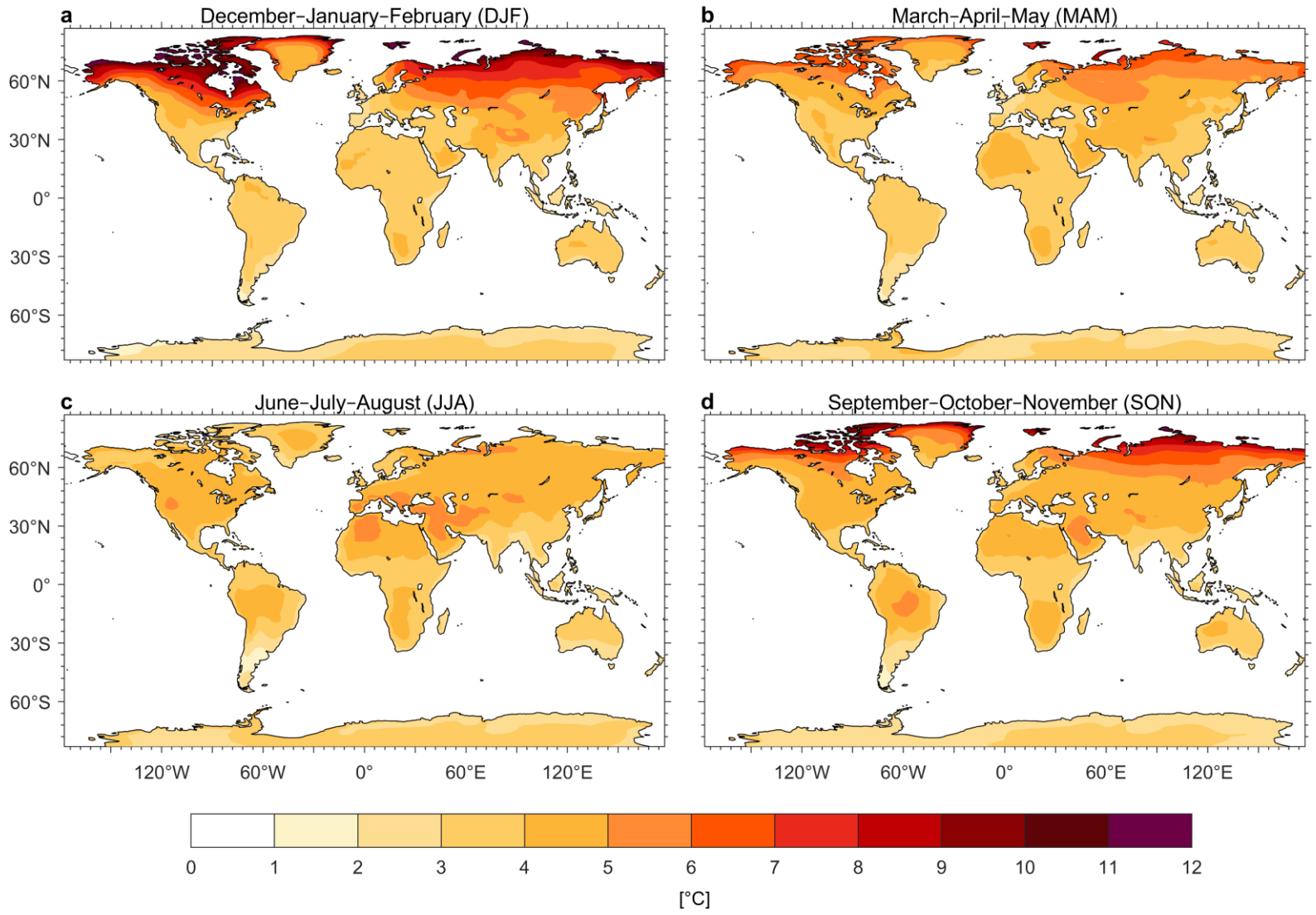
https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002122

LinkedIn: https://www.linkedin.com/in/jeanlucmartel/
E-mail: martel.jean.luc@gmail.com

ANNEXE – ΔT POUR 2021-2040 AVEC RCP8.5



ANNEXE – ΔT POUR 2041-2060 AVEC RCP8.5



ANNEXE – ΔT POUR 2061-2080 AVEC RCP8.5