

Estimation des précipitations extrêmes au Québec à l'aide de modèles hiérarchiques bayésiens

Luc Perreault

en collaboration avec Jonathan Jalbert (Polytechnique Montréal)
et Christian Genest (Université McGill)

... et avec les judicieux conseils d'Éric Parent



Plan

- Courbes IDF des précipitations extrêmes
- Genèse et objectifs du projet
- Estimation des courbes IDF en climat stationnaire
 - Survol des données
 - Le modèle
 - Quelques résultats
- Et les changements climatiques ?

Courbes IDF des précipitations extrêmes



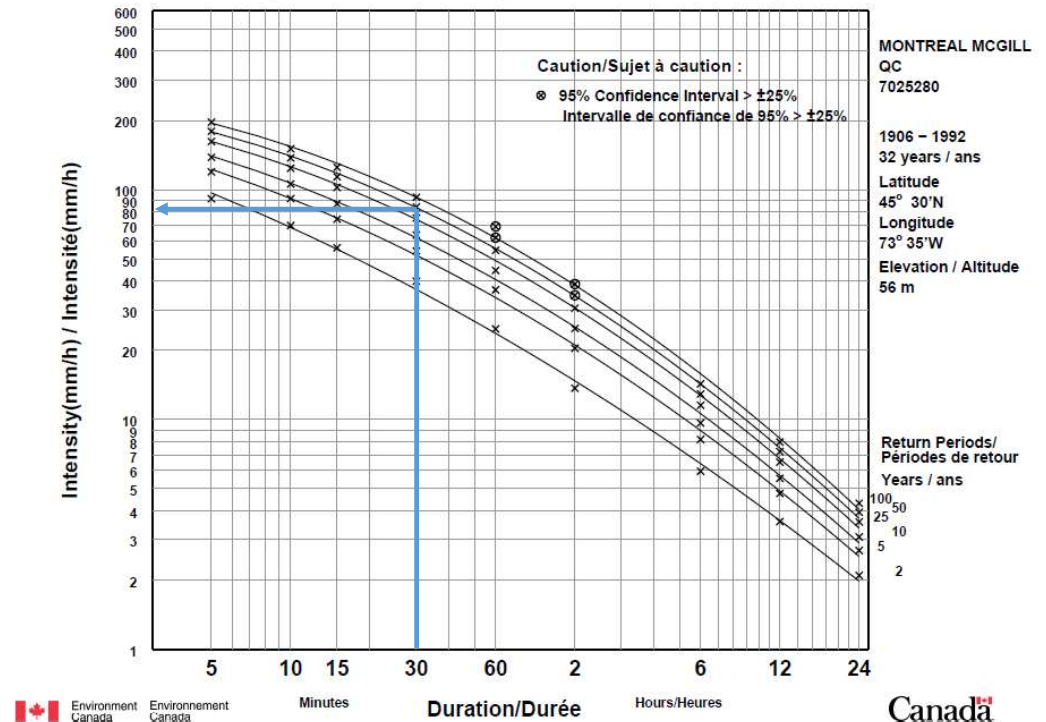
Les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence)

En un site S et pour un temps de retour T , une **courbe IDF** illustre la relation entre :

- l'intensité des précipitations extrêmes (en mm/h)
- leur durée (5 min à 24 h)

Les courbes IDF en vigueur sont produites et périodiquement mises à jour par **Environnement et Changement Climatique Canada**

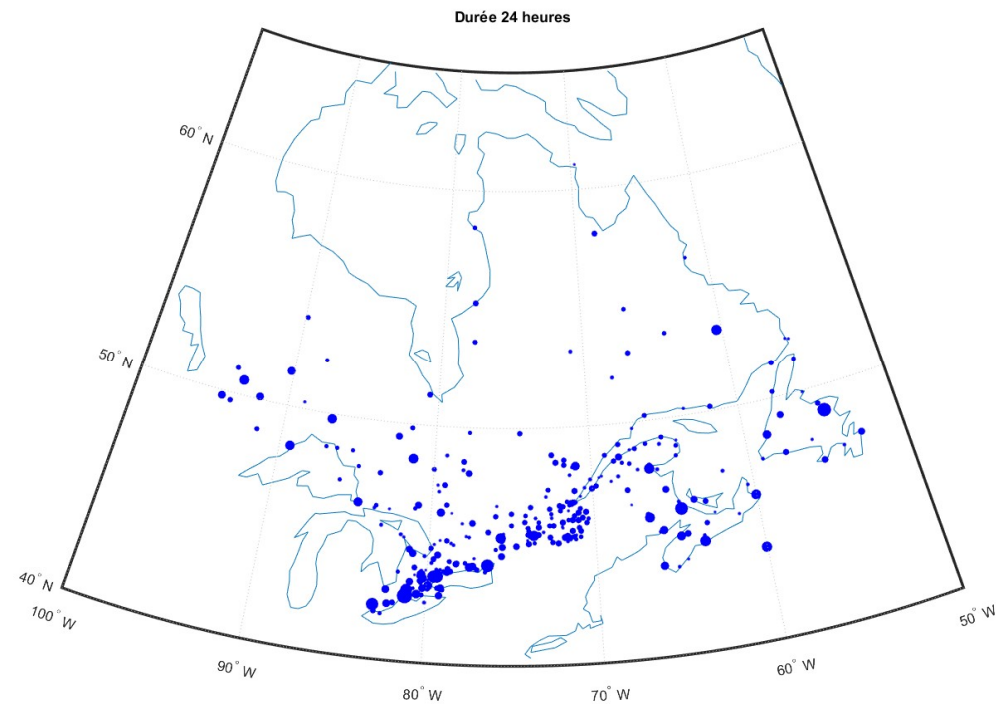
Short Duration Rainfall Intensity–Duration–Frequency Data 2014/12/21
Données sur l'intensité, la durée et la fréquence des chutes de pluie de courte durée



Répartition des stations dans l'est du Canada

Elles sont imparfaites à plus d'un titre :

- Elles s'appuient sur une méthodologie peu sophistiquée, à savoir l'ajustement d'une **loi de Gumbel** par la **méthode des moments**
- Le réseau des stations météorologiques est **clairsemé** en dehors des zones fortement habitées



Genèse et objectifs du projet

Systèmes de récupération d'huile

Hydro-Québec cherche à évaluer la performance de séparateurs eau-huile existants

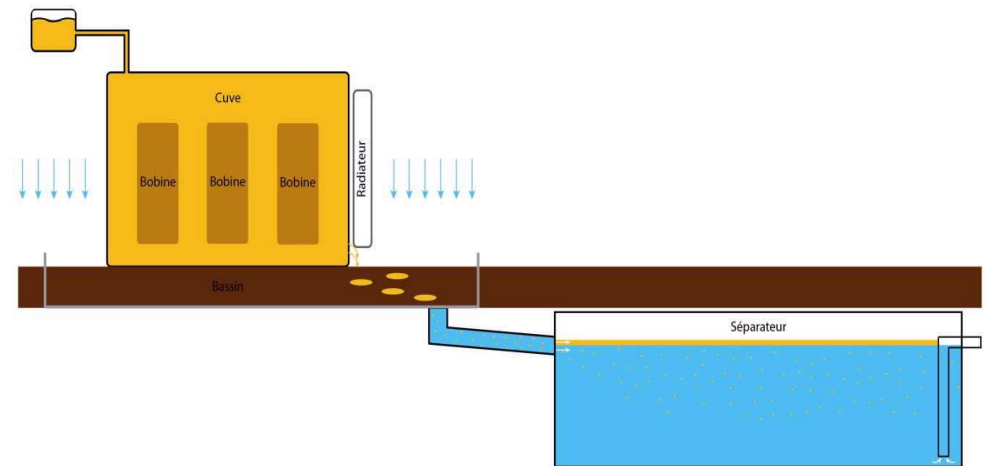
Poste de transformation HQ - Radisson

- Optimiser la performance des systèmes existants
- Actualiser les critères de conception



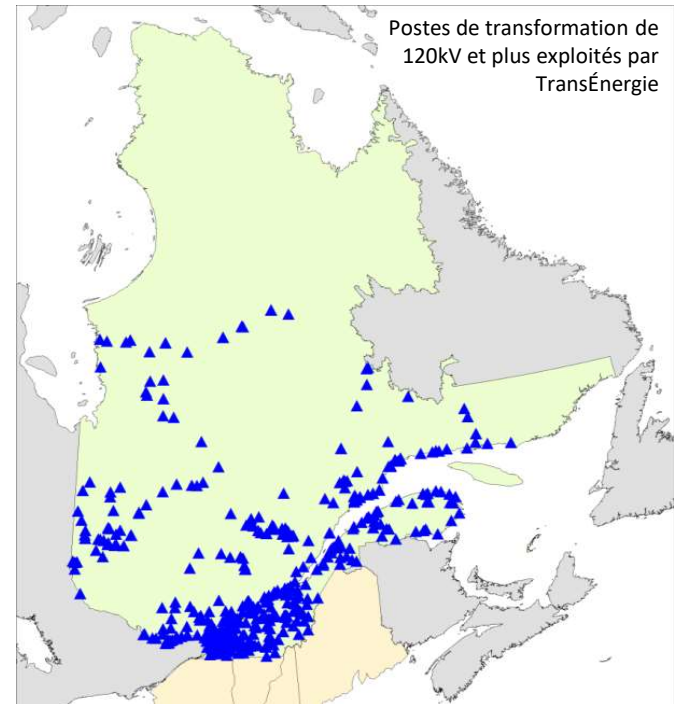
Systemes de récupération d'huile

La majorité des postes de transformation exploités par Hydro-Québec sont équipés d'un système de récupération d'huile



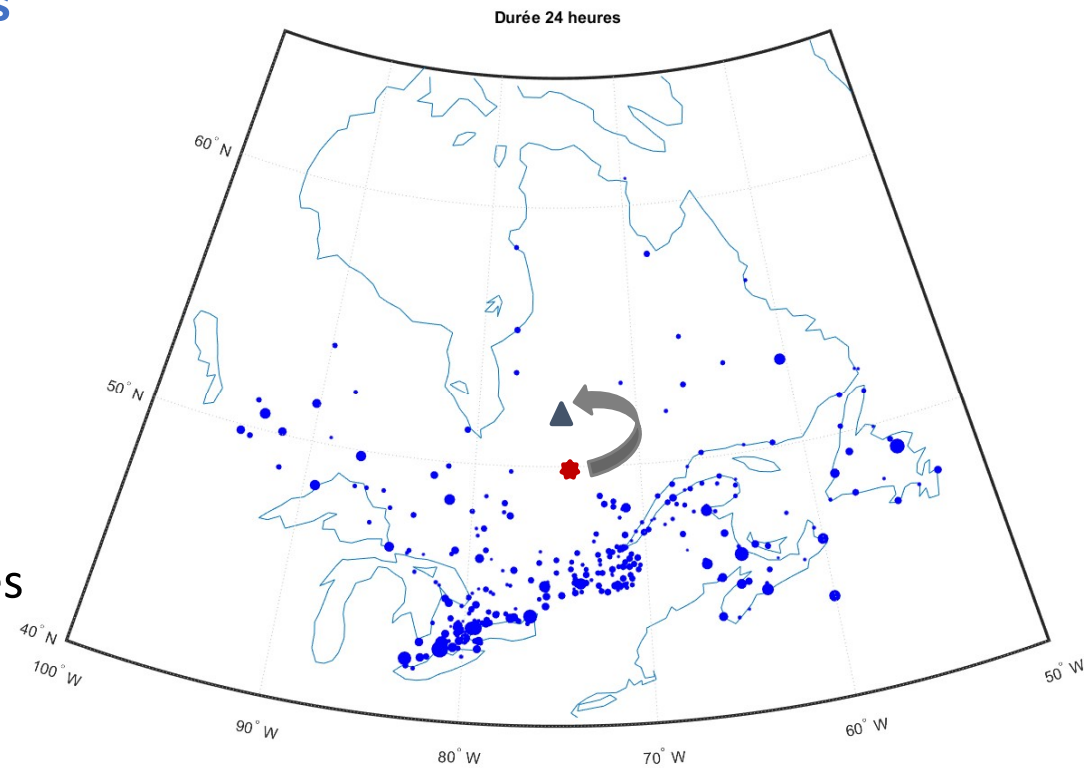
Systemes de récupération d'huile

La majorité des postes de transformation exploités par Hydro-Québec sont équipés d'un système de récupération d'huile



Objectifs

1. Améliorer **l'estimation des courbes IDF aux sites** de collecte des données (stations météo)
2. Développer un outil qui permet **l'interpolation des courbes IDF** en des sites éloignés des stations météo
3. Proposer des **facteurs de corrections** à appliquer aux courbes IDF pour la prise en compte des changements climatiques

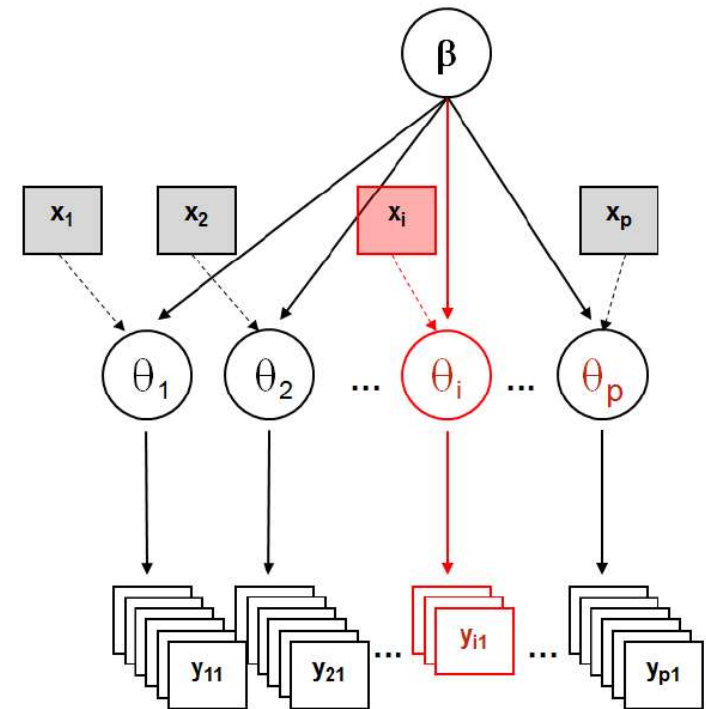


Estimation des courbes IDF en climat stationnaire

Notre stratégie de modélisation

Modèle hiérarchique bayésien (MHB)

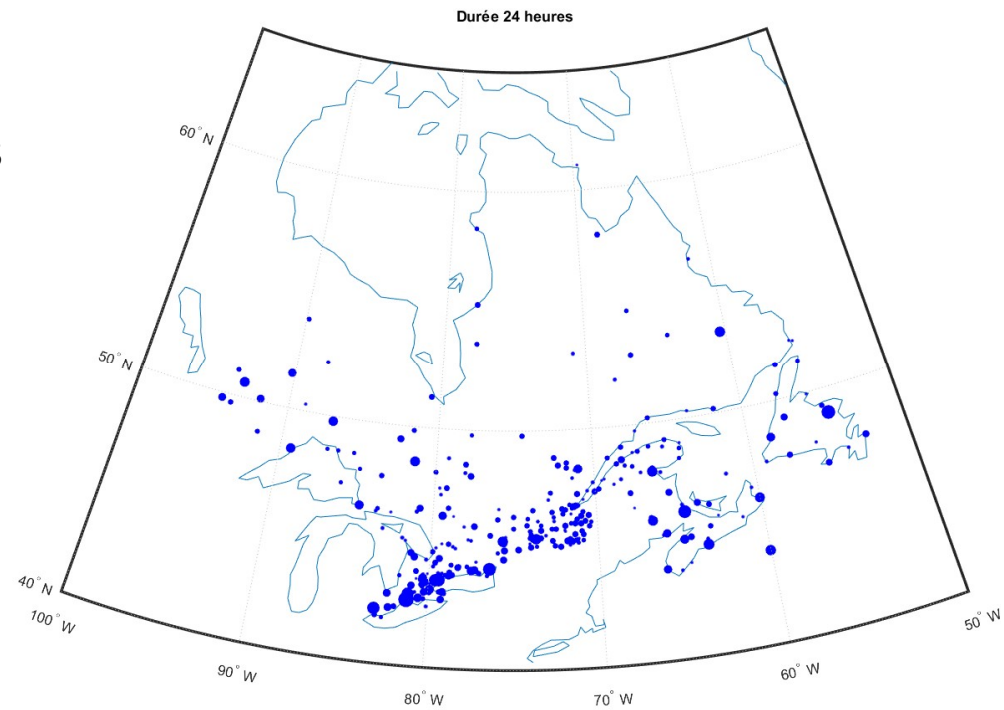
- Faire appel à la **théorie des valeurs extrêmes** pour mieux cerner les caractéristiques des précipitations extrêmes
- Inclure des **variables explicatives** permettant d'interpoler en des sites dépourvus de station météorologique
- Intégrer une **composante spatiale** afin partager adéquatement l'information entre les stations



Les données

Observations : uniquement les stations opérées par ECCC ont été retenues

- La qualité des données satisfait les normes de l'Organisation météorologique mondiale.
- 329 stations dans l'Est du Canada.
- La période d'activité moyenne des stations est de 26 ans (minimum de 10 ans et maximum de 81 ans).

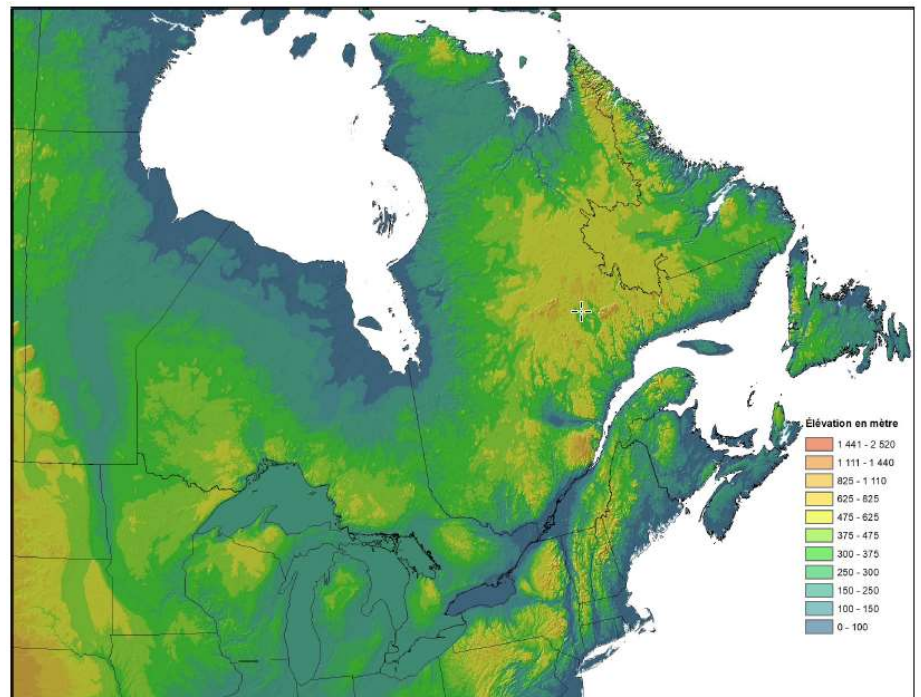


Les données

Choix de co-variables : plusieurs options

- latitude et longitude
- orographie
- élévation
- réanalyses climatiques
- ...

Carte d'élévations en mètres

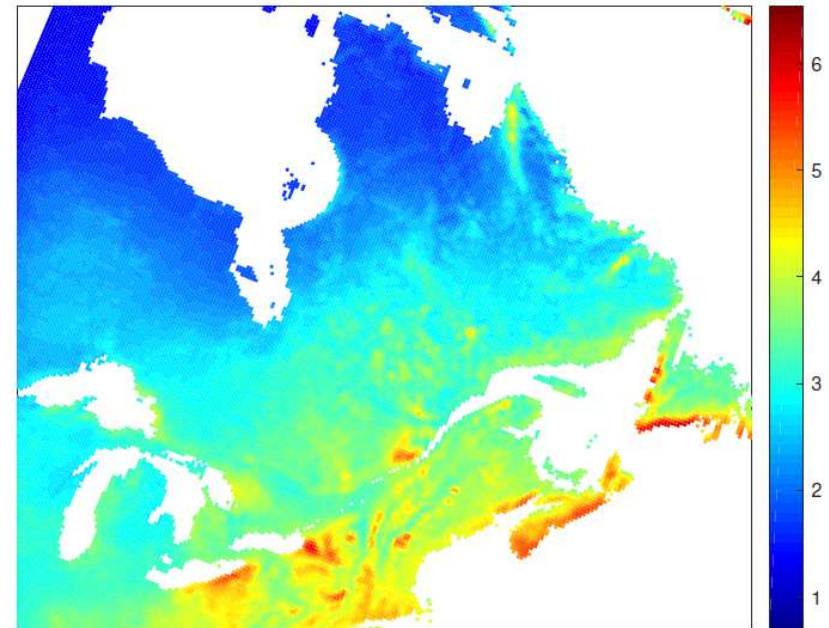


Les données

Réanalyse climatique produite à partir du modèle régional canadien du climat (MRCC5)

- 34 années de données [1981 , 2014]
- Haute résolution ~ **12x12 km**
- Champs cohérent au plan physique
- Pas de valeurs manquantes
- **48 694 cellules**

Précipitations moyennes 1981-2014 à chaque point de grille du MRCC 5 (12x12 km²)



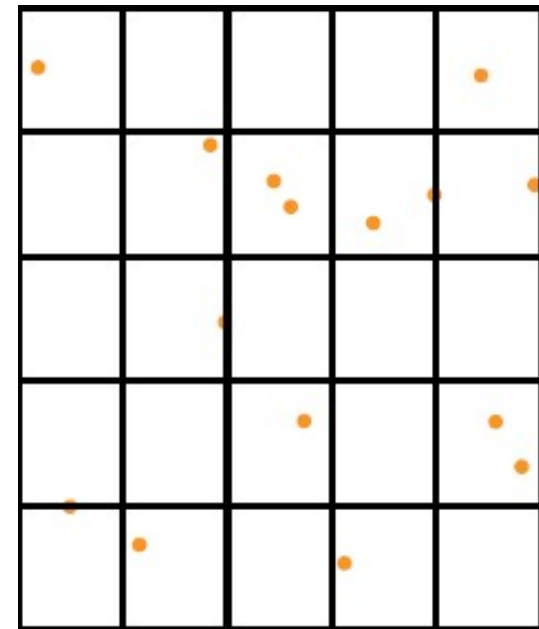
Modèle MHB

Niveau 1 : représentation des manifestations locales

- Pour chaque cellule, on suppose que les maxima suivent une loi généralisée des valeurs extrêmes (GEV)

$$F(y_{it} | \mu_i, \sigma_i, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{y_{it} - \mu_i}{\sigma_i} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

- Hypothèse : paramètre de forme invariant dans l'espace



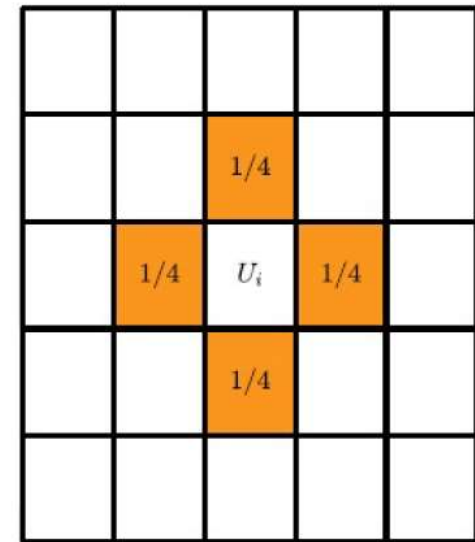
Modèle MHB

Niveau 2 : représentation de la variabilité spatiale

- Pour cellules qui contiennent au moins une station pluviométrique, on construit une **relation entre les co-variables et les paramètres** de la loi GEV

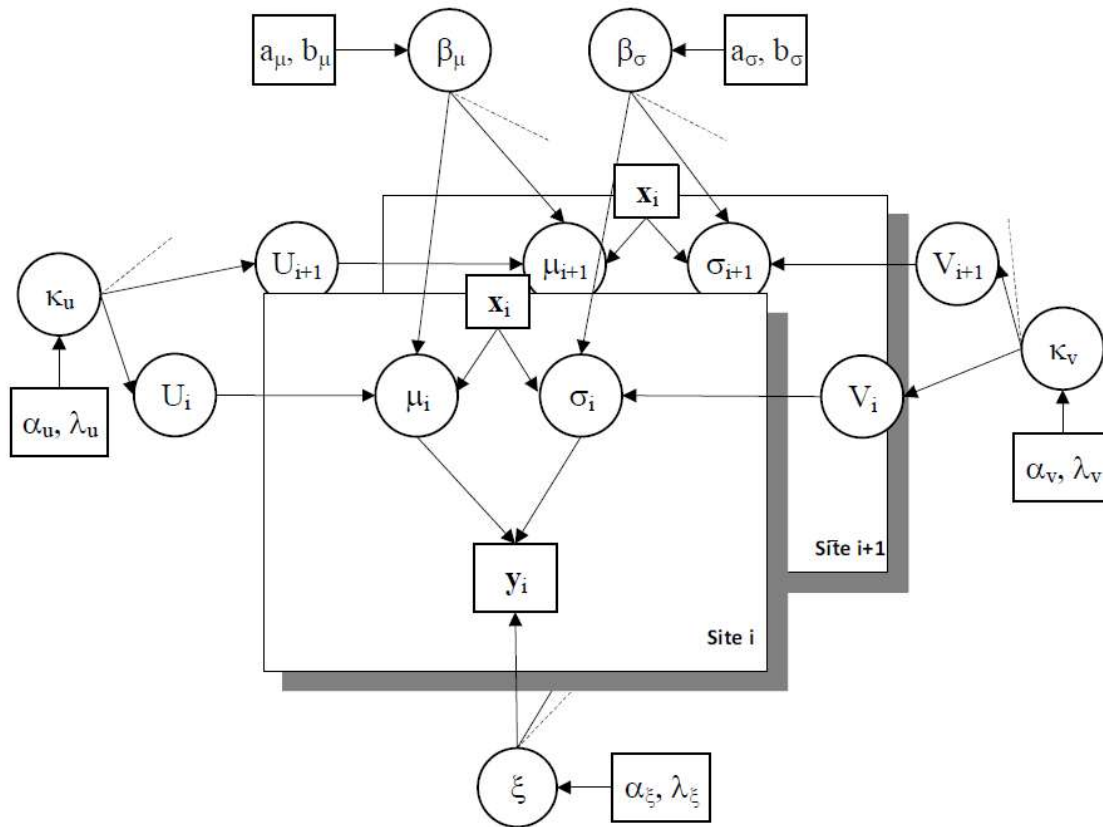
$$\mu_i = \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta}_\mu + U_i$$

- Les termes d'erreurs sont corrélés dans l'espace : **champs aléatoire de Markov intrinsèque d'ordre 1** (Rue et Held, 2005)



$$f(U_i | U_{\delta_i} = u_{\delta_i}) = \mathcal{N} \left(u_i \mid \frac{1}{n_i} \sum_{j \in \delta_i} u_j, \frac{1}{\kappa_u n_i} \right)$$

En résumé



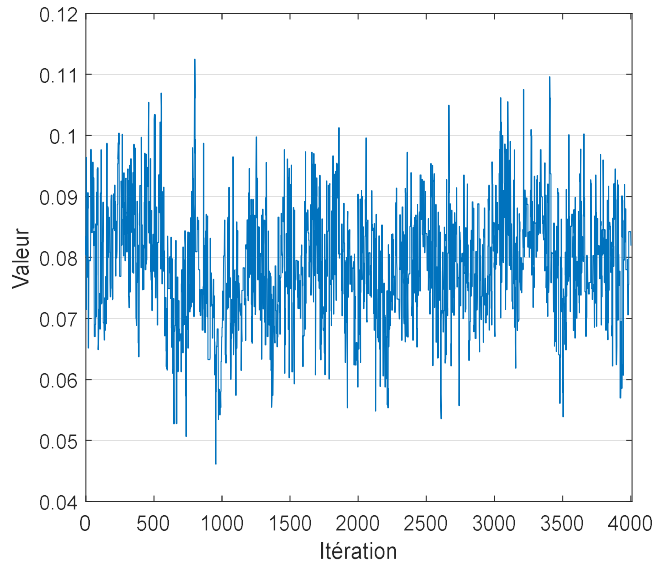
- Lois a priori « diffuses » et non-informatives
- Échantillonnage de Gibbs
 - Très efficace grâce à la propriété de Markov
 - Stabilise rapidement mais beaucoup d'autocorrélation
- 100 000 itérations en 10 minutes (Intel Core i7, 2.7 GHz)

<https://github.com/jojal5/Publications/tree/master/JalbertGenestPerreault2022>

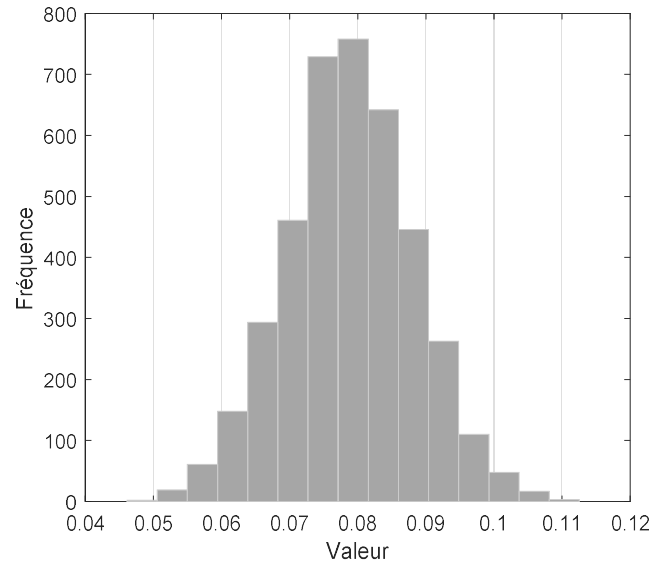
Quelques résultats

Paramètre de forme ξ de la GEV

Trace du paramètre de forme ξ



Distribution a posteriori de ξ



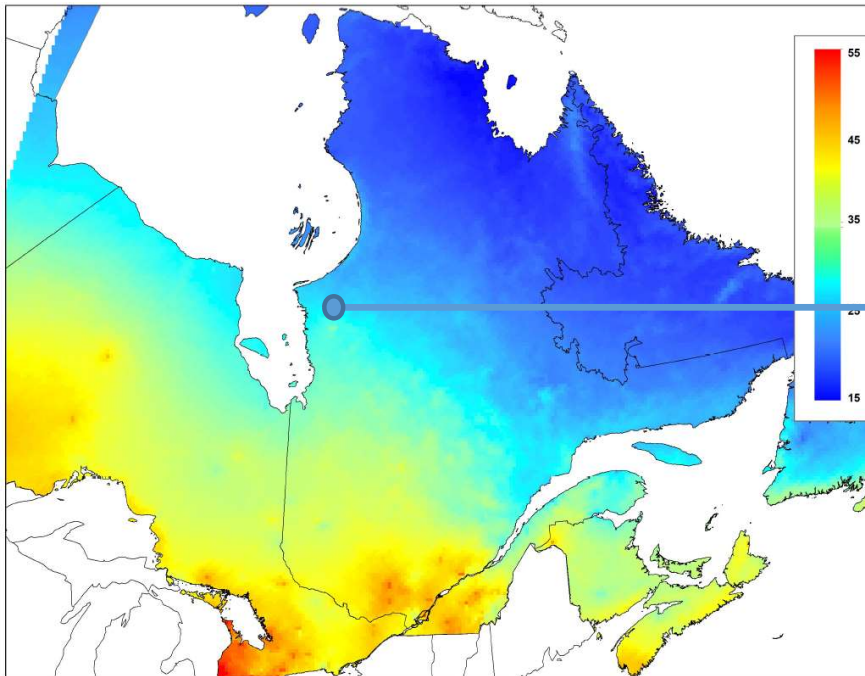
De toute évidence, $\xi > 0$:

➔ la loi Gumbel est donc inappropriée

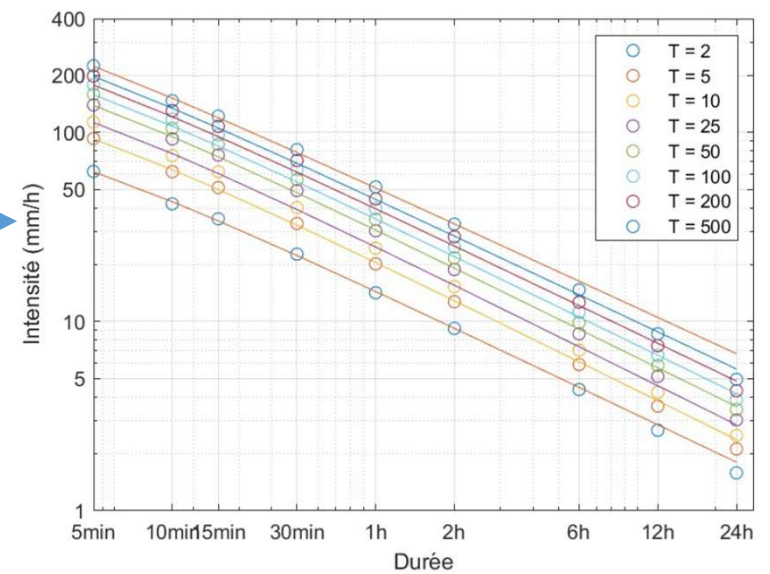
Quelques résultats

Interpolation

Intensité des précipitations maximales en mm/h
pour $D = 1$ h et $T = 25$ ans



Courbes IDF interpolées au poste de Radisson

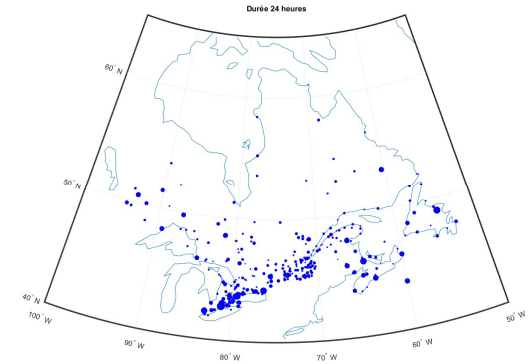


Quelques résultats

Analyse de la performance par validation croisée

Pour chaque site i : $\bar{\omega}_i = \int |\bar{F}_i(y) - F_i(y)|^2 dF_i(y)$

→ $\bar{\Delta}_i = (\bar{\omega}_i - \hat{\omega}_i) / \bar{\omega}_i$ mesure relative de la performance de l'approche proposée par rapport à la pratique courante



Proportion des stations à l'avantage du MHB et score médian

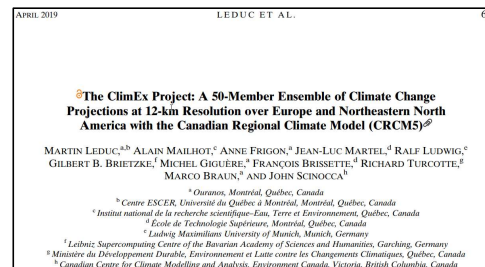
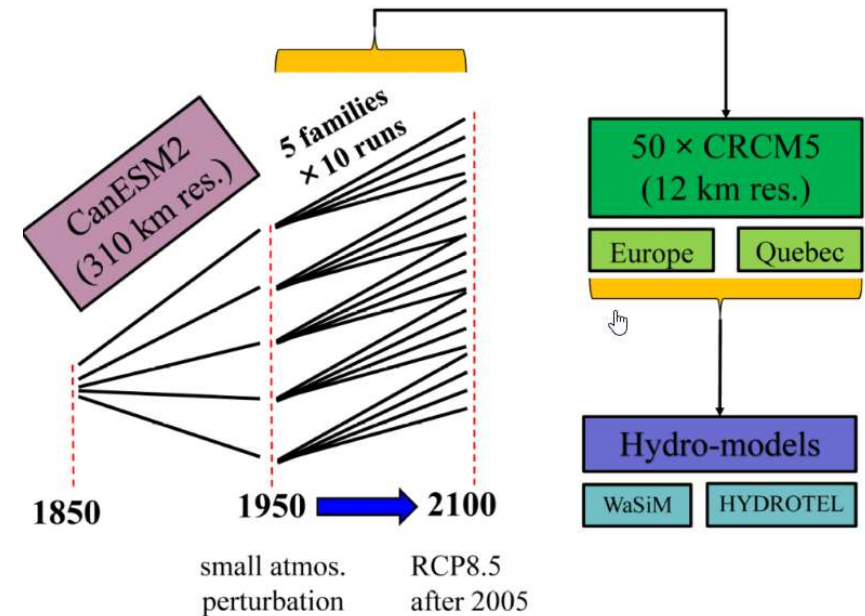
Durée	5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
Proportion $\Delta > 0$	72%	74%	75%	77%	77%	77%	80%	78%	72%
Δ Médian	52%	57%	57%	61%	60%	57%	56%	51%	52%

Et les changements climatiques ?

Données

Projections climatiques : ensemble ClimEx

- Modèle régional MRCC5 piloté aux frontières avec CMIP5 (modèle global)
- Scénario d'émissions GES RCP8.5 (*Representative Concentration Pathway*)
- Ensemble de 50 projections climatiques 1950-2099
- Résolution 12x12 km



Leduc et al. (2019)

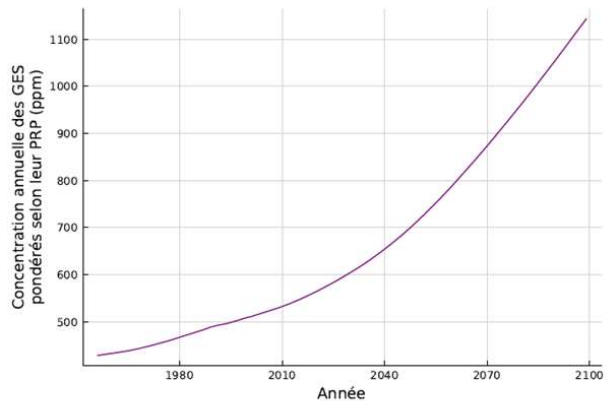
<https://www.climex-project.org/en/>

Le modèle

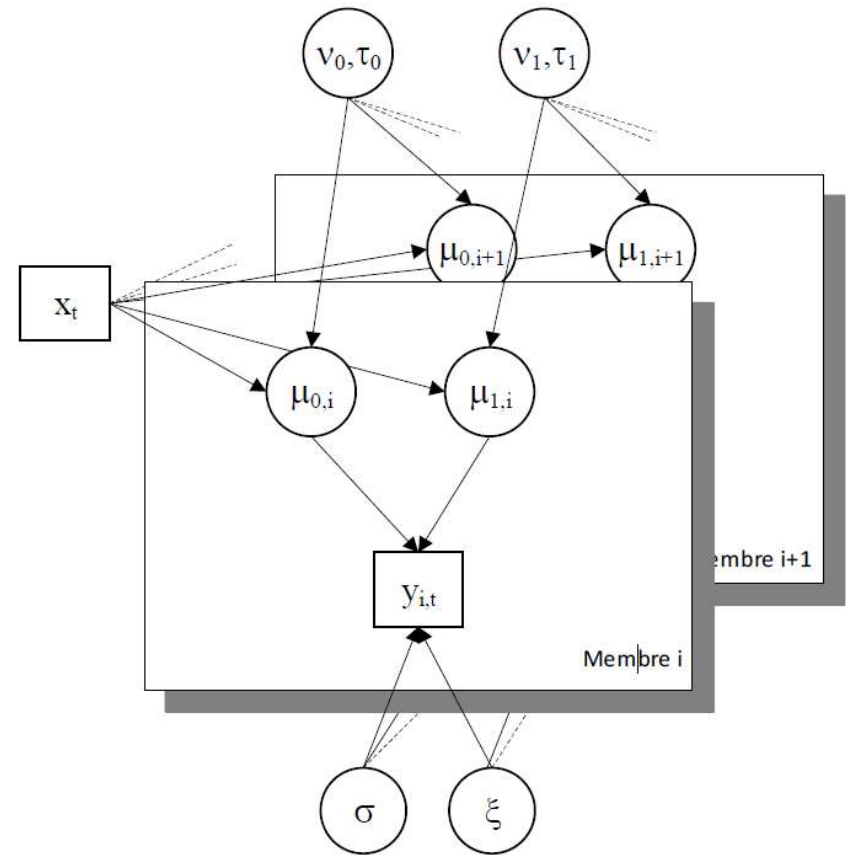
GEV non-stationnaire en chaque cellule pour une durée D donnée

$$F(y_{i,t} | \mu_i(t), \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{y_{i,t} - \mu_i(t)}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

$$\mu_i(t) = \mu_{0,i} + \mu_{1,i} x_t$$



(b) GES pondérés



Nolet-Gravel E. et Jalbert, J. (2019)

Facteur de correction

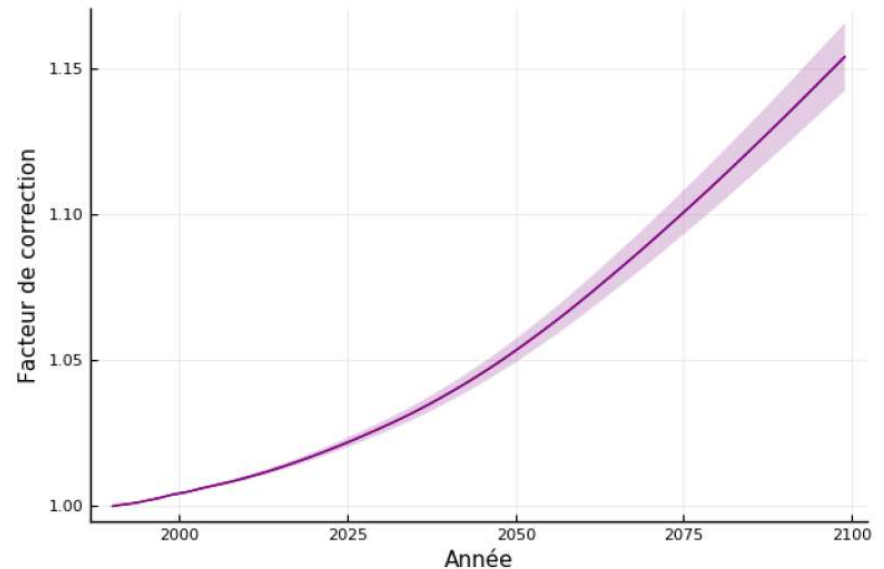
Impact des CC pour une durée D donnée

Définition tirée de Jalbert (2017) :

$$\delta_T(t_1, t_2) = \frac{\bar{y}_T(t_2)}{\bar{y}_T(t_1)}$$

où $\bar{y}_T(t)$ correspond à la moyenne des 50 quantiles de l'année t de période de retour T .

Estimation du facteur de correction à partir de 1990 pour une période de retour de 20 ans et une durée de 24h avec un intervalle de crédibilité à 95%



Facteur de correction

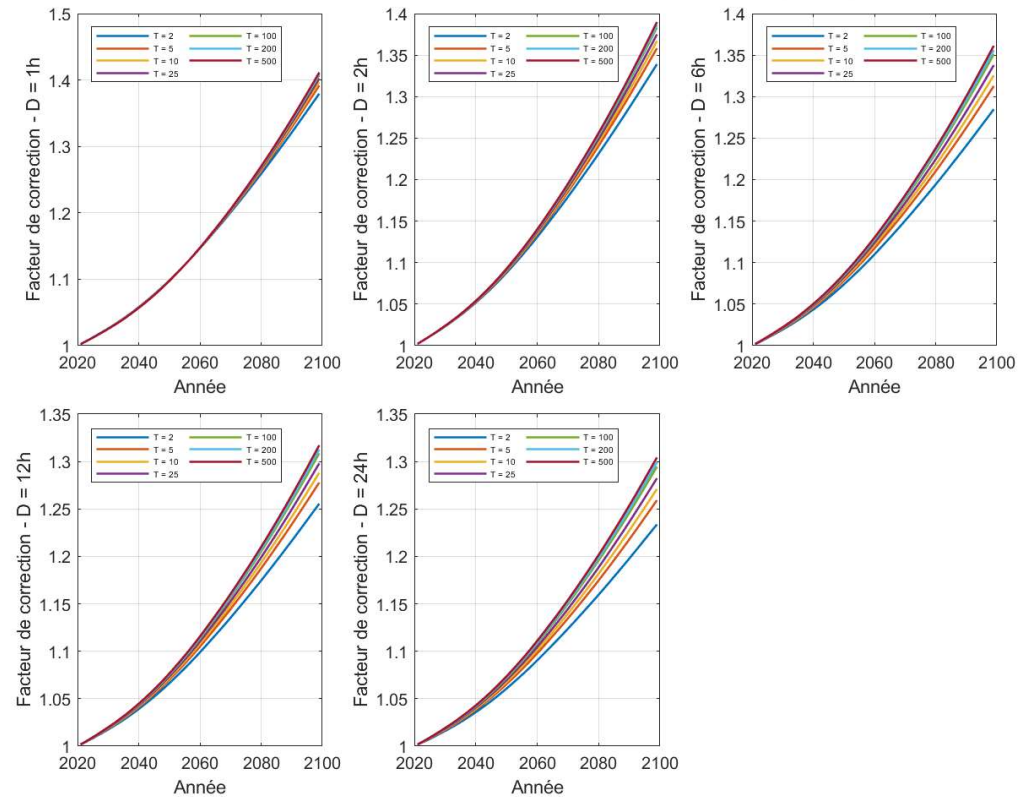
Impact des CC pour une durée D donnée

Définition tirée de Jalbert (2017) :

$$\delta_T(t_1, t_2) = \frac{\bar{y}_T(t_2)}{\bar{y}_T(t_1)}$$

où $\bar{y}_T(t)$ correspond à la moyenne des 50 quantiles de l'année t de période de retour T .

Facteurs de correction 2021-2099 : Poste La Grande-2 (37202)



Conclusion

Conclusion

- Nouvelle approche pour l'estimation des courbes IDF en climat stationnaire en tout point du territoire
 - **Gain en fiabilité** : utilise la loi GEV et prend en compte l'hétérogénéité spatiale
 - **Gain en précision** : exploite et valorise davantage d'information
- Prise en compte des changements climatiques
- Transfert technologique aux opérations en cours à Hydro-Québec
- Courbes IDF reconnues par le ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MDELCC)

Quelques perspectives

- Climat stationnaire
 - Spatialiser le paramètre de forme
 - Prendre en compte la dépendance inter-durées
- Climat non-stationnaire
 - Intégrer la non-stationnarité dans les autres paramètres
 - Spatialiser
 - Considérer d'autres projections climatiques
- ...