



RAPPORT MÉTHODOLOGIQUE OUTILS FACILITANT LES ANALYSES DES RISQUES AUX INFRASTRUCTURES POSÉS PAR LE CLIMAT

Rédigé par : Sarah-Claude Bourdeau-Goulet et David Huard

Équipe de projet : Pascal Bourgault, Sarah Gammon, Gabriel Rondeau-Genesse, Isabelle Charron, Louis-Philippe Caron, Travis Logan

Ouranos

1^{er} mai 2025

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Contexte et objectifs | 6 |
| 2 | Comité consultatif du projet | 8 |
| 3 | Scénarios climatiques | 10 |
| 3.1 | Données d'observations | 10 |
| 3.2 | Simulations climatiques | 11 |
| 3.3 | Post-traitement des simulations climatiques | 12 |
| 3.3.1 | Détection et correction d'anomalies dans les données | 13 |
| 3.3.2 | Validation du post-traitement | 16 |
| 4 | Probabilité d'occurrence d'aléas climatiques | 24 |
| 4.1 | Calcul des indicateurs climatiques | 26 |
| 4.2 | Choix de distributions statistiques | 29 |
| 4.3 | Mélange de distributions | 31 |
| 4.3.1 | Pondération des modèles climatiques en fonction de leur réalisme | 33 |
| 4.3.2 | Pondération des modèles climatiques en fonction de leur sensibilité climatique | 34 |
| 4.3.3 | Pondération des scénarios de concentrations de GES | 36 |
| 4.4 | Analyse de la vraisemblance | 39 |
| 5 | Implémentation logicielle | 41 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.1 | Les services de calculs - backend | 41 |
| 5.2 | L'interface graphique - frontend | 41 |
| 5.3 | Visuel du prototype d'interface graphique | 42 |
| 6 | Limitations et incertitudes | 46 |
| 7 | Conclusion | 48 |
| | Références | 49 |
| A | Évaluation des scénarios climatiques | 52 |

Résumé exécutif

Dans le cadre de l'appel de projets pour l'Initiative de recherche et de connaissances de Logement, Infrastructures et Collectivités Canada, Ouranos et ses partenaires, l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) et CBCL, ont proposé le développement d'outils facilitant les analyses des risques aux infrastructures posés par le climat. Ces outils ont pour objectif de s'intégrer à des protocoles d'analyses de risques, tels que le Protocole du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) et la norme ISO 14091. Pour y parvenir, plusieurs livrables ont été produits, tels que des services de calculs de probabilités de différents aléas climatiques, un prototype d'interface graphique et des fiches techniques sur des concepts clés.

Ce document décrit la méthodologie développée par Ouranos afin de fournir aux professionnels de l'analyse de risques une probabilité d'occurrence pour une période de référence (historique) et future d'aléas climatiques ayant des impacts sur les infrastructures. Cette méthodologie consiste en plusieurs étapes. Premièrement, un important jeu de données climatiques a été produit en corrigeant le biais de simulations participant au *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* aux stations des Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées produites par Environnement Canada. Les données aux stations ainsi que les simulations corrigées sont par la suite considérées pour calculer les indicateurs climatiques, tel que le cumul de degrés-jour de chauffage annuels sous 18°C. Une distribution statistique est ensuite ajustée aux résultats obtenus. Les distributions d'indicateurs provenant de simulations climatiques sont finalement pondérées en fonction de la performance et la sensibilité climatique du modèle ainsi que de la probabilité du scénario de gaz à effet de serre afin de former un mélange de distributions pondérées. Les fonctions de survie des mélanges de distribution des périodes historique et future sont employées pour déterminer les probabilités d'occurrence (valeurs de 0 à 1) d'aléas correspondant à un seuil de conséquence choisi par l'utilisateur. Dans le cas des degrés-jour de chauffages, ce seuil pourrait être de 4200°C correspondant à la valeur du Code national du Bâtiment de conception pour la station de Montréal.

Les données et la méthodologie produites sont accessibles via deux types d'interfaces ; un service de calculs basé sur les conventions du *Open Geospatial Consortium* ainsi qu'une maquette d'interface graphique accessible en ligne. Les services de calculs sont accessibles via une interface de programmation d'application (API, en anglais) accessible via un lien *URL* et les données sont stockées grâce aux services MinIO. L'interface graphique permet aux utilisateurs sans expérience de programmation d'accéder aux services de calculs, en plus d'offrir un visuel des différentes étapes de la méthodologie (choix des stations, paramétrisation des aléas climatiques, séries temporelles historique et future ainsi que les probabilités d'occurrence). Des

exemples de *Notebook* ont aussi été développés afin de présenter des façons d'intégrer la méthodologie dans une chaîne de traitement *Python*.

Une des retombées de ce projet est une approche de pondération permettant d'estimer la probabilité d'excéder un seuil climatique tout en tenant compte des principales sources d'incertitudes entourant les projections climatiques. Il est important de mentionner que l'ensemble de ce projet constitue un effort de recherche et développement, et que la méthodologie exige une évaluation scientifique complète afin de déterminer sa sensibilité aux hypothèses et choix faits dans le cadre du projet. De plus, un important travail de vulgarisation scientifique doit être fait pour la maquette d'interface graphique avant que celle-ci ne soit rendue disponible pour un grand public. **Son utilisation devrait donc se limiter aux analyses qualitatives de risques, et non à des fins de conception d'infrastructure.**

1. Contexte et objectifs

Plusieurs réglementations, subventions canadiennes ainsi que certifications environnementales, telles qu'Envision et LEED, exigent désormais une analyse des risques des changements climatiques sur les infrastructures afin d'assurer leur résilience dans le temps. Il existe plusieurs normes et protocoles, tels que la norme ISO 14091 et le protocole du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP), pour encadrer la réalisation de ces analyses. Généralement, ces protocoles prescrivent la mise en place d'une matrice de risques dans l'étape d'appréciation du risque afin de classer le risque couru par chacune des composantes de l'infrastructure. Ce risque est calculé par la multiplication de la probabilité d'occurrence d'un aléa climatique par ses conséquences sur la composante d'infrastructure (CVIIP). Or, évaluer la probabilité d'occurrence d'aléas climatiques demande un accès à d'importants volumes de données climatiques. De plus, l'analyse et l'interprétation de ces données exigent une expertise pointue en science du climat ainsi que des calculs parfois complexes.

Dans la pratique, le professionnel doit établir une liste d'aléas climatiques susceptibles d'affecter les composantes de l'infrastructure ou du système étudié dans l'analyse de risques climatiques. Dans ce contexte, un aléa n'est pas nécessairement un événement catastrophique causant la perte d'une infrastructure, mais peut aussi être une condition accélérant sa détérioration, comme un cycle de gel-dégel. Il arrive également qu'une infrastructure soit résiliente à un aléa jusqu'à un certain seuil, à partir duquel les dommages sont encourus, comme une pluie journalière supérieure à 50 mm.

Une fois la liste d'aléas climatiques établie, le professionnel doit déterminer la probabilité d'occurrence ou de dépassement de chaque aléa. Cette probabilité peut être décrite qualitativement, par une probabilité d'occurrence (0 à 100 %), par une criticité basée sur une échelle de temps ou par une récurrence (tel que 1 en 100 ans). Par souci de simplicité, la probabilité d'occurrence est souvent traduite en score de vraisemblance, soit une échelle divisée en catégories allant de «peu probable» à «très probable», à laquelle des valeurs numériques sont associées, par exemple allant de 1 à 5. Chaque aléa est donc associé à un score de vraisemblance en climat historique, par exemple de 1981 à 2010, et futur (e.g., 2051–2080), selon différents scénarios de concentrations de gaz à effet de serre (GES).

Estimer ces scores de vraisemblance à partir de projections climatiques n'est pas une tâche simple. Les professionnels doivent d'abord acquérir des projections climatiques via des portails en ligne comme le site Portraits Climatiques ou Données Climatiques Canada, où sont offerts une variété d'indicateurs en climat historique et futur. Si un indicateur n'est pas disponible, il doit être calculé à partir de variables climatiques de base (précipitation, température, etc.)

extrêmement volumineuses. Par la suite, le calcul des probabilités d'occurrence d'aléas peut se faire à l'aide d'une analyse statistique, ou tout simplement en calculant le nombre d'occurrences dans les périodes étudiées (CVIIP). Toutefois, bon nombre d'indicateurs ne sont ni disponibles sur les différentes plateformes climatiques ni faciles à calculer à partir des variables de base, tels que les vents violents ou l'érosion côtière. Les professionnels doivent donc utiliser leur jugement ou se baser sur la littérature afin d'obtenir un score de vraisemblance.

Les protocoles d'analyses de risques présentent différentes méthodologies pour classer les probabilités d'occurrence avec des scores de vraisemblance (P) allant de 1 à 5 ou 1 à 7. Ce sont ces scores de vraisemblance qui sont multipliés à des scores de conséquences (C) pour obtenir un score mesurant le risque (R) (Ouranos & MELCCFP, 2024) :

$$R = P \times C.$$

Il est ainsi possible de comparer les risques des différents aléas sur les différentes composantes d'une infrastructure et d'identifier les priorités en termes d'adaptation et de gestion de risque.

Pour que l'évaluation des risques climatiques devienne une activité de routine uniformisée et reproductible, des outils d'analyse doivent être mis à la disposition des professionnels de l'analyse de risques, dont les ingénieurs, dans un langage et un format compatibles avec les pratiques courantes. Ce projet vise donc à synthétiser l'information climatique disponible afin de quantifier les probabilités d'aléas en climat futur, et pouvoir ainsi fournir un chiffre décrivant la probabilité de dépassement d'un seuil, pour un lieu et une période donnée, qui puisse être incorporé dans une analyse de risques.

La méthodologie présentée dans ce document décrit les différentes données et analyses requises pour atteindre les objectifs suivants :

- fournir une valeur unique pour quantifier les risques climatiques, intégrant les principales sources d'incertitudes climatiques ;
- s'intégrer dans les pratiques courantes des ingénieurs et autres professionnels des analyses de risques ;

Afin d'atteindre ces objectifs, des hypothèses ont dû être réalisées, notamment sur la pondération des modèles climatiques et des scénarios de GES, afin de produire un seul chiffre à incorporer dans la matrice de risques. Ces hypothèses simplificatrices sont indiquées clairement dans ce document afin d'orienter des travaux ultérieurs visant à améliorer la robustesse des résultats.

2. Comité consultatif du projet

Afin de s'assurer que les différents outils développés dans le cadre du projet répondent aux besoins des professionnels de l'analyse de risques, un comité consultatif a été mis sur place. Le comité avait pour but de valider les différents choix faits par l'équipe de projet et de donner des rétroactions aux étapes clés du projet tel que les choix méthodologiques. Les membres du comité ont été sélectionnés de façon à représenter une diversité de milieux d'application de l'analyse de risques tels que des municipalités et des firmes de génie-conseil de différentes tailles, des organismes à but non lucratif ainsi que des ministères provinciaux.

Table 2.1 – Membres du comité consultatif du projet

| Membre | Affiliation |
|------------------------|--|
| Adrian Prado | ClimAtlantic |
| Annie Lamalice | Infrastructure Canada |
| Alain Mailhot | Institut national de recherche scientifique |
| Alexis Dufour | Hydro Québec |
| Catherine Dubois | Société québécoise des infrastructures |
| Clara Champalle | Ouranos |
| Daniel Lavallée | Ministère des Transports et de la Mobilité durable |
| Élaine Brière | MELCCFP |
| François Groux | Fluvio |
| Isabelle Charron | Ouranos |
| Justine Beaudart | CERIU |
| Guy Felio | Dr. Infrastructure |
| Jean-Philippe Martin | Hydro-Québec |
| Léa Braschi | CBCL |
| Maéva Ambros | CERIU |
| Marie-Ève Boucher | Ville de Québec |
| Nathalie Bleau | Ouranos |
| Pascal Marceau | Ministère de la Sécurité Publique |
| Pascal Lavoie | Infrastructure Canada |
| Réjean Fortin | Ville de l'Anse-Saint-Jean |
| Ursule Boyer-Villemare | MELCCFP |

Les membres du comité ont notamment été consultés afin de déterminer les indicateurs climatiques qu'ils considèrent comme importants à leur pratique. Le comité consultatif a également

effectué deux rondes de révision des fiches techniques et a fourni des recommandations sur une version initiale du prototype d'application.

3. Scénarios climatiques

Cette section décrit la méthodologie employée pour créer des scénarios climatiques à partir de données observées aux stations d'Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC). Les stations d'ECCC ont été utilisées dans le cadre du projet puisqu'elles sont fréquemment utilisées en pratique par les professionnels de l'analyse de risques.

3.1 Données d'observations

En science du climat, les données historiques d'observations proviennent typiquement de trois sources : des stations d'observation, des données de télédétection et des réanalyses. La pratique courante en ingénierie consiste à utiliser les données des stations d'observation, puisqu'elles sont généralement disponibles sur de longues périodes en régions habitées et récoltées par des organisations fiables. Pour cette raison, la méthodologie présentée dans le projet s'appuie sur les données des stations d'observation et, plus spécifiquement, le jeu de Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées (DCCA) créé et maintenu par ECCC. Ces données sont ajustées statistiquement par ECCC à différentes stations afin de corriger les discontinuités indépendantes du climat, telles que les déplacements de stations, les changements d'instruments ou les problèmes de sous-captation des précipitations. DCCA a spécifiquement été créé pour les études portant sur les changements climatiques, ce qui correspond aux objectifs du présent projet (Mekis & Vincent, 2023).

Un sous-ensemble de stations a été sélectionné afin de respecter des critères de données manquantes nécessaires pour réaliser le post-traitement présenté à la Section 3.3 (Figure 3.1). Pour être sélectionnée, une station devait compter au moins 25 années où tous les mois sont valides, à l'intérieur d'une période de 35 ans. Un mois est considéré comme valide s'il a moins de 11 jours manquants et moins de 5 jours consécutifs manquants. Ces critères correspondent à ceux utilisés par l'Organisation Météorologique Mondiale (WMO, 2017). Lorsqu'une période supérieure à 35 années répond à ces critères, la période de 35 ans la plus récente est sélectionnée comme référence pour effectuer la correction de biais.

Table 3.1 – Nombre de stations DCAAH pour les variables de température et de précipitation.

| | Température | Précipitation |
|--|-------------|---------------|
| Nombre de stations DCAAH | 779 | 463 |
| Nombre de stations sélectionnées DCAAH | 692 | 439 |

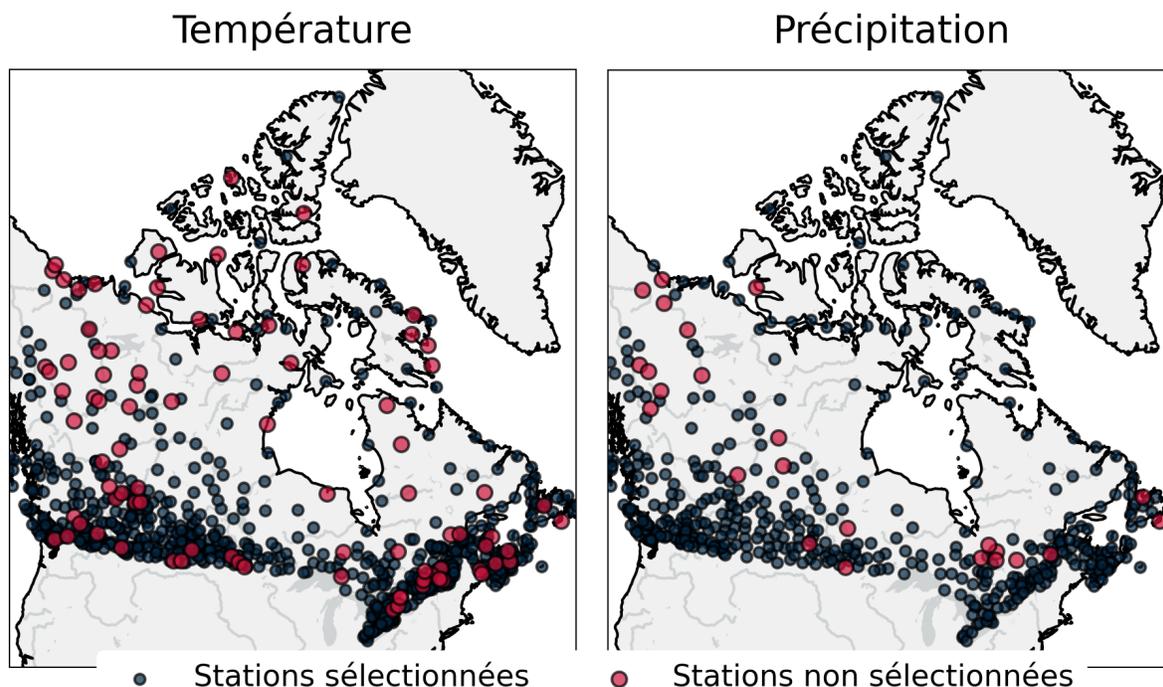


Figure 3.1 – Position des stations DCAAH pour les températures (gauche) et les précipitations (droites). Les stations satisfaisant les critères de sélection sont indiquées en bleu, alors que les stations n'ayant pas été retenues sont indiquées en rouge.

3.2 Simulations climatiques

Les simulations climatiques sont produites par des modèles climatiques globaux (GCM) et des modèles régionaux (RCM). Ces modèles simulent l'évolution du climat en réponse à des scénarios de concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols. L'évolution scientifique de ces modèles est encadrée par l'organisation d'expériences de modélisation intercomparées, coordonnées par CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*) sous l'égide de WCRP (*World Climate Research Programme*). La dernière génération de projections globales, CMIP6, est disponible depuis quelques années et constitue la base de données de projections climatiques la plus à jour.

Bien que les modèles climatiques régionaux puissent offrir une valeur ajoutée pour les variables

sensibles à la résolution spatiale, tels que la précipitation et les vents, la variété de modèles et le nombre de simulations disponibles sont moins grands que pour les modèles globaux. Ainsi, afin de maximiser le nombre de simulations disponibles pour l'analyse de risques, le choix a été fait de s'appuyer sur les modèles globaux de l'ensemble CMIP6. Plus spécifiquement, les projections tirées des expériences SSP (*Shared Economic Pathway*), soient SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5, sont utilisées ici.

Dans le cadre du projet, les simulations de CMIP6 ont été acquises via un catalogue du projet Pangeo permettant d'accéder aux données se trouvant sur la plateforme infonuagique de Google (Pangeo/ESGF Cloud Data Working Group, 2024). Seuls les fichiers de précipitation et de température (maximale et minimale) en format Zarr, de fréquence journalière et sans valeur manquante, ont été utilisés dans le cadre du projet. Le téléchargement des données a été réalisé avec le langage de programmation Python à l'aide de la librairie xscen (Rondeau-Genesse et al., 2023). Le Tableau 3.2 présente le nombre de simulations utilisées dans le cadre du projet par SSP et par variable.

Table 3.2 – Nombre de simulations et modèles utilisés par SSP et variable climatique

| | | SSP1-2.6 | SSP2-4.5 | SSP3-7.0 | SSP5-8.5 |
|----------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Précipitations | Nombre de simulations | 171 | 150 | 130 | 176 |
| | Nombre de modèles | 27 | 31 | 28 | 33 |
| Températures | Nombre de simulations | 150 | 132 | 121 | 158 |
| | Nombre de modèles | 21 | 28 | 26 | 29 |

Il est important de noter que les fichiers se trouvant dans les catalogues de Pangeo et hébergés sur les plateformes infonuagiques de Google et d'Amazon ne représentent pas toujours les versions les plus récentes de certaines simulations publiées via *Earth System Grid Federation*. Toutefois, vu le grand nombre de simulations incluses dans l'ensemble, on suppose que la mise à jour des simulations à leur plus récente version aurait un impact négligeable sur les résultats.

3.3 Post-traitement des simulations climatiques

Les simulations des modèles climatiques comportent plusieurs biais : des températures trop élevées ou trop basses, une surestimation des faibles précipitations et une sous-estimation des fortes pluies, et ce, en fonction des régions et des modèles. Ces biais sont causés, entre autres, par une compréhension imparfaite des phénomènes et mécanismes climatiques, la simplification des équations numériques utilisées pour représenter le climat ainsi que la résolution spatiale grossière des modèles. Il est donc recommandé d'utiliser des techniques d'ajustement de biais (post-traitement) afin de réduire ces biais (Charron, 2016). En bref, le post-traitement établit un facteur entre des données de références (ici les observations des stations DCCA) et les simulations climatiques, afin de réduire l'écart entre les statistiques observées et simulées.

Afin de réaliser le post-traitement, toutes les simulations ont été interpolées aux sites des stations DCCA respectant les critères de données manquantes, tel que présenté à la Figure 3.1.

Par la suite, une interpolation bilinéaire a été appliquée afin d'avoir qu'une seule valeur par station pour chacune des simulations.

Le post-traitement utilisé est le *Detrended Quantile Mapping*, et suit la même méthode utilisée pour la production des scénarios climatiques ESPO-G6-R2 d'Ouranos disponible via le site web Portraits Climatiques. Le détail des calculs mathématiques est décrit dans Lavoie et al. (2024) et n'est pas reproduit ici. Ce post-traitement est appliqué aux données journalières de précipitations ainsi que les températures maximales, minimales et moyennes journalières. Comme la plupart des corrections de biais, la méthode du *Detrended Quantile Mapping* consiste à appliquer aux simulations un facteur d'échelle par quantile estimé en comparant les simulations avec les données d'observation pour la période de référence. Une différence notable avec ESPO-G6-R2 est l'utilisation des stations DCCAH, plutôt qu'une réanalyse, comme données de référence. Ainsi, en raison de variations dans la disponibilité des données, la période de référence doit être choisie indépendamment pour chaque station et chaque variable.

Tout comme pour ESPO-G6-R2, on ajuste la température journalière maximale, puis on calcule la température journalière minimale en soustrayant l'amplitude diurne ($dtr = tasmax - tasmin$) ajustée. Cette approche permet d'éviter des situations où la température minimale serait supérieure à la température maximale suite à la correction de biais. La correction de l'amplitude diurne, tout comme celle de la précipitation, se fait de manière multiplicative, alors que la correction des températures maximales est additive. La librairie xclim a été utilisée pour réaliser la correction de biais (Bourgault et al., 2023).

3.3.1 Détection et correction d'anomalies dans les données

Les données post-traitées sont évaluées afin d'identifier des anomalies pouvant pointer vers des erreurs dans la chaîne de traitement, dans les simulations climatiques ou dans les données de référence des stations DCCAH. Une des anomalies détectées concerne certaines stations DCCAH, où la même température minimale et maximale est parfois enregistrée pour une journée donnée (Figure 3.2). Plusieurs stations ont en effet plus de 60 jours où l'amplitude diurne journalière est nulle. Par conséquent, l'amplitude journalière dans les simulations post-traitées est parfois elle aussi égale à 0 pour ces stations suite au post-traitement tel qu'illustrée à la Figure 3.3 pour la station Eastleigh.

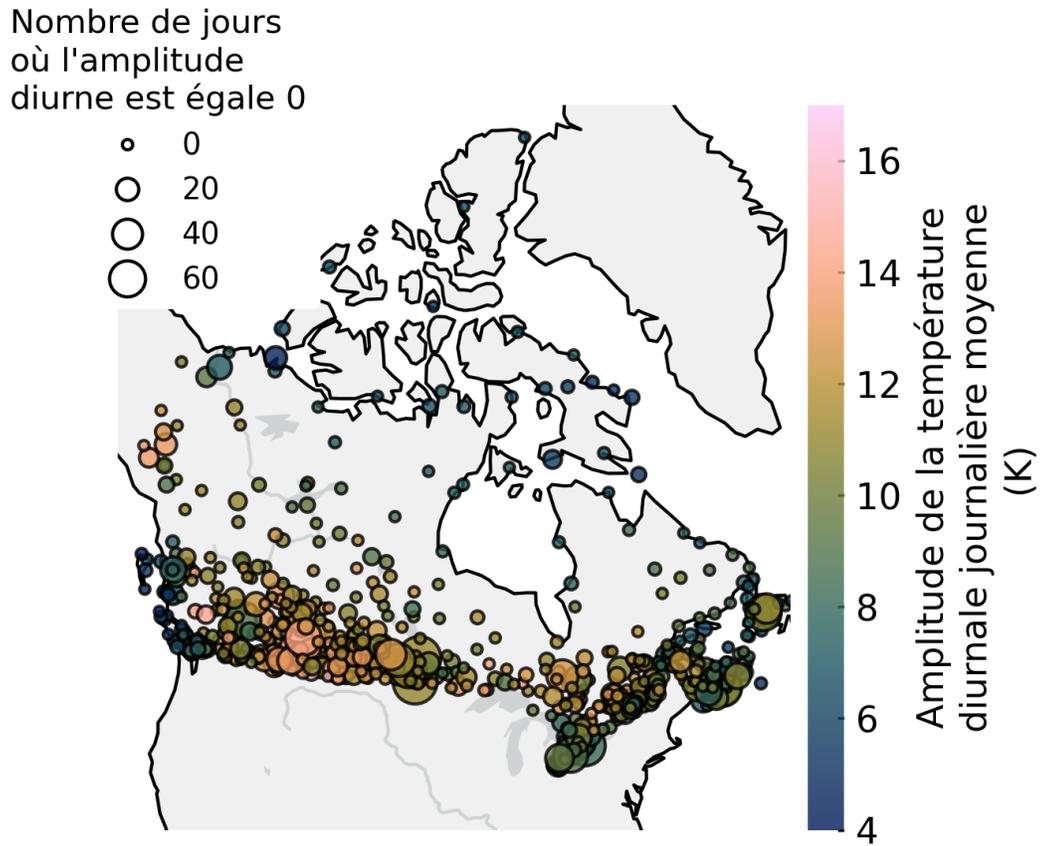


Figure 3.2 – Moyenne de l'amplitude diurne de la température pour la période de référence (indiquée par la couleur), ainsi que le nombre de jours où l'amplitude est égale à 0 (indiqué par la grosseur du point).

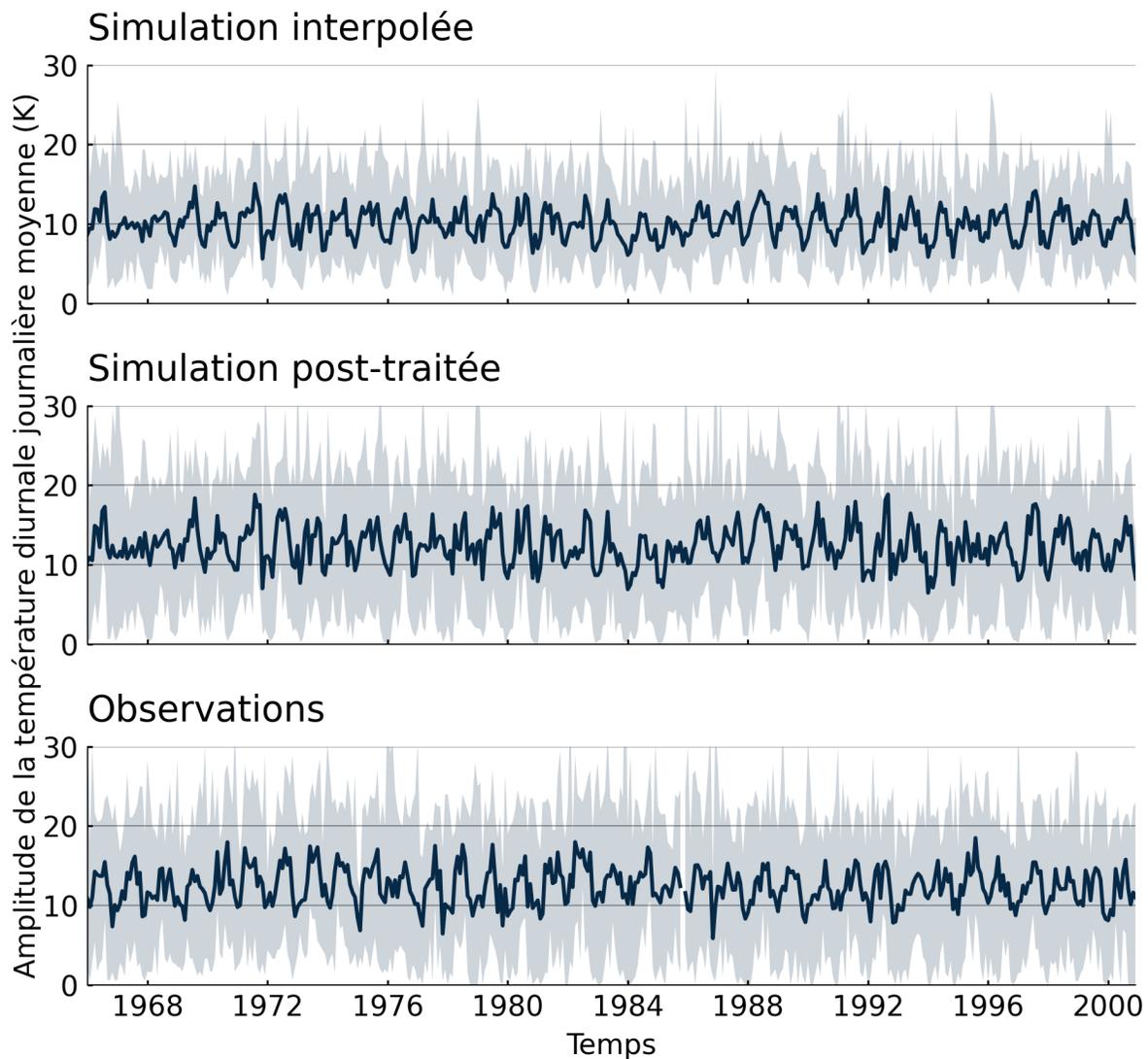


Figure 3.3 – Ensemble de l’amplitude diurne de la température journalière moyenne (°K) à la station Eastleigh en Saskatchewan, la ligne bleu foncé représente la moyenne de l’ensemble et la zone pâle le minimum et maximum. La première ligne présente l’ensemble de la simulation *EC-Earth3-Veg-LR ssp119 r3i1p1f1* sans post-traitement à la station, la deuxième ligne l’ensemble de la même simulation post-traitée et la troisième ligne les observations DCCAII toujours à la station Eastleigh.

Certaines simulations climatiques brutes présentent des précipitations négatives (entre 0 et -0,00001 mm/jour). Ce phénomène affecte 99 simulations et touche moins de 5% de leurs données. Afin d’utiliser ces simulations dans l’outil en ligne, les précipitations négatives ont été arrondies à 0 mm/jour.

3.3.2 Validation du post-traitement

Cette section vise à valider la performance de la correction de biais effectuée sur les simulations de CMIP6. Trois aspects sont analysés, soit les séries temporelles (valeurs absolues et deltas), les graphiques quantiles-quantiles et la fraction d'amélioration des simulations pour des propriétés statistiques. Uniquement les figures de températures maximales ainsi que les propriétés de températures seront présentées dans cette section, les figures de températures minimales et de précipitation se trouvent à l'Annexe A.

Tout d'abord, la Figure 3.4 présente les séries temporelles de températures maximales annuelles moyennes pour des villes peuplées au Canada. Cinq jeux de données sont utilisés pour la comparaison ; les scénarios (simulations de CMIP6 post-traitées), les simulations (simulations de CMIP6 non post-traitées), les données de stations DCCAH, la réanalyse CaSR v2.1 et la réanalyse ERA5-Land. L'interpolation bilinéaire a aussi été utilisée pour interpoler les grilles aux stations pour les deux réanalyses. La réanalyse ERA5-Land n'inclut pas certaines stations, puisqu'elle couvre uniquement les grilles sur la terre et que certaines villes peuplées se retrouvent sur des grilles d'océan, par exemple Vancouver et Iqaluit.

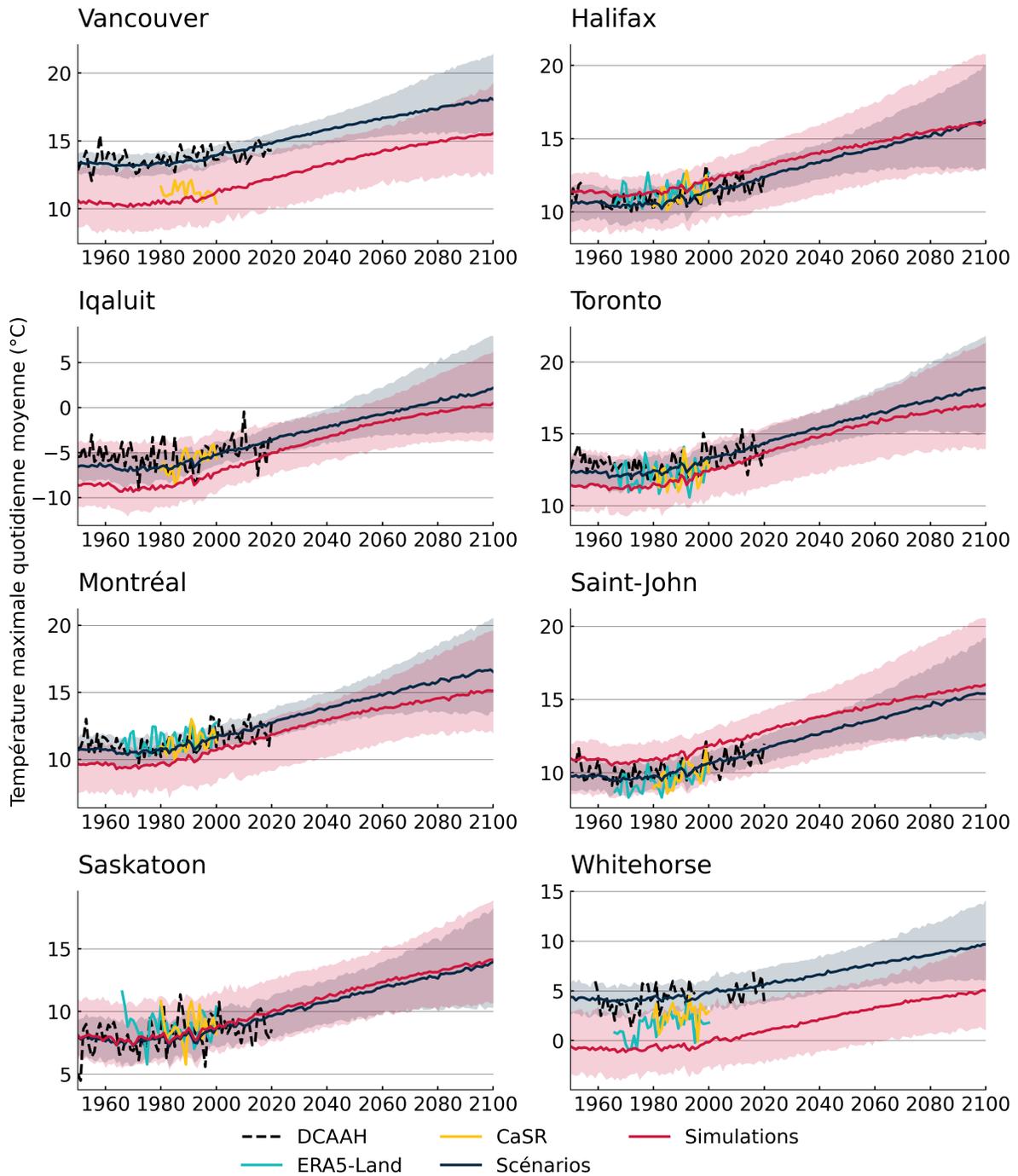


Figure 3.4 – Série temporelle de la température maximale moyenne annuelle des villes les plus peuplées de chaque province et territoire.

Il est possible de constater que la largeur de l'ensemble de valeurs des simulations CMIP6 est réduite de façon importante dans les scénarios pour la période historique (pré-2020). Cette réduction importante de la variabilité de l'ensemble pourrait être causée par l'ajustement de biais,

qui a été réalisé individuellement sur chacun des membres d'un modèle donné, plutôt que de grouper ensemble tous les membres d'un même modèle afin d'établir les relations statistiques. Cela pourrait avoir comme effet de réduire la variabilité naturelle décrite par les grands ensembles (par exemple CanESM5 et MIROC6 qui ont 50 membres) et, du même fait, réduire la variabilité de l'ensemble de scénarios. Pour certaines stations telles que Montréal, Whitehorse et Vancouver, la correction de biais des températures permet de grandement réduire l'écart entre les simulations et les observations. On constate aussi que pour Vancouver et Whitehorse, les réanalyses ont des valeurs plus près des simulations que des scénarios, soulignant le défi pour les réanalyses de reproduire le climat en zone montagneuse. Des constats similaires peuvent être tirés pour les précipitations totales annuelles et les températures moyennes minimales annuelles (voir les figures A.1 et A.2 en annexe).

La Figure 3.5 présente l'anomalie annuelle (10^e, 50^e et 90^e centiles) de la température maximale par rapport à la période 1980-2020 (simulations corrigées) et les simulations brutes (première ligne de la figure) pour la station à l'aéroport Pierre-Eliot-Trudeau de Montréal et pour les quatre scénarios de GES. Il est possible de constater que l'ajustement par quantiles utilisé pour produire les scénarios climatiques conserve le signal de changements climatiques des simulations brutes, puisque les deux courbes sont pratiquement identiques.

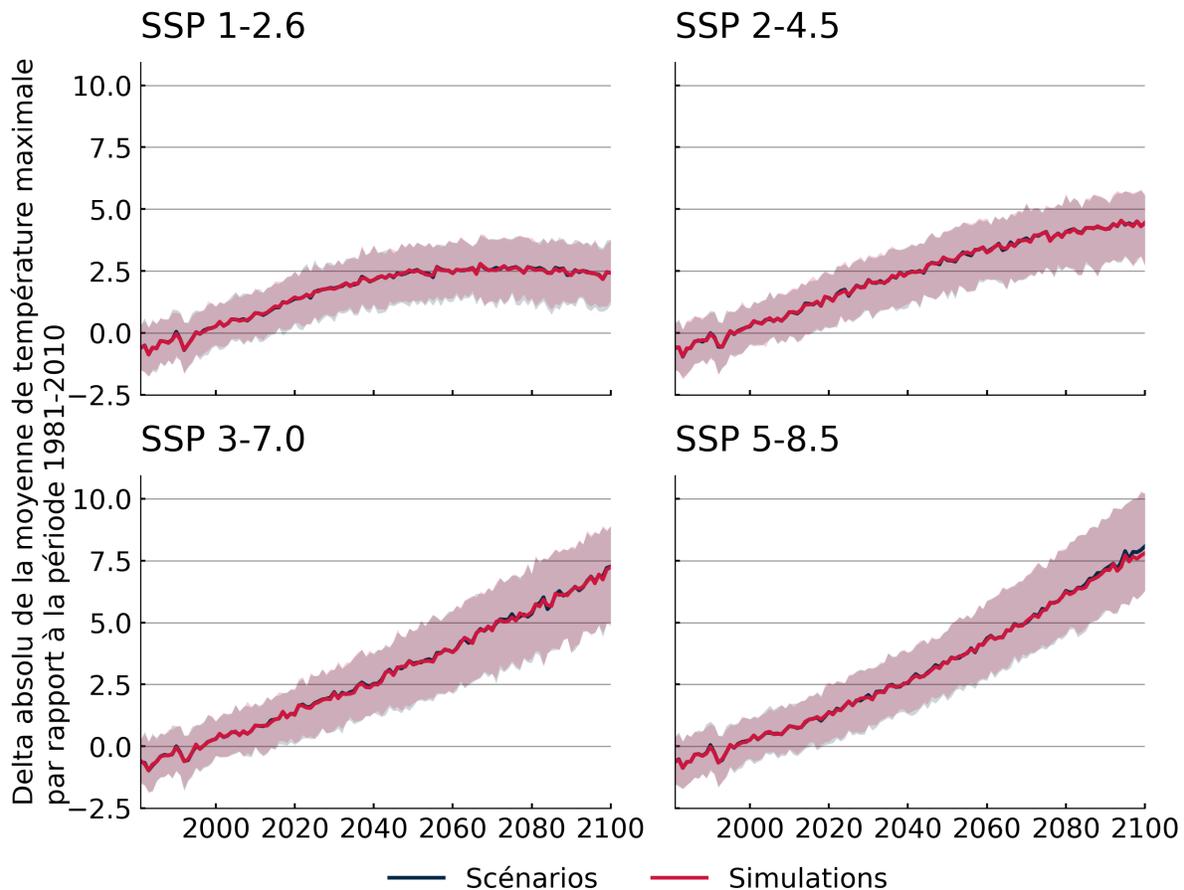
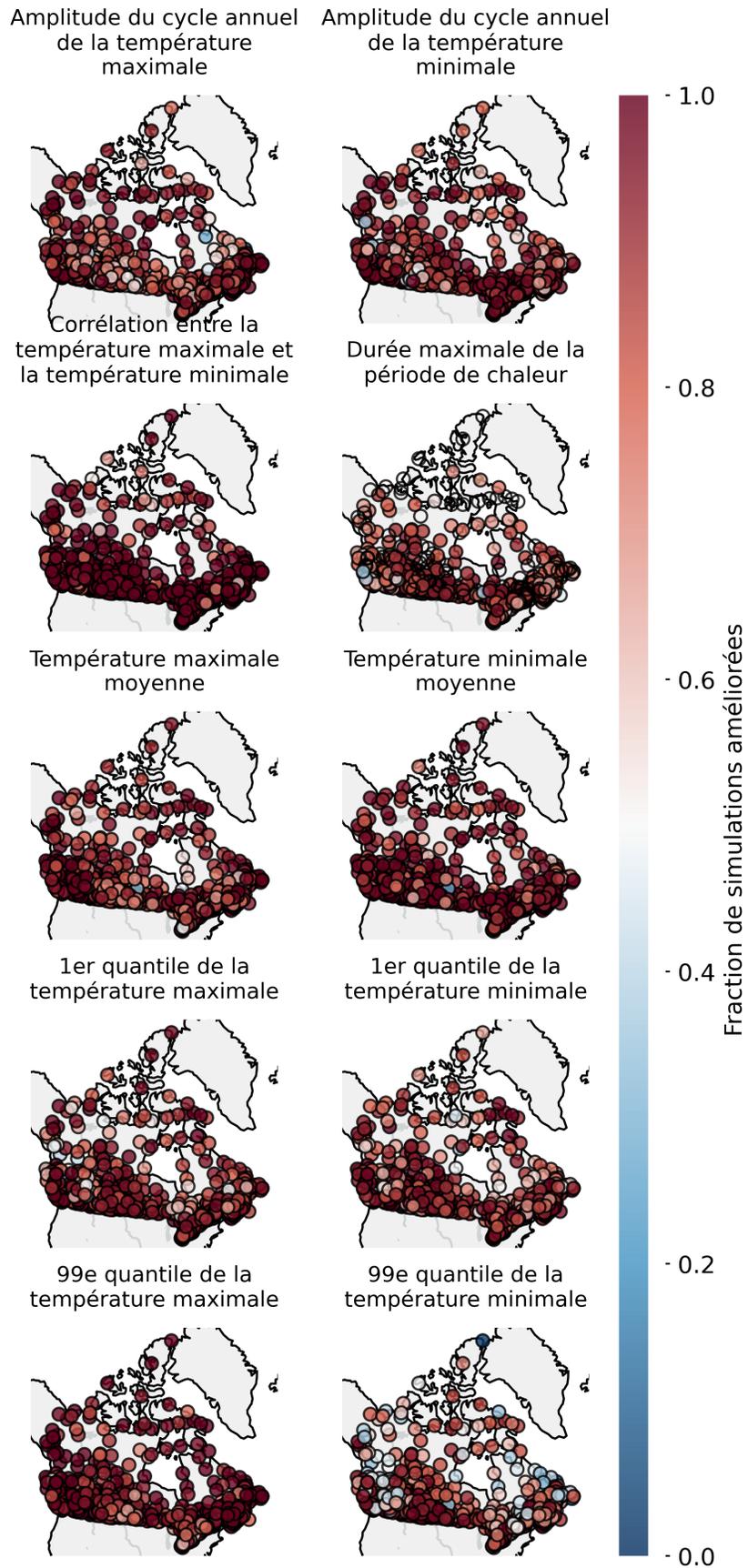


Figure 3.5 – Anomalie annuel de la moyenne de température maximale comparé à la période 1981-2010 à l’aéroport de Montréal. L’ensemble présente le 10e, 50e et 90e quantiles pour les ensembles de scénarios et simulations CMIP6.

Avant d’utiliser les scénarios produits dans un contexte d’analyse de risques, il est important de vérifier que l’ajustement de biais a permis de corriger certaines propriétés et caractéristiques des variables climatiques, notamment celles qui peuvent avoir un impact dans notre application. C’est pourquoi des statistiques de bases telles que les moyennes ou certains quantiles ainsi que d’autres propriétés telles que les périodes de chaleurs ou périodes sèches ont dû être vérifiées pour permettre l’utilisation des scénarios. Les mesures et propriétés testées sont présentées à la Figure 3.6 sous forme de fraction (0 à 1) d’amélioration entre les scénarios et les simulations brutes par rapport aux observations DCAAH sur la période 1950-2020.



20
 Figure 3.6 – Fraction des simulations pour lesquelles le post-traitement a réduit le biais, par rapport aux observations DCCAHC pour la période 1950-2020.

Généralement, les scénarios présentent une réduction du biais pour la majorité des stations et des mesures, particulièrement pour les moyennes de températures maximales et minimales ainsi que pour leur corrélation. Toutefois, certaines mesures demeurent peu améliorées comme c'est le cas pour la durée maximale de la période de chaleur. Cette propriété représente la durée la plus longue du nombre consécutif de jours où la température maximale est dans les 10 % les plus élevés. Plusieurs stations dans le nord du pays n'ont aucune amélioration pour la période maximale de chaleur, possiblement due au petit nombre d'évènements de chaleur à ces stations. Similairement, pour plusieurs stations, le calcul du 99^e quantile de la température minimale n'est amélioré que pour moins de la moitié des simulations. Cela pourrait être dû à la technique d'ajustement de biais employée, où la température minimale dans les scénarios est calculée à partir de la température maximale et de l'amplitude diurne. Cet enjeu n'apparaît toutefois pas dans le calcul du 1^{er} quantile.

La Figure A.5 dans l'Annexe A montre l'amélioration du biais pour la même période pour les mesures de précipitations. Encore une fois, la majorité des simulations s'améliorent pour l'ensemble du pays à l'exception de la fréquence des périodes sèches dans le nord et le centre du Canada.

Les modèles utilisés dans le cadre du projet ont différents biais, tel qu'illustré à Figure 3.7. Les diagrammes quantiles-quantiles comparent les quantiles de température maximale observés à la station Montréal Pierre-Elliott-Trudeau avec les quantiles des scénarios (bleu foncé) et des simulations (turquoise) pour la période 1950-2020. Idéalement, les points des scénarios corrigés devraient suivre la ligne rouge, indiquant que les quantiles des deux groupes sont similaires.

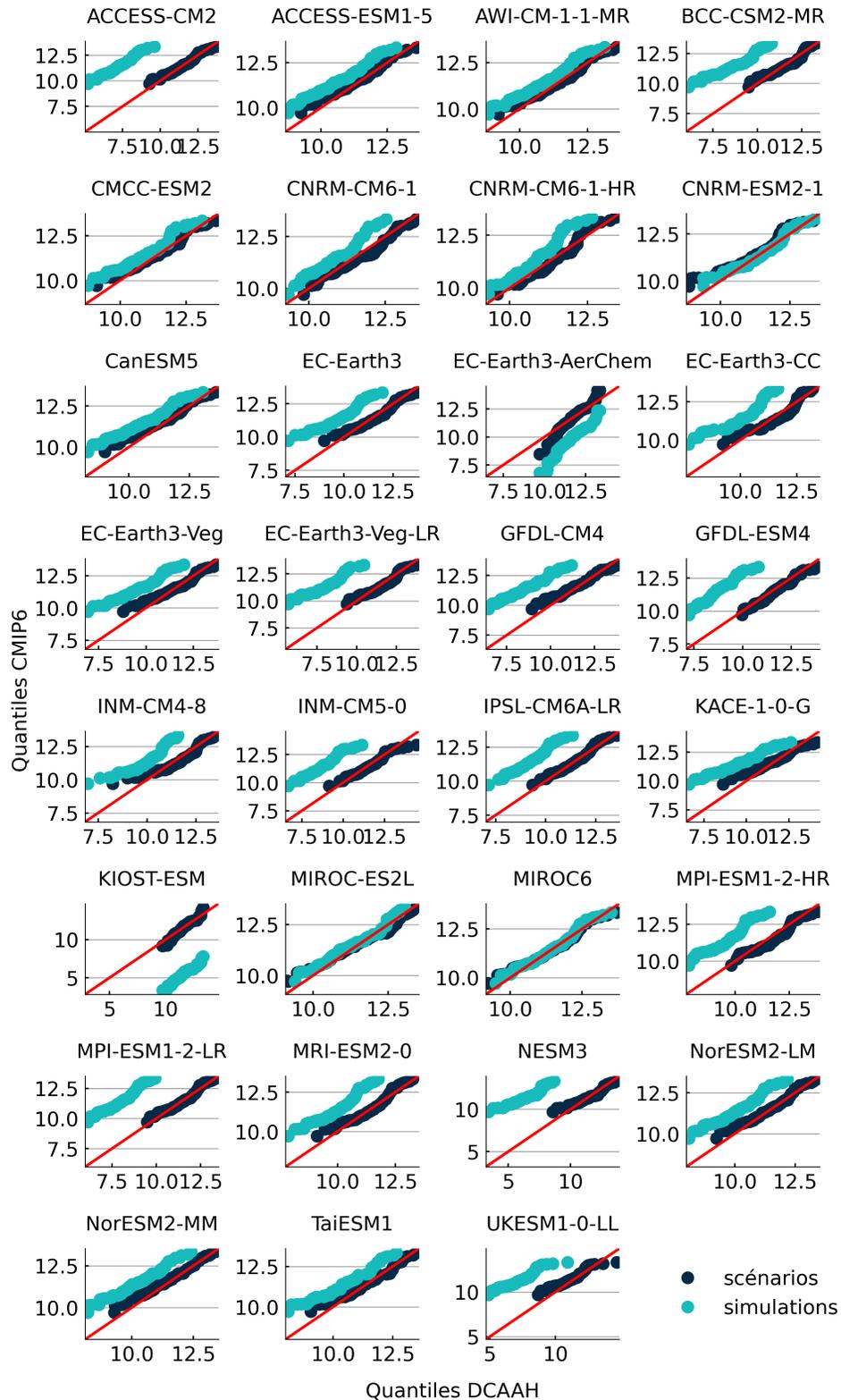


Figure 3.7 – Diagramme quantiles-quantiles des températures maximales moyennes annuelles des scénarios et des simulations, en comparaison aux observations à la station Montréal Pierre-Elliott-Trudeau pour la période 1950-2020.

Les simulations de certains modèles tels que MIROC-ES2L, MIROC6 et CNRM-ESM2-1 ont des quantiles semblables à ceux observés à la station Pierre-Elliott-Trudeau. Toutefois, pour plusieurs modèles comme ACCESS-CM2 et UKESM1-0-LL, les écarts sont importants. La correction de biais a permis de réduire les écarts entre les quantiles (points bleu foncé représentant les scénarios). Malgré qu'un modèle puisse bien représenter une des variables climatiques, cela ne signifie pas qu'il performe également bien pour une autre variable. C'est le cas pour MIROC-ES2L, dont les températures sont semblables aux observations, mais dont les précipitations diffèrent, tel que montré à la Figure A.7. Ces écarts sont toutefois réduits par l'application du *Detrended Quantile Mapping*.

4. Probabilité d'occurrence d'aléas climatiques

Cette section décrit la méthodologie développée pour estimer la distribution d'un aléa climatique en climat futur et calculer la probabilité de dépassement d'un seuil donné. Cette méthodologie est au cœur des services de calculs présentés par l'interface graphique décrit à la Section 5.3 et dont les grandes étapes sont illustrées à la Figure 4.1.

La phase de pré-traitement (Figure 4.1, en haut à gauche) consiste à générer des scénarios climatiques futurs aux sites de stations d'observation et est décrite dans la section précédente (3.3). En haut à droite, on décrit les intrants provenant de l'utilisateur :

- Les coordonnées géographiques du site d'intérêt ;
- La station choisie pour chaque variable ;
- Les indicateurs climatiques et leurs paramètres ;
- L'année de début et de fin de la période de référence ;
- L'année de début et de fin de la période future ;
- Le seuil de conséquences ;

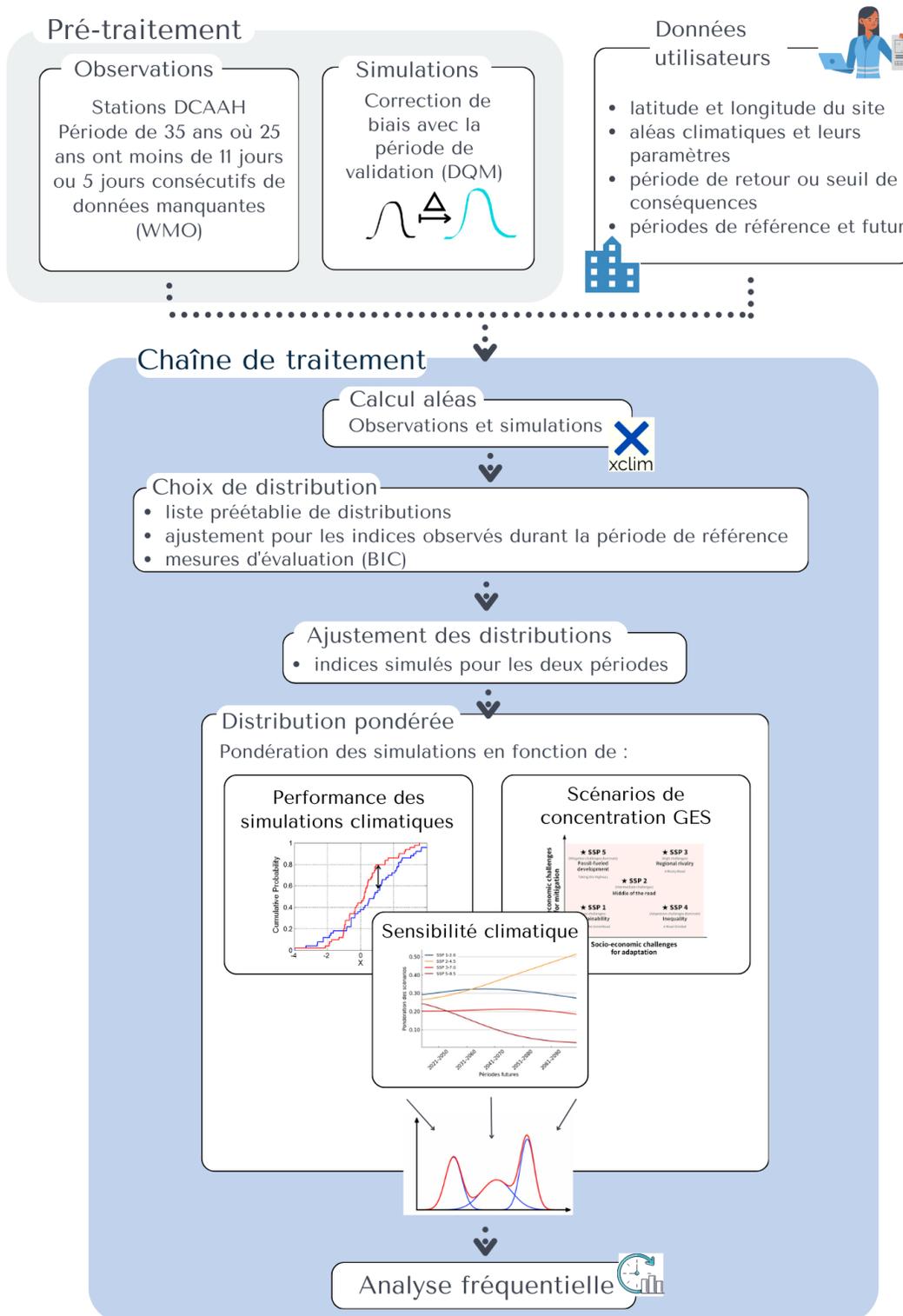


Figure 4.1 – Méthodologie de l'application en ligne pour l'estimation de la probabilité d'occurrence d'aléas climatiques.

Cette section porte donc sur la chaîne de traitement décrivant l'analyse probabiliste des aléas, et détaille les étapes clés de la méthodologie développée dans le cadre du projet. Afin d'illustrer chaque étape de la méthodologie, cette section présentera également un cas d'application pour l'évaluation des degrés-jour de chauffage à Montréal à proximité de l'Aéroport Pierre-Elliott-Trudeau avec une période de référence 1981-2010 et future 2051-2080, pour une situation où un cumul de plus de 4200°C-jours (seuil) causerait des dommages à une infrastructure basée sur le seuil de conception du Code National du Bâtiment. Le Tableau 4.1 résume les choix de l'utilisateur pour cet exemple.

Table 4.1 – Données entrées par l'utilisateur pour l'exemple d'application

| Information | Choix de l'utilisateur |
|-----------------------|--|
| Longitude | -73,56 °est |
| Latitude | 45,46 °nord |
| Station sélectionnée | Aéroport Pierre-Elliott-Trudeau (Montréal) |
| Aléa climatique | Cumul de degrés-jour de chauffage annuel sous 18°C |
| Période de référence | 1981–2010 |
| Période future | 2051–2080 |
| Seuil de conséquences | 4200°C |

4.1 Calcul des indicateurs climatiques

Un indicateur climatique est une quantité calculée à partir de variables climatiques, telles que la température moyenne (T_{moy}) ou la précipitation (P), et décrit un phénomène d'intérêt pour une application donnée. Dans le cadre du projet, ces indicateurs sont calculés à partir des données DCCAH ainsi que des scénarios climatiques décrits à la section 3.3.

Une première sélection des indicateurs est basé sur un sondage et un atelier auquel ont participé les membres du comité consultatif. L'objectif était d'identifier les indicateurs les plus pertinents à la pratique. Les indicateurs identifiés par ces activités sont présentés à la Figure 4.2.

Dans le cadre de ce projet, un sous-ensemble parmi ces indicateurs a ensuite été choisi en fonction de la disponibilité des variables et de la complexité des analyses requises à leur calcul (Tableau 4.2). Pour cette première phase de développement du projet, seulement les indicateurs calculés à partir de températures journalières moyennes (T_{moy}), minimales (T_{min}) ou maximales (T_{max}), de précipitations totales journalières (P), de précipitations maximales annuelles (P_{MA}) et de niveaux des marées en zones côtières (L) sont disponibles.

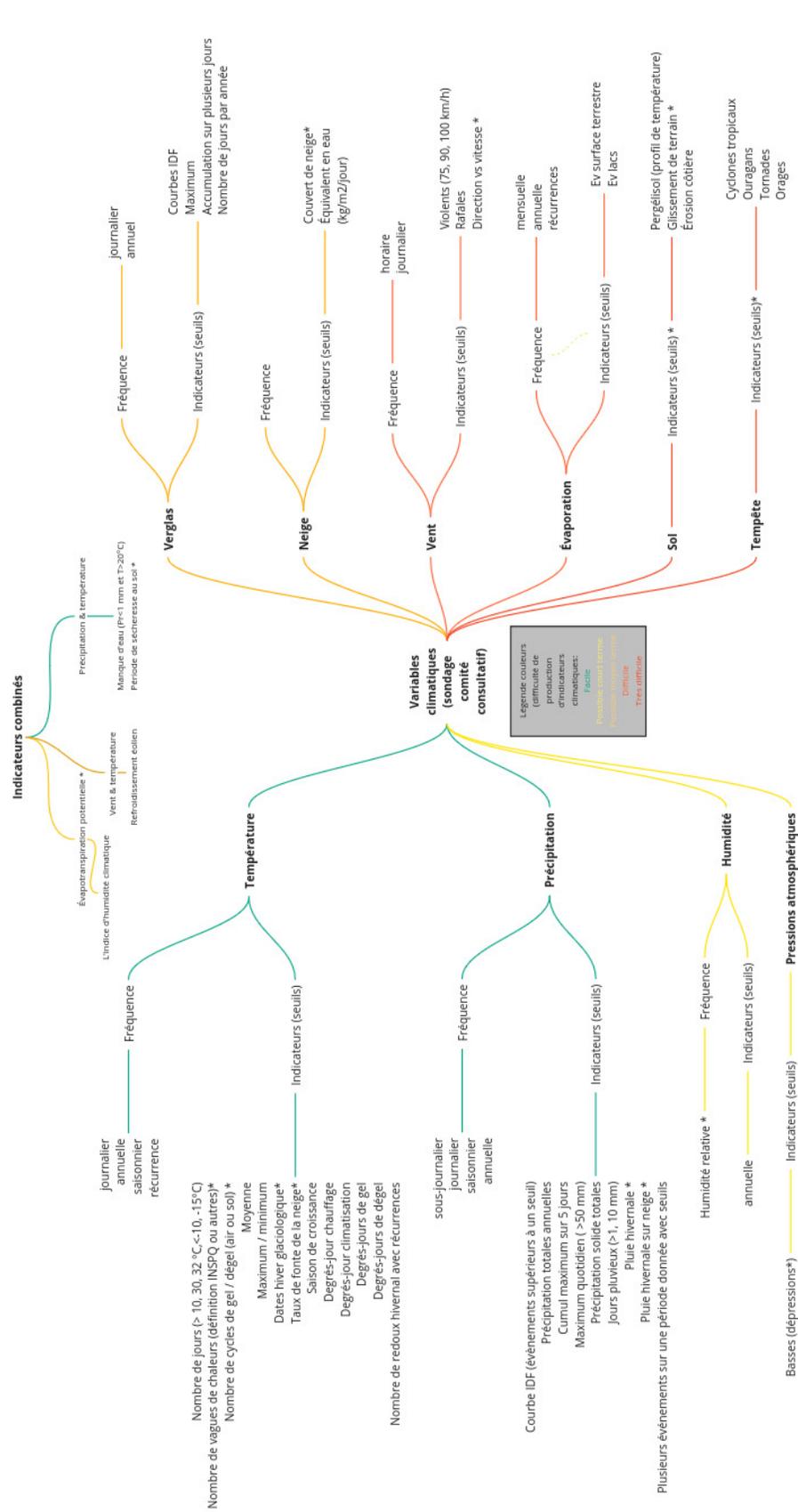


Figure 4.2 – Résultats du sondage auprès du comité consultatif pour identifier les indicateurs climatiques utiles dans l'analyse de risques aux infrastructures.

Table 4.2 – Indicateurs climatiques disponibles, paramètres et variables requises aux calculs.

| Indicateur | Paramètre | Variables |
|---|-----------|--|
| Moyenne annuelle de la température journalière | | T_{moy} ou T_{min} ou T_{max} |
| Maximum annuel de la température journalière | | T_{moy} ou T_{min} ou T_{max} |
| Minimum annuel de la température journalière | | T_{moy} ou T_{min} ou T_{max} |
| Nombre de jours où la température dépasse un seuil | Seuil | T_{moy} ou T_{min} ou T_{max} |
| Degrés-jour de chauffage | Seuil | T_{moy} |
| Degrés-jour de climatisation | Seuil | T_{moy} |
| Degrés-jour de gel | Seuil | T_{moy} |
| Degrés-jour de dégel | Seuil | T_{moy} |
| Précipitations totales | Seuil | P |
| Précipitations liquides totales | Seuil | P et T_{moy} |
| Précipitations solides totales | Seuil | P et T_{moy} |
| Précipitations maximales cumulées | Durée | P |
| Nombre de jours avec précipitation | Seuil | P |
| Nombre de jours sans précipitation | Seuil | P |
| Précipitations maximales sous-journalières ¹ | Durée | T_{moy} et P_{MA} |
| Niveau de la mer ² | | L |

Pour la majorité des aléas présentés au Tableau 4.2, l'utilisateur doit fournir des paramètres de calculs, par exemple un seuil de 18°C pour le calcul des degrés-jour de chauffage. Il est également possible pour tous les indicateurs, sauf les deux derniers, de restreindre les mois utilisés pour le calcul, par exemple de janvier à mars.

À titre d'exemple, la Figure 4.3 présente les séries temporelles de degrés-jour de chauffage calculées à partir des séries observées et simulées des scénarios CMIP6 à l'aéroport de Montréal Pierre-Elliott-Trudeau. La Figure 4.3 présente aussi une comparaison avec et sans pondération des simulations telle que décrite à la Section 4.3 en ce qui a trait à la sensibilité climatique et la performance des modèles (la pondération des scénarios de GES n'est pas appliquée dans cette figure).

¹Méthodologie décrite dans le rapport de l'INRS-ETE.

²Méthodologie décrite dans le rapport de CBCL.

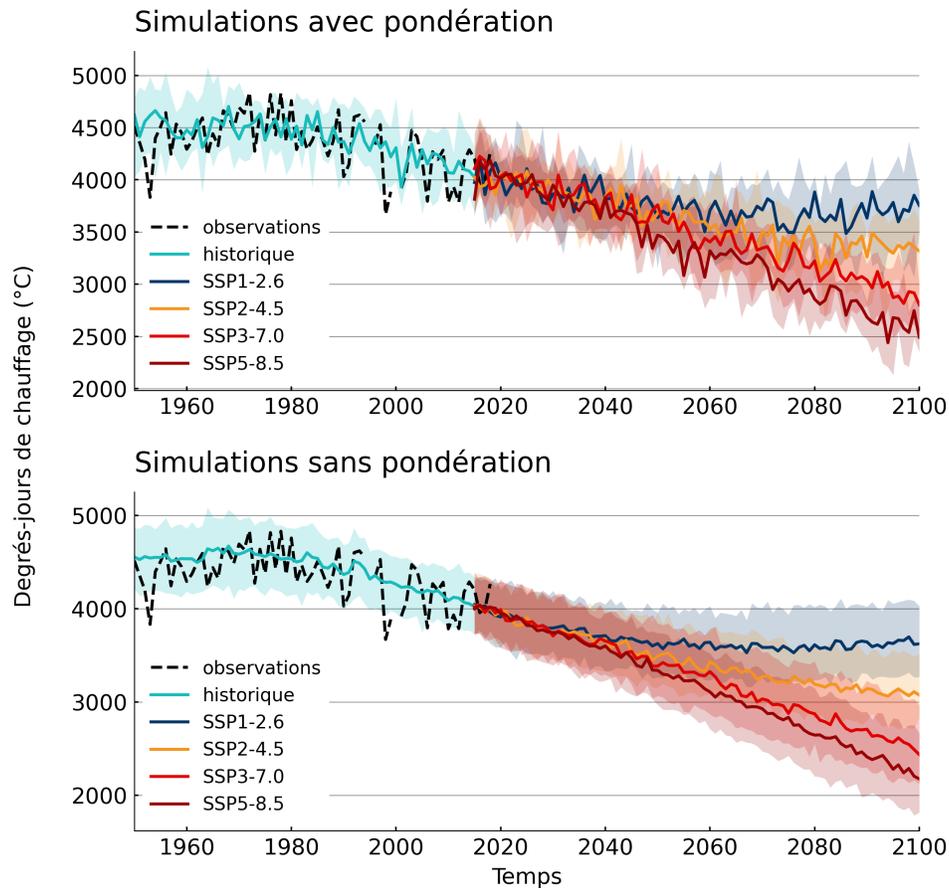


Figure 4.3 – Cumul annuel des degrés-jour de chauffage (température sous 18°C) à l'aéroport de Montréal Pierre-Eliot-Trudeau calculé à partir des observations à la station ainsi que l'ensemble (1er au 99e quantiles) de toutes les simulations CMIP6 disponibles pour 4 scénarios de concentrations de GES avec et sans pondération appliquée aux scénarios de CMIP6.

4.2 Choix de distributions statistiques

Une fois les indicateurs annuels calculés, on cherche à estimer la probabilité de dépassement d'une valeur donnée en période de référence et en période future. Pour ce faire, on doit d'abord décrire chaque échantillon (référence et futur) par une distribution statistique. Bien qu'il existe plusieurs dizaines de familles de distribution, on restreint ici le choix à un groupe de six distributions (Tableau 4.3) fréquemment utilisées en analyse fréquentielle dans la littérature (François et al., 2012 ; Naveed et al., 2004) et disponibles dans la librairie Python SciPy.

Chacune de ces distributions est ajustée aux indicateurs calculés à partir des observations aux stations pour la période de référence choisie par l'utilisateur. On calcule ensuite le critère d'information bayésien (BIC) (Datalab, 2019), et on choisit comme défaut celle qui minimise le BIC comme montré dans le (Tableau 4.4) représentant les valeurs pour notre exemple de cumul de degrés-jour à Montréal. Cependant, l'utilisateur peut faire le choix de sélectionner l'une des

Table 4.3 – Lois de probabilité et leurs paramètres de forme. On assume que les lois s'appliquent à des échantillons standardisés.

| Loi | Équation | Contraintes |
|----------------------|--|-------------------|
| Normale | $f(x) = \frac{\exp(-x^2/2)}{\sqrt{2\pi}}$ | |
| Lognormale | $f(x, s) = \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\log^2(x)}{2s^2}\right)$ | $x > 0, s > 0$ |
| Gamma | $f(x, a) = \frac{x^{a-1}e^{-x}}{\Gamma(a)}$ | $x \geq 0, a > 0$ |
| Uniforme | $f(x) = 1$ | $x \in [0, 1]$ |
| Student t | $f(x, \nu) = \frac{\Gamma((\nu+1)/2)}{\sqrt{\pi\nu}\Gamma(\nu/2)}(1 + x^2/\nu)^{-(\nu+1)/2}$ | $\nu > 0$ |
| Extremum généralisée | $f(x, c) = \exp(-(1 - cx)^{1/c})(1 - cx)^{1/c-1}$ | $c \neq 0$ |

autres distributions ci-haut. Pour les simulations, on impose la même loi de probabilité que celle choisie pour les observations.

Table 4.4 – Valeurs du critère d'information bayésien (BIC) calculées sur le cumul annuel des degrés-jour de chauffage pour les observations à l'aéroport de Montréal Pierre-Elliott-Trudeau.

| Loi | BIC |
|---------------------|---------------|
| Normale | 398,53 |
| LogNormale | 401,93 |
| Gamma | 402,82 |
| T | 402,93 |
| Uniforme | 393,72 |
| Extremum généralisé | 397,51 |

Bien que la distribution uniforme minimise le critère BIC, une validation visuelle permet de constater qu'il ne s'agit pas du meilleur ajustement pour nos données d'observations (Figure 4.4). Effectivement, la loi d'extremum généralisé, deuxième choix après l'uniforme selon le critère BIC, semble beaucoup mieux s'aligner sur les valeurs de l'histogramme des données d'observations DCAAH. C'est pourquoi un choix a été fait d'utiliser la loi Extremum généralisée plutôt qu'uniforme pour la suite de cet exemple. Cela permet aussi de montrer une limite de la méthodologie, et de souligner l'importance de laisser à l'utilisateur le choix de la loi statistique dans l'application en ligne.

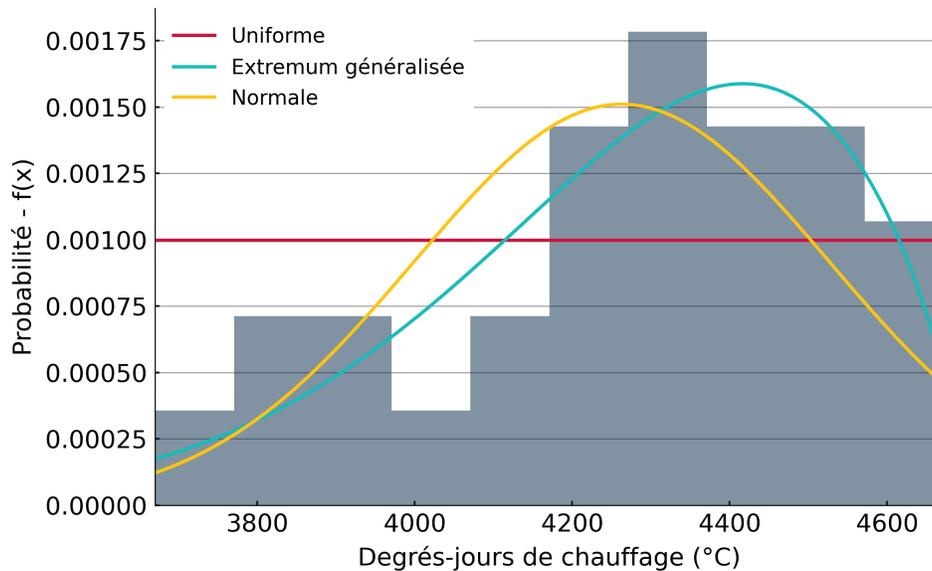


Figure 4.4 – Ajustement de trois distributions statistiques (Uniforme, Normale et Extremum généralisé) sur l’histogramme des données DCAAH de cumul degrés-jour sous 18°C à l’aéroport de Montréal pour la période de référence 1981-2010.

4.3 Mélange de distributions

Une fois la loi de probabilité choisie pour la série observée, on peut calibrer les paramètres de cette même loi en regroupant les scénarios (simulations CMIP6 corrigés) par modèle et par scénarios de concentration GES. Puisqu’on dispose de plus de 500 simulations (voir le Tableau 3.2), le défi est de combiner ces centaines de lois de probabilité de manière cohérente. Il a été choisi de combiner les *variant_label* (membres) par *source_id* (modèles) afin d’avoir une meilleure paramétrisation des distributions en fournissant un plus grand nombre de données (regroupement de tous les membres d’un seul modèle). On obtient ainsi, pour chaque modèle, une loi de probabilité pour la période de référence et quatre lois pour la période future (pour chaque scénarios de concentration GES).

L’objectif du projet est de définir une loi de probabilité future unique, tenant compte des principales sources d’incertitudes climatiques. De cette manière, les praticiens pourront incorporer directement la vraisemblance des aléas climatiques dans une matrice de risques. On propose ici de combiner les lois estimées des scénarios en effectuant un mélange de lois pondérées.

Un mélange de lois représente une somme de plusieurs lois de probabilité représentant chacune un échantillon. Chaque loi peut être accompagnée d’un facteur de pondération w_i indi-

quant son importance relative :

$$F(x) = \sum_{i=1}^n w_i F_i(x), \quad (4.1)$$

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x), \quad (4.2)$$

où f représente la fonction de densité, et F la fonction de répartition.

La Figure 4.5 présente le concept de mélange de distributions (panneau de droite) des scénarios CMIP6 en comparaison avec la distribution d'extremum généralisé des données DCAAH pour la période de référence 1981-2010 dans notre exemple. Il est aussi possible de constater deux types de mélange de lois dans la figure de droite, avec et sans pondération. L'application en ligne emploie une pondération associée à l'ensemble CMIP6 décrite dans les sections suivantes.

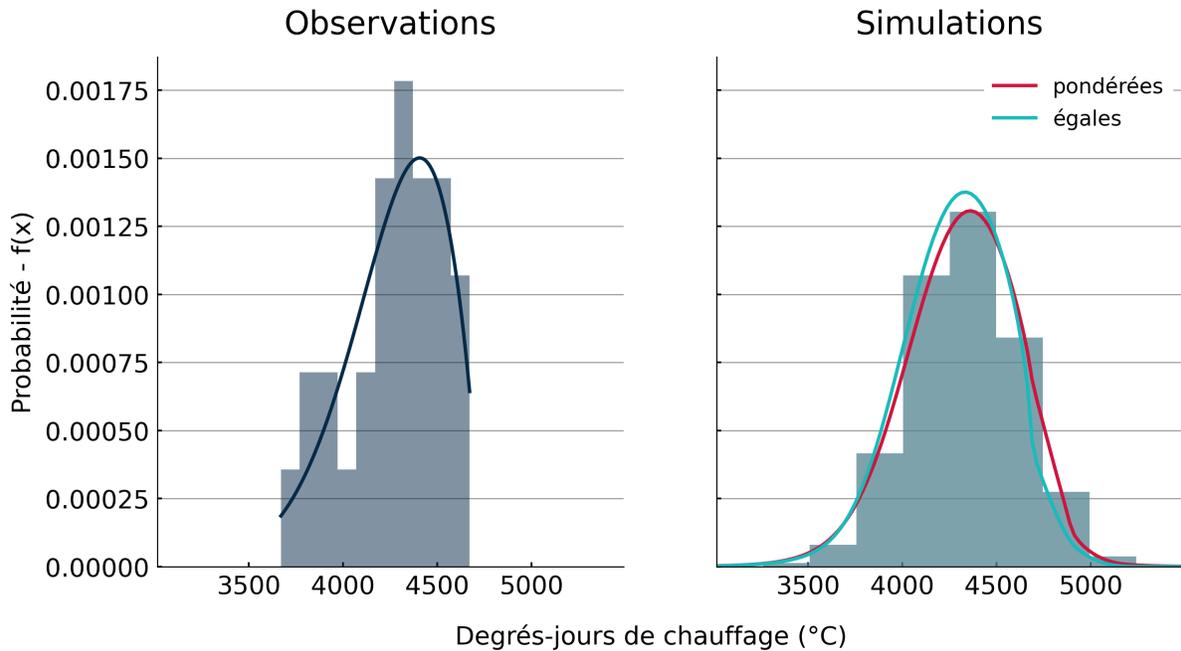


Figure 4.5 – Histogramme et fonction de densité de probabilité des observations et du mélange de distributions des scénarios CMIP6 avec et sans pondération des cumuls degrés-jour sous 18°C à l'aéroport de Montréal Pierre-Elliott-Trudeau pour la période de référence 1918–2010 de l'exemple d'application.

La Figure 4.6 illustre aussi ce concept pour notre exemple à l'aéroport de Montréal en incorporant toutes les fonctions de densité de probabilité d'extremum généralisée des scénarios de CMIP6 (gris pâle) ainsi que le mélange de distribution résultant (bleu foncé) pour la période future de 2041-2070.

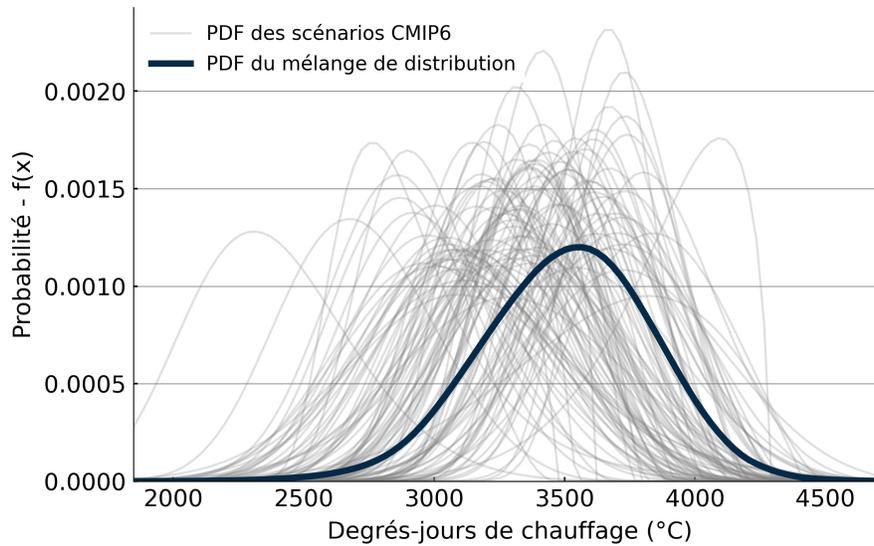


Figure 4.6 – Fonctions de densité de probabilité des scénarios de CMIP6 (regroupées par modèle et scénario de concentration GES) et du mélange de distributions des cumuls degrés-jour sous 18°C à l’aéroport de Montréal Pierre-Elliott-Trudeau pour la période 2041–2070.

4.3.1 Pondération des modèles climatiques en fonction de leur réalisme

La performance des modèles (regroupement par modèle soit *source_id*) est testée pour la période de référence avec le test de Kolmogorov-Smirnov (KS). Ce test consiste à mesurer l’écart maximal, tel qu’illustré à la Figure 4.7, entre deux fonctions de répartition empiriques. Dans le projet, on compare la fonction de répartition des observations à celle de chaque modèle durant la période de référence. Si l’écart entre les deux fonctions de répartition est trop élevé, cela signifie que le modèle ne reproduit pas fidèlement la réalité.

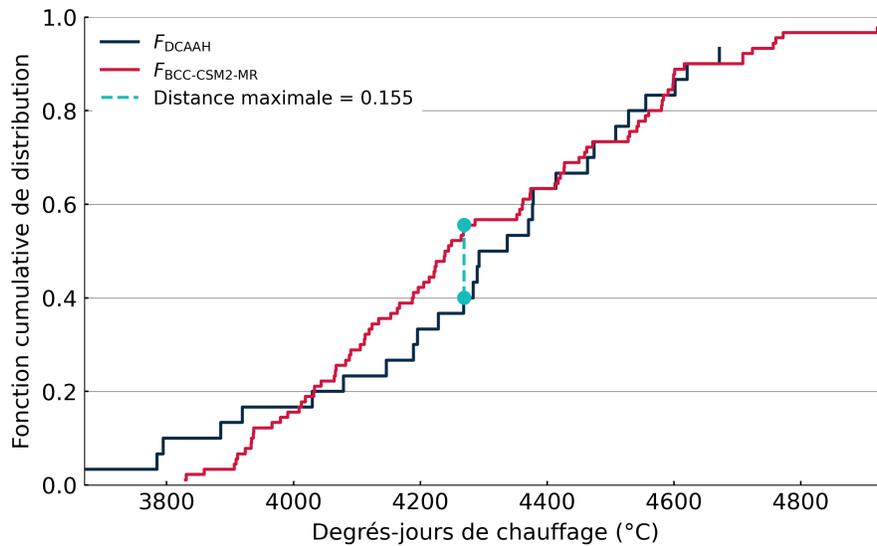


Figure 4.7 – Représentation du test Kolmogorov-Smirnov à deux échantillons des cumuls degrés-jour sous 18°C à l'aéroport de Montréal Pierre-Elliott-Trudeau pour la période de référence 1918-2010 pour les données d'observations DCAAH et le modèle *BCC-CSM2-MR*.

L'hypothèse nulle suppose que les deux échantillons proviennent de la même loi de distribution. La valeur-p (*p-value*) est utilisée pour déterminer si le test est significatif. Si la valeur-p est sous la valeur critique de 0,05, l'hypothèse nulle est rejetée ; le modèle n'est pas considéré comme réaliste et un poids de 0 lui est attribué. Au contraire, on accorde un poids de 1 aux simulations ayant une valeur-p supérieure à 0,05. Une valeur-p plus élevée aurait pu être choisie, mais au prix de réduire le nombre de simulations retenues dans les calculs subséquents.

Pour l'exemple du cumul de degrés-jour à Montréal, ce sont 21 modèles qui ont passé le test KS contre 10 modèles avec une valeur-p inférieure à l'alpha de 0.05. Ces 10 modèles auront donc une pondération de 0 dans le calcul du mélange de distribution.

4.3.2 Pondération des modèles climatiques en fonction de leur sensibilité climatique

Parmi les propriétés émergentes des modèles climatiques, l'une des plus significatives est la sensibilité climatique, soit le réchauffement de la surface en réponse à l'augmentation de la concentration de CO_2 . Il existe plusieurs mesures différentes de cette sensibilité. L'une des plus utilisées est la sensibilité climatique à l'équilibre (ECS), définie comme le changement global de la température moyenne de l'air près de la surface suite à un doublement de la concentration de CO_2 , calculé lorsque le climat a atteint un nouvel équilibre. Cette sensibilité climatique peut être calculée pour chaque modèle, mais elle peut aussi être estimée à partir d'observations paléoclimatiques et de considérations physiques. C'est ce que font Sherwood et al. (2020), qui dérivent une fonction de probabilité pour cette sensibilité climatique à partir de plusieurs sources d'information indépendantes. Or, lorsque l'on compare la répartition de la sensibilité

climatique de l'ensemble CMIP6 avec celle estimée par Sherwood (Figure 4.8), on constate que l'ensemble CMIP6 compte, en proportion, une plus grande proportion de modèles *chauds* (Hausfather et al., 2022 ; Ouranos, 2024).

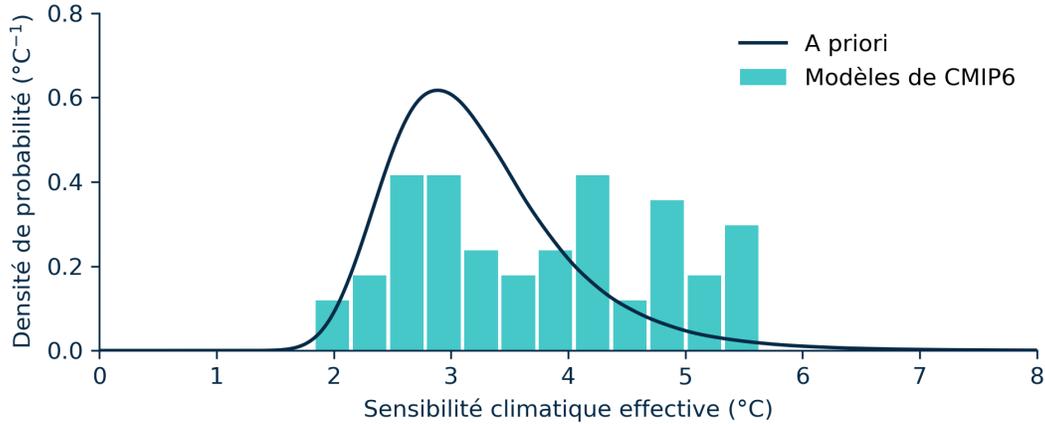


Figure 4.8 – Densité de probabilité de la sensibilité climatique à l'équilibre estimée par Sherwood et al. (2020), superposée à l'histogramme de la sensibilité climatique des modèles de l'ensemble CMIP6 (Zelinka et al., 2020).

En donnant un poids égal à chaque modèle, on risque donc de surestimer le réchauffement climatique projeté. Il est important de noter que ce type de biais n'est pas corrigé par le post-traitement présenté à la section 3.3, qui conserve les tendances simulées par les modèles.

Afin de retirer le biais chaud de l'ensemble de simulations CMIP6 post-traitées, des poids sont appliqués en fonction de la sensibilité climatique de chaque modèle. Ces poids sont choisis de manière à rendre aussi similaire que possible la distribution empirique de la sensibilité climatique des modèles à celle de Sherwood. Les poids (\vec{w}) sont calculés en minimisant l'Équation 4.3, qui mesure la différence entre la distribution empirique pondérée de la sensibilité des modèles $CDF(x, \vec{w})$ et la forme estimée par Sherwood ($CDF_{\text{Sherwood}}(x)$). Le terme à droite de l'équation est un lissage assurant qu'un poids similaire soit assigné aux modèles ayant une sensibilité climatique similaire (Gammon et al., 2024).

$$C(\vec{w}) = \int_{-\infty}^{\infty} (CDF(x, \vec{w}) - CDF_{\text{Sherwood}}(x))^2 dx + \lambda \sum_{i=1}^N \left| \frac{dw_i}{dx}(x_i) \right|^p \quad (4.3)$$

Le poids w_i est ensuite appliqué à toutes les simulations provenant du modèle i . La Figure 4.9 présente les valeurs de la sensibilité climatique (ECS) par modèle ainsi que le poids qui y est associé pour la période 2041-2070 et le scénario de GES SSP2-4.5.

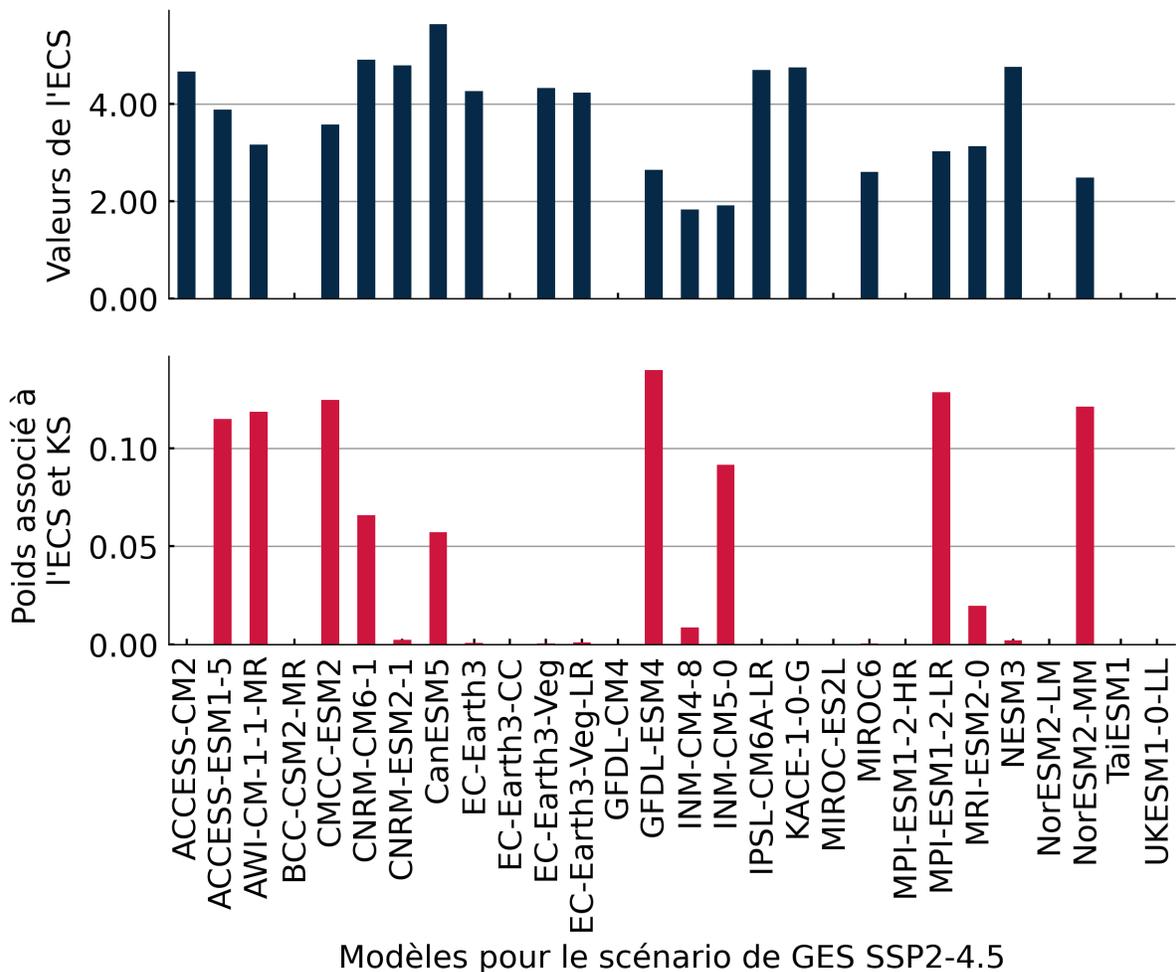


Figure 4.9 – Valeur de la sensibilité climatique et nombre de membres ainsi que le poids associé à ces deux paramètres pour le cumul degrés-jour sous 18°C à l’aéroport de Montréal Pierre-Elliott-Trudeau pour la période future 2041–2070 du SSP2-4.5 des scénarios CMIP6.

4.3.3 Pondération des scénarios de concentrations de GES

La probabilité des scénarios d’émissions de GES est un sujet controversé, car il s’agit essentiellement de faire une prévision des émissions futures et d’y accorder un degré de confiance. Comme ces émissions dépendent en partie de choix politiques et sociétaux, plusieurs scientifiques sont inconfortables d’y attribuer une probabilité. On prend ici une perspective bayésienne, au sens où la probabilité est interprétée comme une évaluation subjective de la véracité d’une hypothèse, et non comme une propriété du monde réel.

Il est utile de mentionner que l’on s’intéresse aux probabilités des scénarios de concentration de GES qui servent à piloter les modèles climatiques, et non aux scénarios d’émissions de GES. Les deux sont évidemment reliés, mais des différences importantes entre les deux existent en raison des incertitudes liées à la modélisation du cycle du carbone.

On assigne ici des probabilités aux scénarios de concentration à partir de simulations d'émissions de CO_2 réalisées par des modèles d'évaluation intégrés (MEI) probabilistes. La méthode est décrite dans Huard et al. (2022), et une infographie des différentes étapes est présentée à la Figure 4.10. L'approche consiste à diagnostiquer les émissions anthropiques à partir des flux de carbone simulés par les modèles pilotés par des concentrations de GES. Ces émissions sont ensuite comparées aux émissions des MEI probabilistes en utilisant une approche bayésienne. L'application de cette méthode permet de définir la probabilité relative des 4 SSP en fonction du temps, pour chaque modèle d'évaluation intégré. L'article original de Huard et al. (2022) décrit les résultats de cinq MEI. On ajoute ici un autre MEI probabiliste, RFF-SP (Rennert et al., 2022), ayant généré un ensemble de 10,000 trajectoires d'émissions de CO_2 , CH_4 et N_2O (Smith, 2023). On retire également un MEI, celui de Raftery et al. (2017), car on considère qu'il n'ajoute pas d'information nouvelle comparé à celui de (Liu & Raftery, 2021), une version plus récente du même modèle.

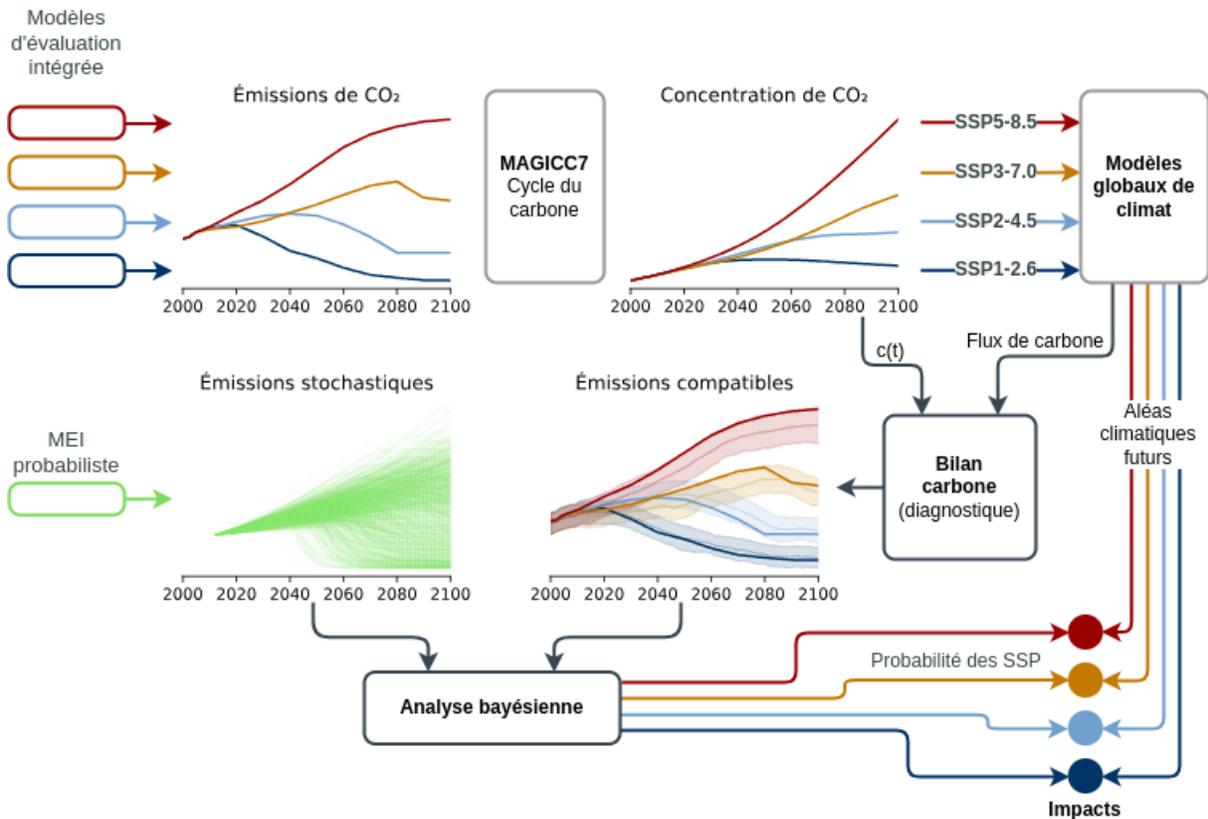


Figure 4.10 – Schéma conceptuel des étapes permettant d'assigner des probabilités aux scénarios de concentration de GES. Les émissions de GES provenant de MEI sont converties en concentrations par le modèle MAGICC7. Ces concentrations sont utilisées comme forçages pour les modèles de climat, qui simulent, entre autres, les flux de carbone entre l'atmosphère, la terre et les océans. On peut à partir de ces flux diagnostiquer les émissions anthropiques compatibles avec les concentrations imposées. Ces émissions sont comparées avec les émissions stochastiques de différents MEI probabilistes afin d'estimer, pour chaque MEI, la probabilité des SSP. Ces probabilités peuvent ensuite être appliquées aux impacts évalués par les simulations climatiques en fonction des SSP.

En moyennant les poids sur la période future choisie par l'utilisateur, on obtient ainsi six poids relatifs pour chacun des 4 SSP. Pour obtenir un poids unique pour chaque SSP, on moyenne simplement les poids trouvés pour chaque IAM. La probabilité associée à chacun des scénarios de GES et chacune des périodes de 30 ans accessibles aux utilisateurs est présentée à la Figure 4.11.

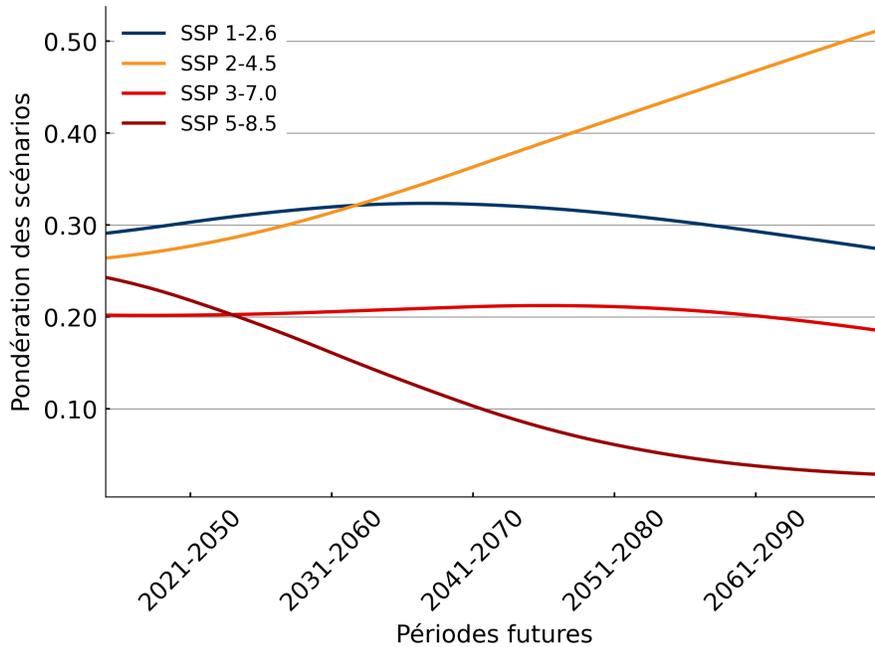


Figure 4.11 – Probabilités associées aux scénarios de concentration de GES pour période de 30 ans, pour la période couvrant 2001-2100.

Le Tableau 4.5 montre les pondérations associées aux scénarios de GES dans le cadre de l'exemple pour la période future 2051-2080.

| Scénario | Poids |
|----------|-----------------------|
| ssp126 | 0.312 |
| ssp245 | 0.416 |
| ssp370 | 0.211 |
| ssp585 | $6.108 \cdot 10^{-2}$ |

Table 4.5 – Pondération associée aux scénarios de GES pour l'exemple d'application et la période 2041–2070.

Une fois les poids calculés pour chaque modèle en fonction de sa performance en période de référence et de sa sensibilité climatique ainsi que du scénario de concentration de GES, ceux-ci sont multipliés pour obtenir un poids unique. Ces poids sont ensuite utilisés dans le mélange de lois statistiques selon l'Équation (4.1) pour obtenir une densité unique de probabilité pour l'indicateur climatique, tel que montré aux Figures 4.5 et 4.6.

4.4 Analyse de la vraisemblance

À partir des densités de probabilités décrivant les observations, les simulations en climat de référence et les projections futures, il est relativement simple d'estimer les changements anticipés pour chaque indicateur. Pour ce faire, on précise d'abord le seuil climatique d'intérêt, par exemple la valeur au-delà de laquelle des dommages sont attendus. On calcule ensuite la probabilité de dépassement selon chacune des trois densités de probabilité. La comparaison des probabilités de dépassement observée et simulée pendant la période de référence permet d'abord d'évaluer si les modèles arrivent à bien reproduire la vraisemblance historique de ces événements. Ensuite, en comparant les valeurs simulées en période de référence aux valeurs en climat futur, on mesure l'influence des émissions de GES sur l'occurrence des aléas.

Finalement, pour l'exemple du cumul de degrés-jour à l'aéroport de Montréal, il est possible d'extraire les probabilités d'occurrences associées au dépassement annuel du seuil de conséquence de 4200°C des fonctions de survie développées à partir des étapes précédentes, tel que montré à la Figure 4.12.

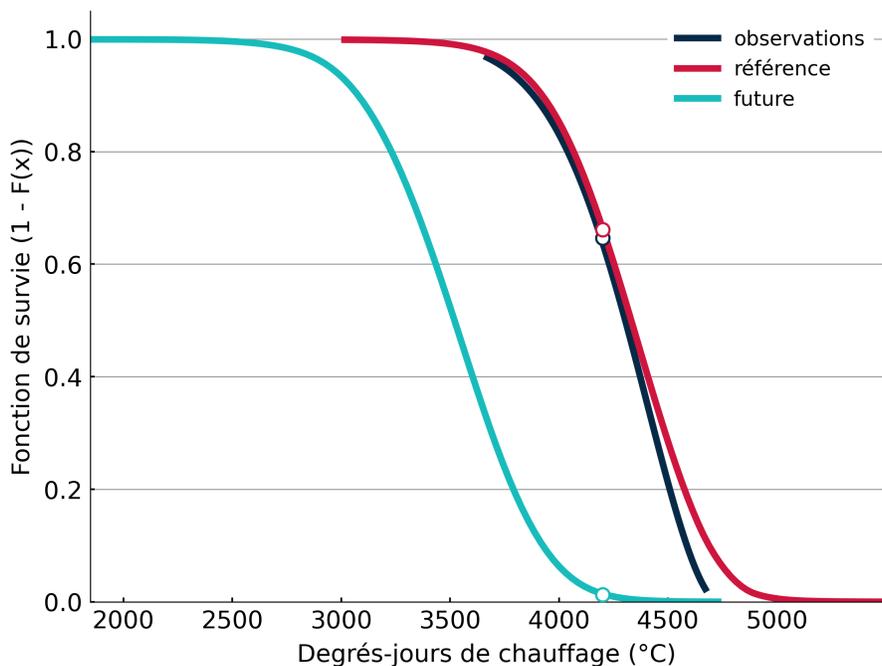


Figure 4.12 – Fonctions de survie des observations et des mélanges de distributions pour les périodes historique et future du cumul degrés-jour sous 18°C à l'aéroport de Montréal Pierre-Elliott-Trudeau.

Le Tableau 4.6 présente les résultats extraits de la Figure 4.6.

On constate que la probabilité de dépassement des degrés-jour de chauffage à l'aéroport de Montréal Pierre-Elliott-Trudeau diminue drastiquement pour la période future étudiée. Le calcul du ratio de la probabilité de dépassement future vs référence est présenté à l'Équation 4.4. La

Table 4.6 – Tableau de vraisemblances

| | |
|---|--------|
| Seuil climatique | 4200°C |
| Probabilité de dépassement pendant la période de référence (observations DCAAH) | 0.646 |
| Probabilité de dépassement pendant la période de référence (scénarios CMIP6) | 0.661 |
| Probabilité de dépassement pendant la période future (scénarios CMIP6) | 0.009 |
| Ratio de la probabilité de dépassement future vs référence | -0.986 |

transformation de ces probabilités de dépassement en scores de vraisemblance va varier selon le protocole utilisé pour l'appréciation des risques et n'est pas prise en charge par l'outil. À titre d'exemple, selon une échelle à 5 niveaux, le score obtenu pour la période de référence pourrait être de 3, alors qu'il serait de 1 pour la période future.

$$Ratio = (1 - F_{scenario_fut}) / (1 - F_{scenario_ref}) - 1 \quad (4.4)$$

5. Implémentation logicielle

L'implémentation logicielle de l'outil de calculs de probabilité d'occurrence se divise en deux parties : les services de calculs (*backend*) et l'interface graphique (*frontend*). Cette section donne un aperçu général du fonctionnement du backend, du frontend et de l'interaction entre les deux.

5.1 Les services de calculs - backend

Les services disponibles dans le backend incluent le calcul des indicateurs à partir des variables climatiques, à la fois sur les données d'observations et de simulations. Les indicateurs sont calculés par la librairie *Xclim* Bourgault et al., 2023. Un autre service réalise l'ensemble de l'analyse de risque, et permet d'obtenir les mêmes résultats offerts via le frontend par une seule requête HTTP. Cette analyse s'appuie entre autres sur la librairie *SciPy*.

Le backend est essentiellement un serveur qui accepte des requêtes HTTP, exécute des fonctions et retourne un message contenant soit le résultat de cette fonction, soit l'URL du résultat. Les services sont définis via la librairie *pygeoapi*, une implémentation Python de la nouvelle génération de standards de l'Open Geospatial Consortium (OGC), plus particulièrement *OGC API - Processes*. Ce standard définit comment les requêtes et les réponses doivent être formulées, de manière à faciliter l'interopérabilité des infrastructures de calcul. Les services de calculs sont donc dérivés de `pygeoapi.process.base.BaseProcessor`, une classe dont la méthode `execute` est responsable de retourner la réponse du serveur. Les fonctionnalités de *pygeoapi* sont elles-mêmes exposées sur internet par *Gunicorn*, un serveur WSGI HTTP qui permet de gérer des requêtes en parallèle. Les différents services implémentés peuvent être consultés à partir de la page d'accueil du backend.

5.2 L'interface graphique - frontend

L'interface graphique (*frontend*) a été réalisée en utilisant principalement les librairies Python *Panel* et *Param*. *Panel* permet la mise en place de tableaux de bord interactifs en ligne, alors que *Param* est utilisé afin de définir les paramètres et variables interactives du tableau de bord. Plusieurs autres librairies ont été utilisées pour la visualisation des données telle que *Ipyleaflet*

pour la carte, ainsi que *hvPlot* et *Bokeh* pour les graphiques.

Le code de l'interface graphique se divise en deux parties : la logique scientifique implémentée dans des classes dérivées de `param.Parameterized`, et le rendu visuel implémenté dans des classes dérivées de `panel.viewable.Viewer`. La partie logique du frontend fait appel au backend pour lancer les calculs des indicateurs et récupérer les résultats, avant de les transférer aux classes responsables de l'affichage.

5.3 Visuel du prototype d'interface graphique

Lors de la réalisation de l'appréciation des risques aux changements climatiques, telle que décrite dans les Normes ISO ou le protocole CVIIP, les professionnels doivent développer une matrice de risque où une probabilité d'occurrence ainsi qu'un niveau de conséquences sont associés à chacun des aléas ayant des impacts potentiels sur les composantes d'une infrastructure. L'interface graphique et son service de calculs développés par l'équipe d'Ouranos vise à fournir la vraisemblance en climat historique et future de ces aléas climatiques.

Voici les étapes que doit réaliser un utilisateur afin d'obtenir cette probabilité d'occurrence avec le prototype d'interface graphique. Les images présentent le prototype d'interface graphique de l'outil en date de l'écriture de ce rapport, mais ne représentent pas nécessairement le prototype final de l'outil en ligne.

1. Choisir la (les) station(s) DCCAHA pour l'étude et pour les variables climatiques désirées (une station par variable). Les coordonnées du site peuvent être ajoutées à la recherche. Dans ce cas, la tableau au bas de l'écran indiquera la distance entre le site et les stations. Il est également possible de définir un rayon pour délimiter une zone de recherche autour du site. Les icônes des stations sélectionnées changent de couleur (noire) dans le prototype.

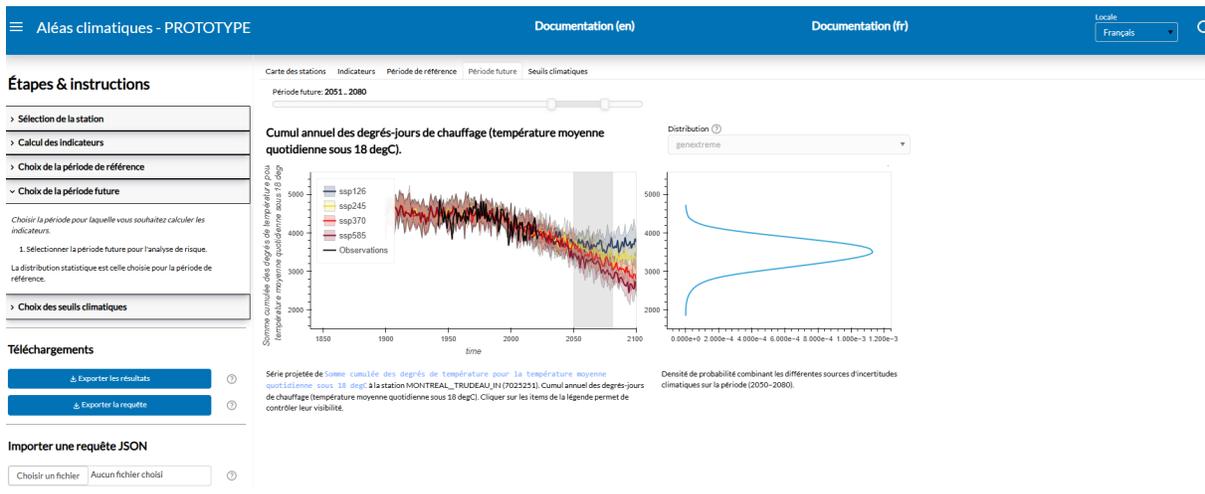
The screenshot shows the 'Aléas climatiques - PROTOTYPE' web application. The top navigation bar includes 'Aléas climatiques - PROTOTYPE', 'Documentation (en)', 'Documentation (fr)', and a language dropdown set to 'Français'. The left sidebar contains 'Étapes & instructions' with sections for 'Sélection de la station', 'Calcul des indicateurs', 'Choix de la période de référence', 'Choix de la période future', and 'Choix des seuils climatiques'. Below this are 'Téléchargements' (Export results, Export request) and 'Importer une requête JSON' (Choose file, No file chosen). The main area features a map titled 'Carte des stations' with a search radius around a central point. A table below the map, titled 'Température', lists station data:

| ID de la station | Nom de la station | Latitude | Longitude | # mois validés | Début | Fin | Distance (km) |
|------------------|-------------------|----------|-----------|----------------|---------|---------|---------------|
| 7024745 | MONTREAL_TAVISH | 45.5 | -73.58 | 1,755 | 1871-07 | 2021-12 | 8.9 |
| 7027329 | ST_HUBERT_MONT_ | 45.52 | -73.42 | 823 | 1953-01 | 2021-12 | 9.5 |
| 7024400 | MACDONALD_COLL | 45.47 | -73.73 | 821 | 1906-05 | 1976-03 | 26.0 |

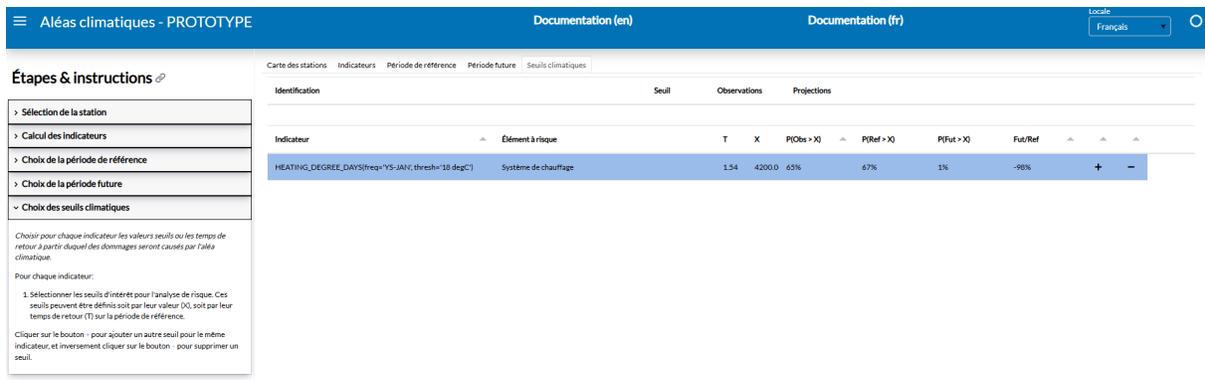
- Choisir les aléas climatiques désirés en fonction des stations sélectionnées à l'étape 1 en cliquant sur le bouton +. Préciser les paramètres de calcul des aléas sélectionnés. Par exemple, un seuil de 18 degrés Celsius pour les degrés-jour de chauffage. Les mois de l'année où les indicateurs sont calculés peuvent aussi être personnalisés par l'utilisateur.

- Choisir la période de référence examinée pour l'analyse de risques. Les indicateurs observés aux stations sélectionnées sont présentés dans un graphique afin d'aider dans la sélection de la période appropriée, notamment en fonction des données manquantes. La distribution statistique ayant le meilleur ajustement est présentée sur la figure de droite, mais le choix de la loi statistique peut être modifié par l'utilisateur avec un appui visuel des lois.

- Choisir la période future de l'analyse de risque à l'aide de la barre de gauche. Les séries temporelles simulées pour les indicateurs sont présentées sur la figure de gauche pour toute la période 1950-2100, tandis que la figure de droite présente le mélange de distributions pondérées des simulations pour la période future sélectionnée.



5. Pour chaque composante d'infrastructure touchée par un aléa, identifier un ou des seuil(s) (X) ou période(s) de retour (T) à partir desquels des dommages sont causés. Le tableau sera mis à jour suite à l'ajout du seuil. Les probabilités d'occurrences en climat observé ainsi que simulé pour les périodes historique et future sont affichées dans un tableau pouvant être inclus dans une appréciation des risques.



À noter que bien que l'utilisateur fournisse la latitude et longitude du site étudié, le choix des stations lui est laissé. Une autre option aurait pu être d'employer automatiquement les stations les plus proches du site, mais il semblait préférable de laisser ce choix à l'utilisateur au cas où une station plus éloignée représente mieux le climat du site visé.

On note aussi que pour des indicateurs climatiques nécessitant à la fois des données de précipitation et de températures, telles que les précipitations solides, les stations choisies par l'utilisateur pour ces deux variables seront combinées, même s'il ne s'agit pas de la même station. Par ailleurs, l'utilisateur peut choisir sa période de référence ; il pourrait notamment choisir une période récente comme recommandé par l'Organisation Météorologique Mondiale, soit 1990–2020, ou encore la période de 30 ans où l'infrastructure étudiée a été construite, par exemple 1940–1970. La période future d'une longueur de 30 ans est aussi laissée au choix de l'utilisateur, permettant ainsi de représenter la durée de vie de l'infrastructure étudiée.

Le comité consultatif a souligné le besoin de fournir des probabilités de dépassement de seuils

climatiques pour chaque SSP. En effet, différentes normes en vigueur exigent d'étudier un SSP particulier dans le cadre de l'appréciation de risques. Il serait donc intéressant d'ajouter cette option dans l'interface graphique en offrant une valeur combinée, mais aussi séparées en 4 SSPs.

6. Limitations et incertitudes

Il est important de noter que la méthodologie proposée n'a pas encore été publiée dans une revue scientifique et est proposée ici à titre de projet pilote. Le résultat de l'analyse consiste en un seul chiffre de vraisemblance à intégrer dans une matrice de risque. Ce chiffre est le résultat de plusieurs hypothèses et simplifications, qui dans divers cas pourraient se révéler inappropriées. **On suggère donc de limiter l'usage de cette approche aux études qualitatives d'analyse de risques, et d'éviter son utilisation dans un cadre de conception d'infrastructure.**

De nombreuses incertitudes sont présentes à différentes étapes de la méthodologie. Tout d'abord, bien que les données d'observations DCAAH soient corrigées et homogénéisées, certaines incertitudes liées au nombre limité d'observations parallèles (dédoublage de l'instrumentation) demeurent. Sans observations parallèles, il est plus difficile d'effectuer les ajustements pour les changements non climatiques, tels un changement des conditions environnantes à la station ou une relocalisation (Vincent et al., 2018).

La qualité des observations est déterminante puisque celles-ci sont utilisées pour l'ajustement par quantiles des simulations. Aussi, comme montré à la Section 3.3, les valeurs d'amplitude diurnale sont parfois nulles. Tous ces biais observationnels sont propagés dans les simulations climatiques post-traitées. De plus, en région rurale ou nordique, les stations sont souvent très éloignées et peuvent ne pas refléter fidèlement les conditions climatiques du site d'intérêt. Il peut arriver que la station la plus proche ait un court historique, ne soit plus opérée depuis de nombreuses années, ou contienne plusieurs données manquantes. Il pourrait être intéressant dans une phase subséquente de faire appel aux données de réanalyses, à la fois lorsque la station la plus proche ne satisfait pas aux critères de qualité requis, et pour couvrir un plus grand territoire.

À ces biais s'ajoutent ceux des simulations non corrigés par le post-traitement pouvant se manifester pour certains indicateurs sensibles à des valeurs seuils (par ex. nombre de jours au-dessus d'une température donnée). Par ailleurs, le choix de la méthode utilisée pour l'ajustement de biais ainsi que l'interpolation réalisée aux stations influencent également les résultats (Lavoie et al., 2025).

La sélection d'une loi de probabilité affecte aussi l'incertitude globale, puisque les résultats obtenus dans l'outil en ligne sont grandement affectés par ce choix (ajustement des observations, mélange de lois ainsi que fonction de survie) (Merz & Thielen, 2005). L'emploi d'un mélange de lois pondérées a aussi des limites dues aux choix méthodologiques visant à produire un seul chiffre pour la matrice de risques. Tout d'abord, plusieurs autres vérifications que le test KS

auraient pu être utilisées afin d'évaluer la performance des modèles climatiques, tel que le test de Mann-Kendall ou des tests multivariés de grappes (Ahmadalipour et al., 2017). Pour tous les tests, un choix plus ou moins arbitraire doit être effectué pour déterminer à partir de quelle valeur-p une simulation est rejetée. La pondération des SSP dépend étroitement des modèles d'évaluation intégrés utilisés, et l'ensemble disponible est encore petit pour assurer des résultats robustes. Cette pondération ne considère d'ailleurs que les trajectoires de CO₂, sans tenir compte d'autres facteurs (utilisation des sols, émissions d'aérosols, etc.) (Huard et al., 2022).

La pondération des modèles est aussi basée sur la sensibilité climatique, une dimension parmi plusieurs autres pour juger de la vraisemblance d'un modèle. Il serait également possible de tenir compte de la similarité entre modèles afin de pondérer à la baisse des modèles appartenant à la même *famille*, et donc plus susceptibles de donner des résultats similaires.

Finalement, les choix des utilisateurs peuvent aussi engendrer des limitations telles que des paramètres d'aléas climatiques causant des valeurs physiquement non cohérentes. Plus de tests et de validations devront être effectués à cet effet, afin de bien contraindre les paramètres aux différentes stations.

7. Conclusion

Pour conclure, un nombre grandissant de subventions, d'autorisations gouvernementales et de certifications requièrent d'effectuer des analyses de risques aux infrastructures posés par le climat. Ce type d'étude, plus particulièrement l'étape d'appréciation des risques, demande l'accès à un nombre important de données climatiques, des connaissances en science du climat en plus de devoir réaliser un nombre considérable d'analyses statistiques. Un outil offrant une démarche facilement reproductible et détaillée n'est pas encore disponible pour réaliser ce genre d'études en science du climat. C'est pourquoi le présent projet vise à offrir un premier prototype en ligne pour répondre aux besoins de ce milieu pour lequel les demandes augmentent de façon importante.

Ainsi, la maquette en ligne développée dans le cadre du projet permet d'obtenir les probabilités d'occurrence en climat historique et futur de plusieurs aléas climatiques susceptibles de causer des dommages aux infrastructures. Par ailleurs, la méthodologie se démarque en permettant d'intégrer l'incertitude dans une seule valeur devant être ajoutée à la matrice de risques en associant une pondération aux modèles climatiques ainsi qu'aux scénarios de concentrations de GES. Un comité consultatif formé de professionnels provenant de divers milieux a suivi le développement du projet afin de s'assurer de sa cohérence avec la pratique des analyses de risques.

L'outil en ligne pourrait permettre aux professionnels de l'analyse de risques d'obtenir des vraisemblances d'aléas climatiques reproductibles d'un projet à l'autre et comparables à travers les organisations. Toutefois, la méthodologie proposée présente plusieurs limitations et biais qui devront être considérés lors de l'appréciation des risques et les professionnels devront faire preuve de jugement afin de déterminer si celle-ci est appropriée à leurs travaux.

Des analyses plus poussées doivent être réalisées afin de déterminer la sensibilité de des résultats aux différentes hypothèses méthodologiques, tels que le choix des approches de pondérations. L'outil pourrait être bonifié en utilisant des réanalyses couvrant un plus grand territoire, et en ajoutant des aléas climatiques plus complexes. Il serait aussi pertinent de réaliser un projet pilote d'analyse de risques avec un groupe externe afin de valider la pertinence de l'outil pour la pratique.

Références

- Ahmadalipour, A., Rana, A., Moradkhani, H., & Sharma, A. (2017). Multi-criteria evaluation of CMIP5 GCMs for climate change impact analysis. *Theoretical and applied climatology*, 128, 71-87. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1695-4>
- Bourgault, P., Huard, D., Smith, T. J., Logan, T., Aoun, A., Lavoie, J., Dupuis, É., Rondeau-Genesse, G., Alegre, R., Barnes, C., Laperrière, A. B., Biner, S., Caron, D., Ehbrecht, C., Fyke, J., Keel, T., Labonté, M.-P., Lierhammer, L., Low, J.-F., ... Whelan, C. (2023). xclim : xarray-based climate data analytics. *Journal of Open Source Software*, 8(85), 5415. <https://doi.org/10.21105/joss.05415>
- Charron, I. (2016, juillet). *Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation* (rapp. tech.). ouranos. https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-12/hors_proj-2016-charron-guide_scenario_0.pdf
- Datalab, A. (2019). *What is Bayesian Information Criterion (BIC) ?* (Rapp. tech.). Medium. <https://medium.com/@analyttica/what-is-bayesian-information-criterion-bic-b3396a894be6>
- François, A., Jean, R., & Nicholas, L. (2012). *Hydrologie Cheminements de l'eau*. Presses Internationales Polytechniques.
- Gammon, S., Huard, D., Bourgault, P., Caron, L.-P., Logan, T., Rondeau-Genesse, G., & Lavoie, J. Weighting climate ensembles to an equilibrium sensitivity distribution. In : *American Meteorological Society Annual Meeting*. 2024.
- Hausfather, Z., Marvel, K., Schmidt, G. A., Nielsen-Gammo, n. J. W., & Zelinka, M. (2022). Climate simulations : recognize the 'hot model' problem. *Nature*, 605, 26-29. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01192-2>
- Huard, D., Fyke, J., Capellán-Pérez, I., Matthews, H. D., & Partanen, A.-I. (2022). Estimating the Likelihood of GHG Concentration Scenarios From Probabilistic Integrated Assessment Model Simulations [e2022EF002715 2022EF002715]. *Earth's Future*, 10(10), e2022EF002715. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2022EF002715>
- Lavoie, J., Bourgault, P., James Smith, T., Logan, T., Leduc, M., Caron, L.-P., Gammon, S., & Braun, M. (2024). An ensemble of bias-adjusted CMIP6 climate simulations based on a high-resolution North American reanalysis. *Scientific Data*, 11(64). <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41597-023-02855-z>
- Lavoie, J., Caron, L.-P., Logan, T., Sobie, S., Turcotte, R., Mailhot, E., & Pelletier-Dumont, J. (2025). On the importance of the reference data : Uncertainty partitioning of bias-adjusted climate simulations over Quebec. *ESS Open Archive*. <https://essopenarchive.org/doi/full/10.22541/essoar.173809919.98909811>

- Liu, P. R., & Raftery, A. E. (2021). Country-based rate of emissions reductions should increase by 80% beyond nationally determined contributions to meet the 2 °C target. *Communications Earth & Environment*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00097-8>
- Mekis, É., & Vincent, L. A. (2023). *Données climatiques canadiennes ajustées et homogénéisées (DCCA-H)* (rapp. tech.). Environnement et Changement climatique Canada. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/9c4ebc00-3ea4-4fe0-8bf2-66cfe1cddd1d>
- Merz, B., & Thielen, A. H. (2005). Separating natural and epistemic uncertainty in flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 309(1-4), 114-132. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.015>
- Naveed, K., André, S.-H., B.M.J, O. T., & Bernard, B. (2004). *Frequency analysis of daily maximum temperature in Souther Québec with a bew to interpret heatwaves* (rapp. tech.). INRS-ETE. <https://espace.inrs.ca/id/eprint/1120/1/R000747.pdf>
- Ouranos. (2024). *Guide de recommandations scientifiques visant à faciliter l'utilisation de projections climatiques* (rapp. tech.). Ouranos. https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2024-01/Guide_de_recommandations_scientifiques_visant_a_faciliter_lutilisation_de_projections_climatiques.pdf
- Ouranos & MELCCFP. (2024). *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques - Guide pour les organismes municipaux* (rapp. tech.). Ouranos et MELCCFP. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/outils/guide-elaborer-plan-adaptation-organismes-municipaux.pdf>
- Pangeo/ESGF Cloud Data Working Group. (2024). *Zarr Data Overview*. <https://pangeo-data.github.io/pangeo-cmip6-cloud/overview.html> (accessed : 05.31.2024).
- Raftery, A. E., Zimmer, A., Frierson, D. M., Startz, R., & Liu, P. (2017). Less than 2 °C warming by 2100 unlikely. *Nature Climate Change*, 7(9), 637-641. <https://doi.org/10.1038/nclimate3352>
- Rennert, K., Prest, B. C., Pizer, W. A., Newell, R. G., Anthoff, D., Kingdon, C., Rennels, L., Cooke, R., Raftery, A. E., Ševčíková, H., et al. (2022). The social cost of carbon : advances in long-term probabilistic projections of population, GDP, emissions, and discount rates. *Brookings Papers on Economic Activity*, 2021(2), 223-305.
- Rondeau-Genesse, G., Bourgault, P., Lavoie, J., Smith, T. J., Gammon, S., Logan, T., & Caron, L.-P. (2023, mai). Ouranosinc/xscen : v0.6.0. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7897543>
- Sherwood, S. C., Webb, M. J., Annan, J. D., Armour, K. C., Forster, P. M., Hargreaves, J. C., Hegerl, G., Klein, S. A., Marvel, K. D., Rohling, E. J., Watanabe, M., Andrews, T., Braconnot, P., Bretherton, C. S., Foster, G. L., Hausfather, Z., Heydt, A. S., Knutti, R., Mauritsen, T., ... Zelinka, M. D. (2020). An Assessment of Earth's Climate Sensitivity Using Multiple Lines of Evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4). <https://doi.org/10.1029/2019rg000678>
- Smith, C. (2023, avril). *RFF-SP scenarios with FaIR v2.1* (Version 1.2). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7838148>
- Vincent, L. A., Milewska, E. J., Wang, X. L., & Hartwell, M. M. (2018). Uncertainty in homogenized daily temperatures and derived indices of extremes illustrated using parallel observations in Canada. *International Journal of Climatology*, 38(2), 692-707. <https://doi.org/10.1002/joc.5203>
- WMO. (2017). *WMO Guidelines on the Calculation of Climate Normals* (rapp. tech.). World Meteorological Organization. https://library.wmo.int/viewer/55797/download?file=1203_en.pdf&type=pdf&navigator=1

Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., PoChedley, S., Caldwell, P. M., Ceppi, P., Klein, S. A., & Taylor, K. E. (2020). Causes of Higher Climate Sensitivity in CMIP6 Models. *Geophysical Research Letters*, 47(1). <https://doi.org/10.1029/2019gl085782>

Annexe A

Évaluation des scénarios climatiques

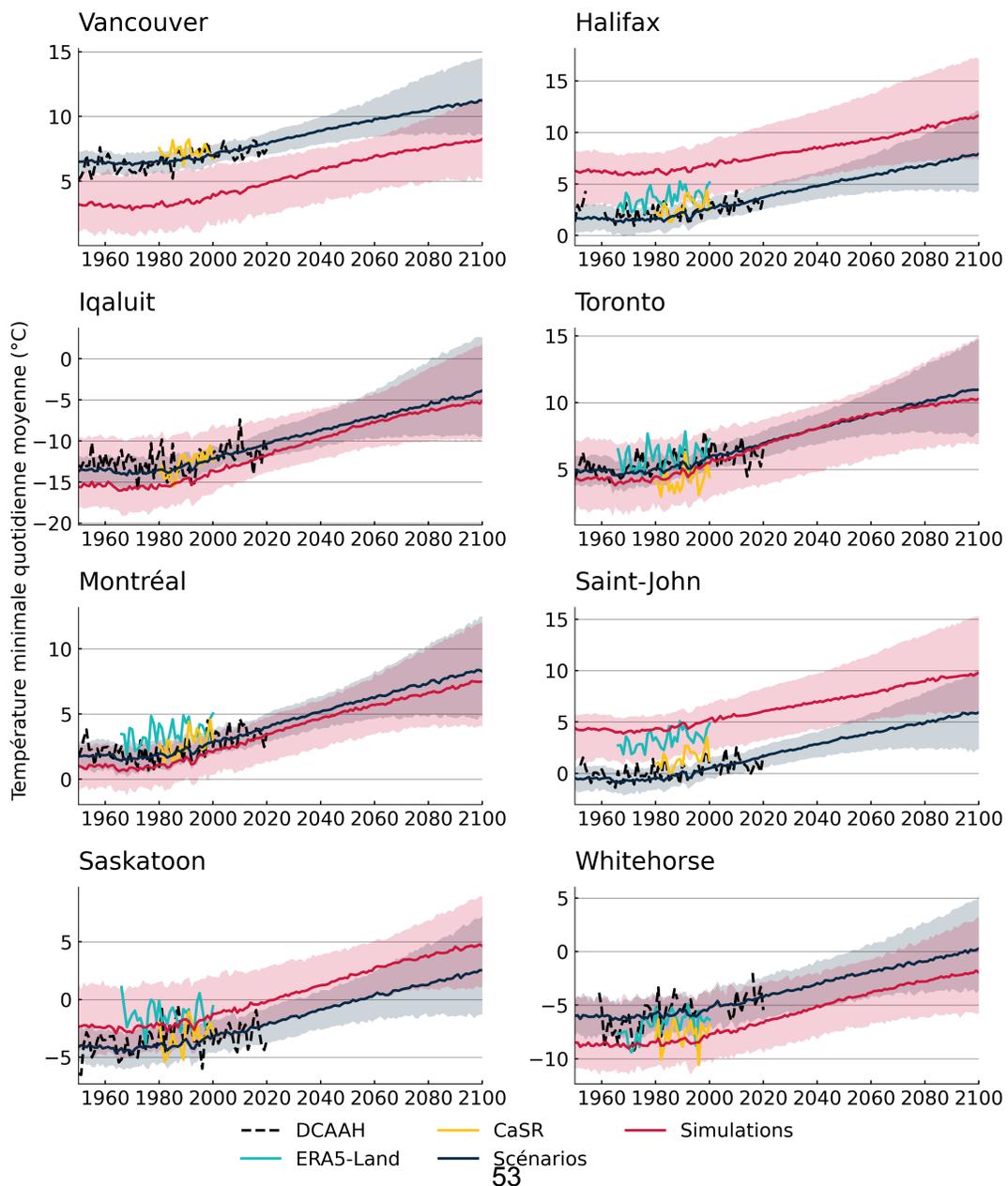


Figure A.1 – Série temporelle de la température minimale moyenne annuelle des villes les plus peuplées de chaque province et territoire.

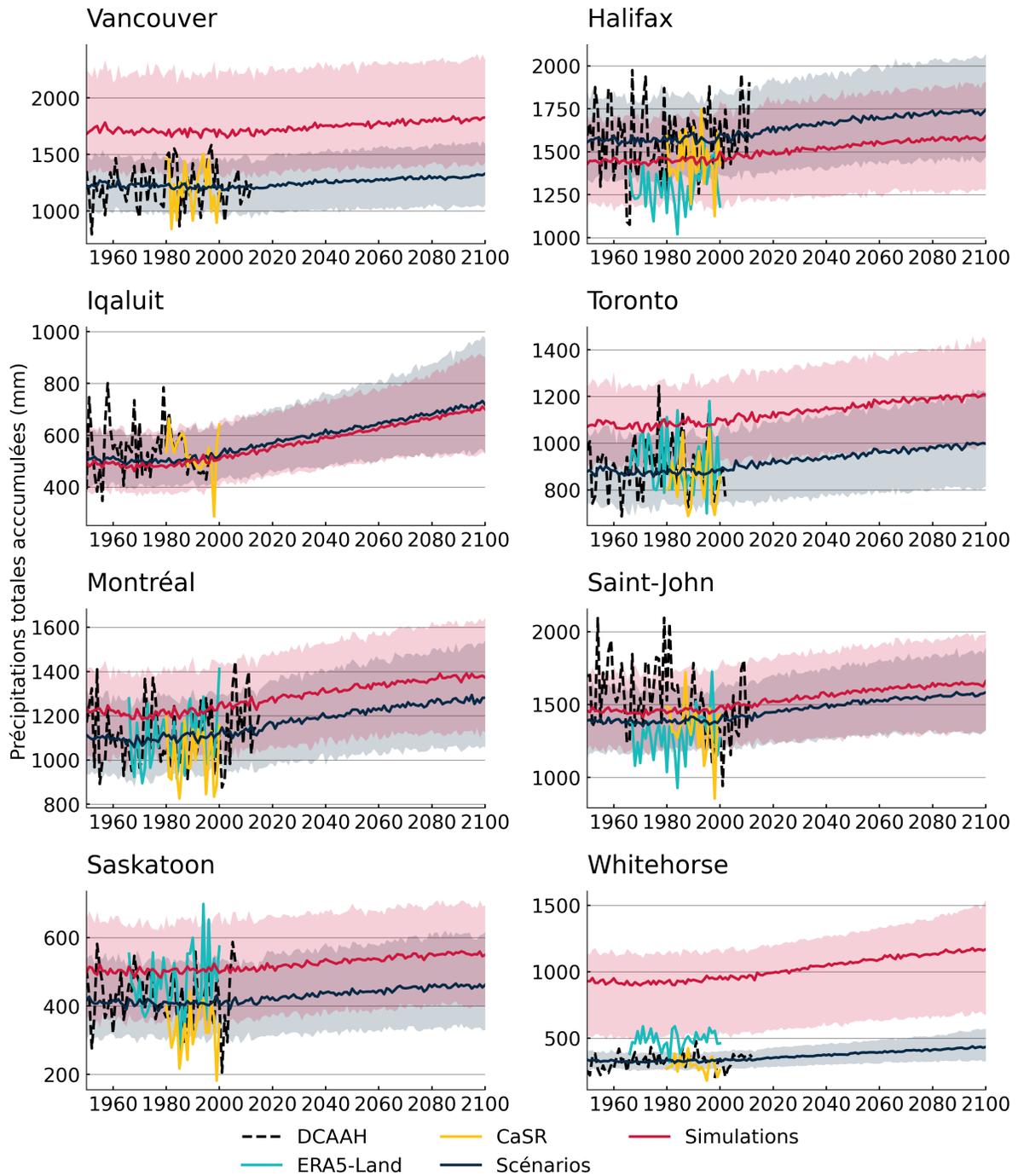


Figure A.2 – Série temporelle de la précipitation annuelle des villes les plus peuplées de chaque province et territoire.

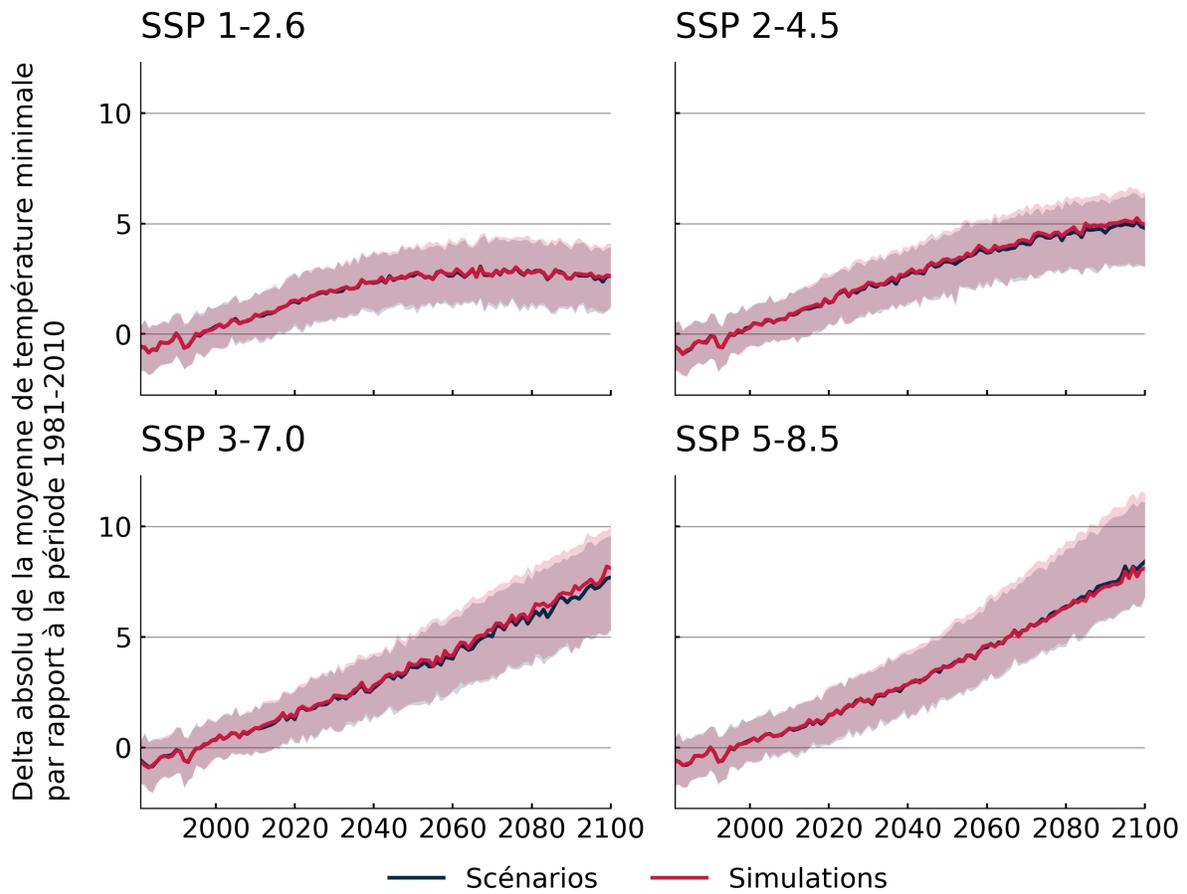


Figure A.3 – Série temporelle de la température minimale moyenne annuelle des villes les plus peuplées de chaque province et territoire.

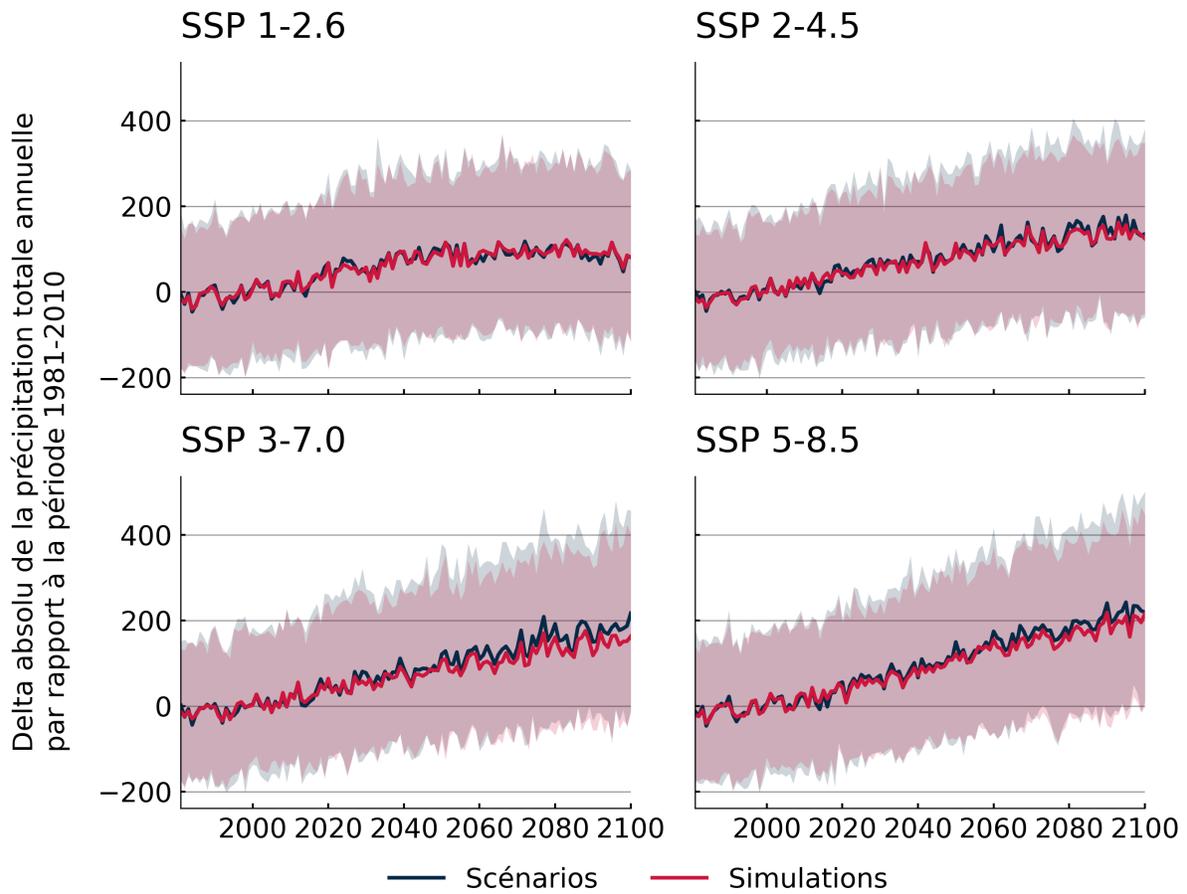


Figure A.4 – Série temporelle de la précipitation totale annuelle des villes les plus peuplées de chaque province et territoire.

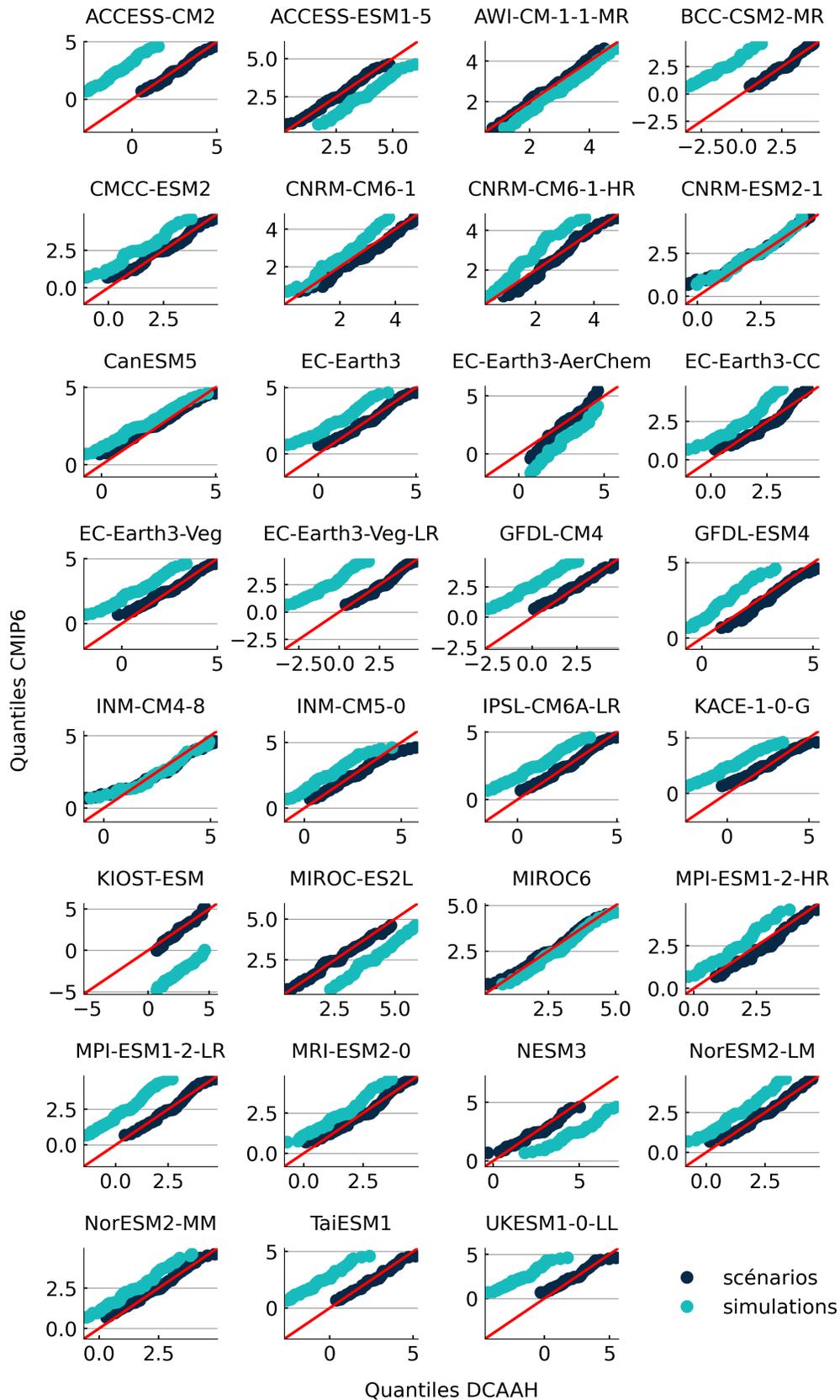


Figure A.6 – Diagramme quantiles-quantiles des températures minimales moyennes annuelles des scénarios et simulations comparés aux observations à la station Montréal Pierre-Elliott-Trudeau pour la période 1950-2020.

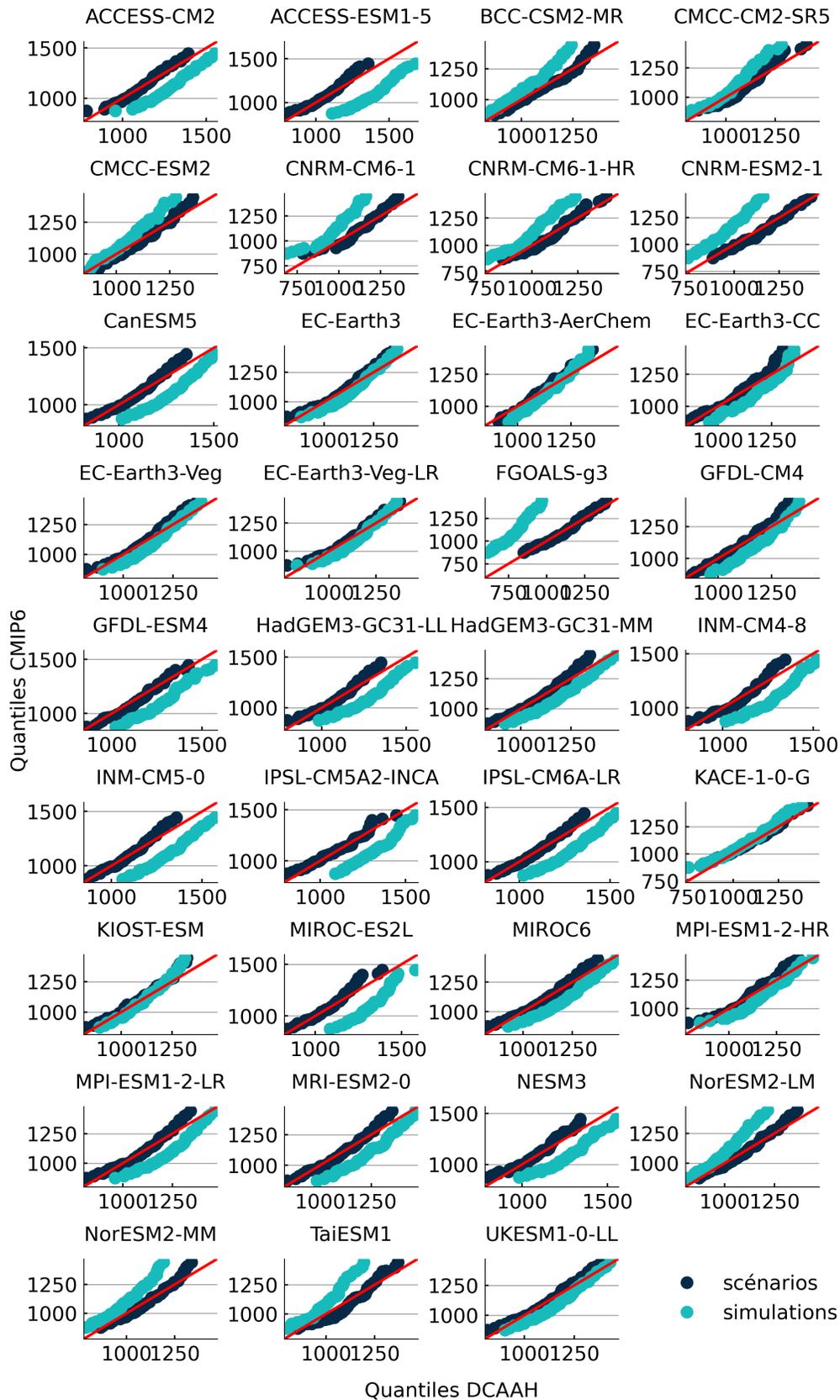


Figure A.7 – Diagramme quantiles-quantiles des précipitations annuelles des scénarios et simulations comparés aux observations à la station Montréal Pierre-Ellet-Trudeau pour la période 1950-2020.

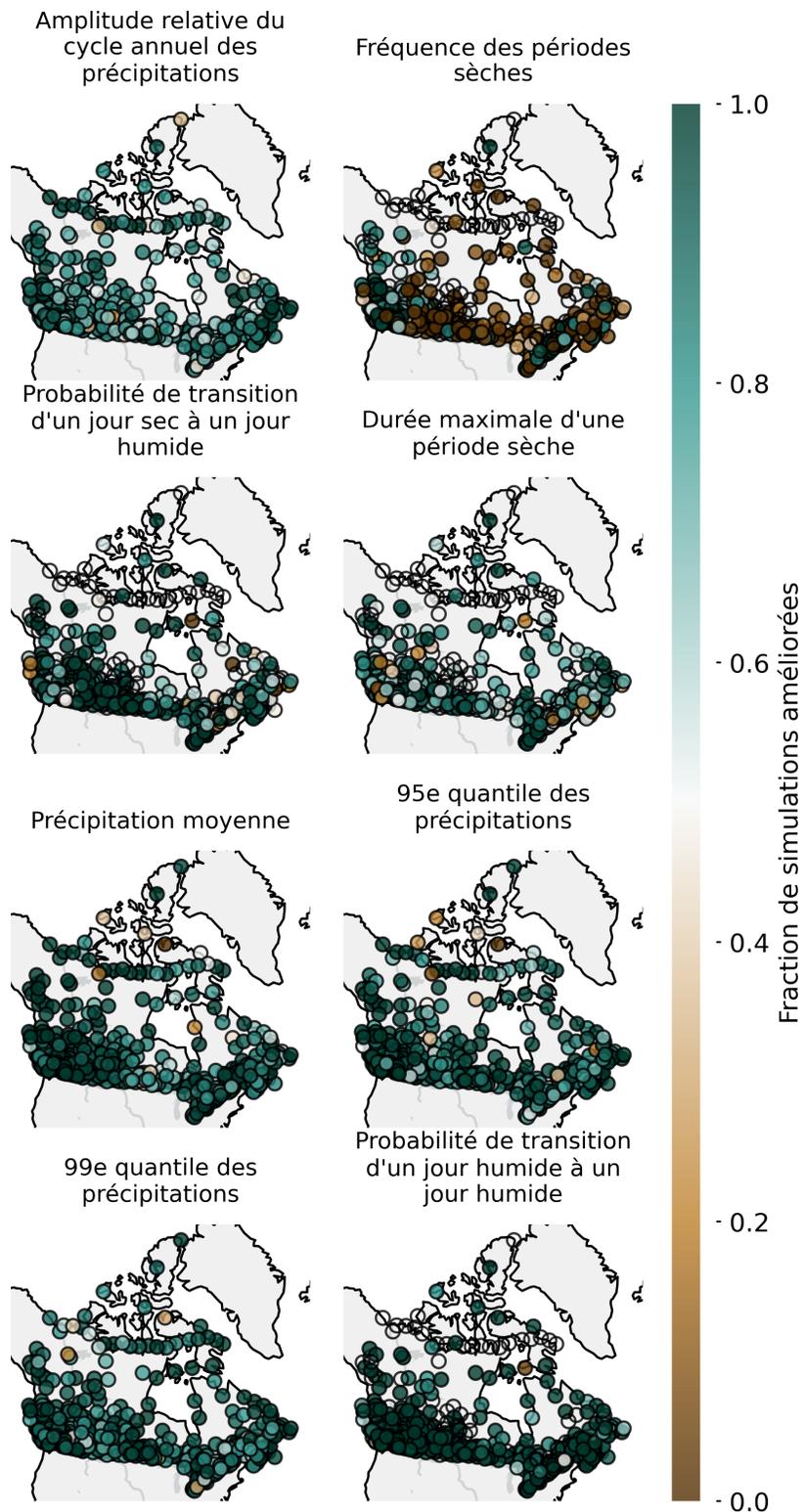


Figure A.5 – Fraction des simulations dont la valeur de biais a été améliorée aux stations de la précipitation.



Ouranos

Consortium sur les changements climatiques

550, rue Sherbrooke O, Tour Ouest, 19^e étage
Montréal (Québec) H3A 1B9

ouranos.ca

