

EXTRÊMES DE NIVEAUX D'EAU CÔTIERS ET EXTRÊMES CONJOINTS DE NIVEAUX D'EAU ET DE PRÉCIPITATIONS AU CANADA

Rapport final

Decembre 2024



Financé en partie par
le gouvernement du Canada.



EXTRÊMES DE NIVEAUX D'EAU CÔTIERS ET EXTRÊMES CONJOINTS DE NIVEAUX D'EAU ET DE PRÉCIPITATIONS AU CANADA

Rapport final

Décembre 2024

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Léa Braschi, CBCL Limited

Vincent Leys, CBCL Limited

COMITÉ OURANOS:

Sarah-Claude Bourdeau-Goulet, Ouranos

David Huard, Ouranos

Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos

Titre du projet Ouranos: Outils facilitant les analyses des risques aux infrastructures posés par le climat

Numéro du projet Ouranos: 710900

Citation suggérée : Braschi, L.C., et Leys, V. (2024). *Extrêmes de niveaux d'eau côtiers et extrêmes conjoints de niveaux d'eau et de précipitations au Canada*. Rapport présenté Ouranos. Montréal. CBCL Limited. 37 p.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

Remerciements

Ce projet a été rendu possible grâce à l'Initiative de recherche et de connaissances de Logement, Infrastructures et Collectivités Canada.



Financé en partie par
le gouvernement du Canada.



Résumé

Contexte

L'adaptation climatique dans les zones côtières du Québec et du Canada, notamment pour les études d'inondation, les évaluations des risques et la planification des infrastructures, nécessite des données spécialisées sur les variables côtières. Toutefois, les ressources climatiques actuelles ne se focalisent pas sur ces variables.

Les niveaux d'eau côtiers extrêmes sont un indicateur clé, ayant des impacts significatifs sur divers secteurs tels que le transport, les logements, la gestion des urgences, les chaînes d'approvisionnement, ainsi que les écosystèmes et l'agriculture. De plus, l'élévation projetée du niveau de la mer amplifie les risques d'impacts sur les zones côtières. Cependant, il n'existe pas d'analyses des valeurs extrêmes de niveaux d'eau côtiers avec référence verticale à l'échelle nationale.

Un autre indicateur essentiel est la combinaison des niveaux d'eau et des précipitations. Les tempêtes peuvent entraîner des surcotes élevées combinées à de fortes précipitations, ce qui peut avoir de graves conséquences même lorsque les événements individuels ne sont pas extrêmes. Par exemple, un drainage de précipitations modérées bloqué par des surcotes modérées peut provoquer des inondations majeures. La caractérisation de ces événements conjoints est généralement au stade de la recherche scientifique, pas facilement accessible aux praticiens et rarement intégrée dans l'adaptation climatique.

Objectifs

- Faciliter l'évaluation de la probabilité des aléas côtiers et conjoints, actuels et futurs, pour traduire la recherche en pratique et soutenir l'adaptation climatique.
- Développer une première version d'outils Python pour ces analyses, tout en identifiant les besoins pour les travaux futurs, avec l'objectif d'intégrer ces indicateurs dans l'outil « Portail Ingénieur » d'Ouranos, où les utilisateurs pourront obtenir les probabilités de dépassement pour une station donnée.

Méthodologie

- Revue des approches proposées dans la littérature.
- Collecte et traitement des données.
- Analyses statistiques d'extrêmes et de probabilités conjointes.

Résultats

Niveaux d'eau côtiers

- Ce projet a analysé 22 jauges marégraphiques sur les côtes du Pacifique et de l'Atlantique, intégrant les projections les plus récentes de l'élévation relative du niveau de la mer pour calculer les niveaux d'eau extrêmes sur une référence verticale commune.
- Les analyses montrent une cohérence spatiale dans les paramètres de la distribution de Pareto généralisée, avec 80 % des stations dans une plage de $\pm 0,3$, souvent légèrement négatifs.
- Les niveaux d'eau à période de retour de 50 ans varient entre 1 m et 4 m (CGVD2013), selon l'amplitude des marées et d'autres facteurs (Figure A), et concordent avec des études régionales malgré des différences méthodologiques.
- La probabilité des événements extrêmes historiques augmentera rapidement dans le futur. Une tempête associée à une période de retour de 50 ans pourrait survenir chaque année d'ici 2070-2100 pour la majorité des stations, en cohérence avec des paramètres de forme Pareto négatifs.

Niveaux d'eau et précipitations

- Une dépendance significative a été observée entre niveaux d'eau et précipitations dans 65 % des cas. Les probabilités conjointes, intégrant cette dépendance, sont généralement plus élevées que sous l'hypothèse d'indépendance. Par exemple, pour des niveaux d'eau et des précipitations à période de retour de 50 ans, la probabilité conjointe est au moins cinq fois plus élevée dans 14 des 22 stations.
- Les critères d'information bayésienne des copules montrent de faibles écarts, limitant la confiance dans le choix du modèle.
- Une analyse de sensibilité révèle que le choix de la copule et de ses paramètres peut fortement influencer les résultats. Par exemple, selon le paramètre de la copule de Gumbel (étroitement lié au tau de Kendall), les facteurs de multiplication varient de 1 à plus de 20.
- L'influence du choix de la copule diminue à mesure que les impacts des changements climatiques augmentent.

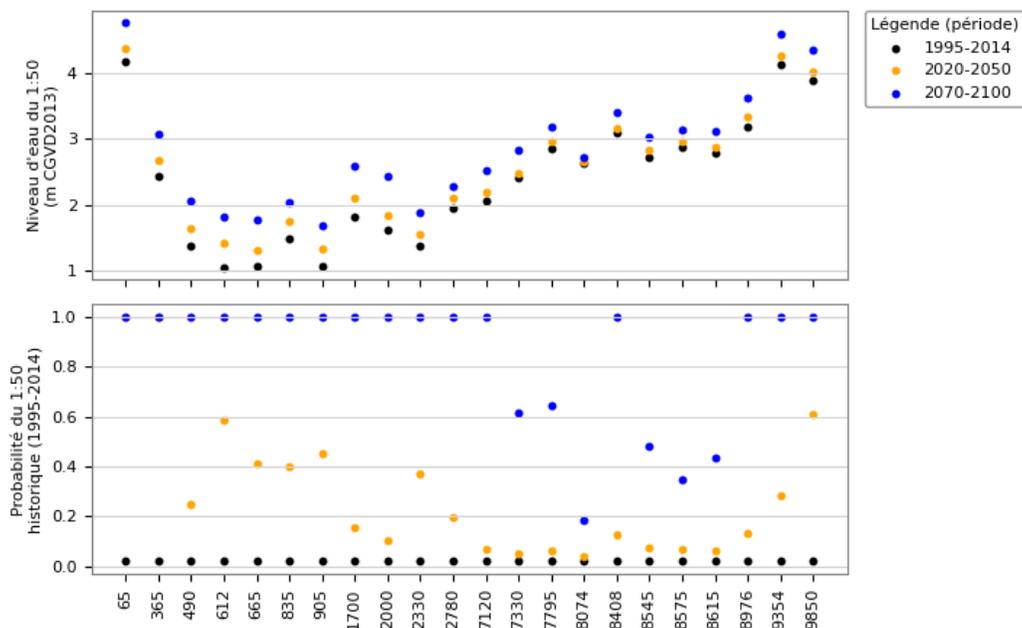


Figure A - Résultats des extrêmes de niveaux d'eau côtiers historiques et futurs.

Suites recommandées

- Renforcer la sélection des copules en intégrant des métriques supplémentaires pour améliorer la robustesse des choix.
- Adopter une approche d'analyse spécifique à chaque station, ajustant les seuils d'événements extrêmes et prenant en compte les conditions locales de surcote.
- Quantifier les incertitudes associées aux choix des copules et à leurs paramètres pour générer des résultats plus adaptés à la prise de décision dans l'outil « Portail Ingénieur ».

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Table des matières	5
1. Contexte et objectifs	6
2. Données	6
2.1. Niveaux d'eau	6
2.2. Précipitations	7
2.3. Appariment des stations	7
3. Extrêmes de niveaux d'eau	9
3.1. Méthodologie	9
3.1.1. Extrêmes historiques	9
3.1.2. Ajout des simulations	10
3.1.3. Implémentation python	12
3.2. Résultats et discussion	12
3.2.1. Paramètres de GPD	12
3.2.2. Extrêmes historiques	12
3.2.3. Ajout des simulations	13
3.3. Limitations	14
4. Extrêmes conjoints	14
4.1. Contexte	14
4.2. Méthodologie	15
4.2.1. Extrêmes historiques	15
4.2.2. Ajout des simulations	17
4.2.3. Implémentation python	18
4.3. Résultats et discussion	19
4.3.1. Dépendance	19
4.3.2. Choix des copules	20
4.3.3. Probabilités conjointes	21
4.3.4. Sensitivité aux choix de la copule	23
4.3.5. Investigation des paramètres de Gumbel	25
4.4. Recommandations	26
4.4.1. Qualité de l'ajustement et autres métriques	26
4.4.2. Analyse par station	27
4.4.3. Caractérisation et communication des incertitudes	27
4.4.4. Autres recommandations	28
5. Conclusion	29
Références	30
Liste des figures	33
Liste des abréviations, sigles et acronymes	33

1. Contexte et objectifs

L'adaptation des infrastructures aux changements climatiques doit s'appuyer à la fois sur l'historique observé ainsi que sur les projections futures. Bien que divers outils existent pour encadrer le processus d'identification des risques climatiques, ils laissent souvent les analyses climatiques aux praticiens et praticiennes, qui ont ainsi besoin de connaissances et d'outils spécialisés parfois hors de portée.

Dans ce contexte, Ouranos, avec le financement de l'Initiative de recherche et de connaissances du Département Logement, Infrastructures et Collectivités Canada, a développé un outil destiné à faciliter l'évaluation de la probabilité d'occurrence des aléas affectant les infrastructures sous un climat futur. Cet outil, appelé « *Portail Ingénieur* », calcule des indicateurs pertinents pour la pratique du génie (tels que les degrés-jours de chauffage et le nombre de jours de précipitation) et offre ces résultats à travers un prototype d'interface utilisateur.

De plus, le projet intègre trois autres types d'indicateurs climatiques spécialisés : les indices de précipitations extrêmes, les niveaux d'eau côtiers, et les probabilités conjointes de précipitations et de niveaux d'eau côtiers. Les indices de précipitations extrêmes sont développés par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) et ne sont donc pas abordés dans ce rapport. Le rôle de Canadian British Consulting Limited (CBCL) a été d'apporter au projet les indices côtiers et conjoints.

L'inclusion des indices côtiers et conjoints élargit l'applicabilité du *Portail Ingénieur* aux zones côtières, où de nombreuses infrastructures publiques (par exemple, transport, eaux potables et usées, installations récréatives, logements sociaux, infrastructures électriques au sol) sont exposées aux inondations. Ces indices ont également des implications pour d'autres domaines, tels que la gestion des urgences, les chaînes d'approvisionnement, les ports, les écosystèmes marins et l'agriculture. Les inondations constituent l'un des aléas climatiques les plus importants au Canada (Bush et Lemmen, 2019). Les changements climatiques, notamment l'augmentation des précipitations extrêmes et de l'élévation du niveau de la mer, combinés à la forte dépendance entre les ondes de tempête et les précipitations dans certaines régions côtières, exacerbent les risques d'inondations conjointes (Wahl et al. 2015, Jalili Pirani et Najafi 2023).

L'objectif du travail de CBCL a été de faciliter l'évaluation de la probabilité d'occurrence des aléas côtiers et conjoints, tant dans le présent que sous les impacts des changements climatiques. Ces statistiques existent déjà sous R et Matlab, mais elles requièrent des outils et connaissances spécialisés. Ainsi, un objectif clé du projet a été de créer une première version de ces analyses en Python, tout en identifiant les besoins pour les travaux futurs, afin d'intégrer ces analyses dans l'outil « *Portail Ingénieur* » d'Ouranos. L'objectif ultime est de permettre à l'utilisateur de sélectionner, via un prototype d'interface utilisateur, un indice ou une période de retour pour une station donnée, et d'obtenir la probabilité de dépassement dans une période de référence et un horizon futur.

Le rôle de CBCL a été d'établir une méthode fondée sur la littérature scientifique existante, d'obtenir les données nécessaires (marégraphes, projections de niveaux d'eau marin), de réaliser un prétraitement des données, de mener des analyses statistiques (notamment des valeurs extrêmes et des probabilités conjointes), et de développer des outils Python. L'objectif global est de traduire la recherche en pratique pour soutenir l'adaptation climatique.

2. Données

2.1. NIVEAUX D'EAU

Deux types de données de niveaux d'eau sont exploitées : les niveaux d'eau horaires observés et les projections de l'élévation du niveau de la mer. Les données horaires de niveaux d'eau ont été obtenues auprès du Ministère des Pêches et des Océans (MPO), Section des données sur le milieu marin (MEDS).

Pour garantir l'uniformité des données, toutes les séries temporelles ont été standardisées en Temps Universel Coordonné et selon le Système canadien de référence altimétrique de 2013 (CGVD2013). Les conversions ont été effectuées à l'aide des Surfaces de Séparation Verticale Hydrographiques (HyVSEP) ainsi qu'avec les métadonnées des stations en temps réel de MEDS. Les journées comportant plus de deux heures de données manquantes ou les années ayant plus de 20 % de jours incomplets ont été exclues.

Les stations disposant de plus de 30 ans de données ont été privilégiées, car ceci est considéré comme un minimum typique pour les analyses des valeurs extrêmes des niveaux d'eau (Nadal-Caraballo et Melby, 2014). De plus, seules les stations situées dans des zones influencées par le changement du niveau de la mer ont été retenues (c'est-à-dire excluant celles situées trop haut dans les exutoires). L'ensemble de stations retenu offre une grande diversité, avec des marées allant de faibles à extrêmes. Certaines stations ont enregistré les taux d'élévation du niveau de la mer les plus élevés au Canada, tandis que d'autres affichent historiquement des baisses.

Les projections du niveau de la mer proviennent à l'origine du 6^e rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (SR6 GIEC) et sont issues de Ressources naturelles Canada (RNCan), qui a ajouté les composantes des projections relatives. Les projections sont fournies sous forme de deltas de changement depuis la période 1995 à 2014.

Il est à noter que les projections de l'élévation du niveau de la mer adoptent un format différent de celui des autres indicateurs du *Portail Ingénieur*. Le SR6 utilise le Cadre pour l'évaluation des changements du niveau de la mer (FACTS), dans lequel les modèles du Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés Phase 6 (CMIP6) représentent seulement un module parmi d'autres, tels que ceux pour les calottes glaciaires. Ce module inclut une pondération des modèles CMIP6 selon la sensibilité du climat (ECS). Dans FACTS, des simulations Monte Carlo intègrent les différents modules, de sorte que les projections sont fournies sous forme de percentiles pour chaque trajectoire socio-économique partagée (SSP) et ne sont pas disponibles séparément pour chaque modèle CMIP6 (Kopp et al., 2023). Par conséquent, aucune pondération additionnelle des modèles CMIP6 n'a été effectuée dans ces analyses, contrairement à la méthodologie utilisée pour les autres indicateurs du Portail Ingénieur.

2.2. PRÉCIPITATIONS

Les données historiques de précipitations proviennent des Données Climatologiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées (AHCCD), tandis que les projections sont issues du CMIP6. Les années ayant plus de 20 % de jours incomplets ont été exclues, mais autrement les données AHCCD ont été utilisées sans modifications. Les projections CMIP6 ont été traitées par Ouranos (extraites aux stations AHCCD et corrigées pour les biais). Ces données sont disponibles sous forme de séries journalières pour chaque modèle CMIP6 et chaque scénario SSP.

2.3. APPARIEMENT DES STATIONS

Les stations de niveaux d'eau et de précipitations ont été appariées en fonction de leur proximité géographique, avec une distance maximale autorisée de 0,5 degré. Dans les cas où plusieurs stations de précipitations se trouvaient près d'une station marégraphique, la plus proche a été retenue en priorité. Seules les paires de stations disposant d'au moins 30 années de données chevauchantes ont été retenues. Un total de 22 paires de stations répondant à ces critères a été sélectionné pour les analyses.

La Figure 1 démontre la disponibilité des données pour les paires de stations sélectionnées, en soulignant les chevauchements entre les deux variables (violet). La Figure 2 cartographie les paires de stations sélectionnées.

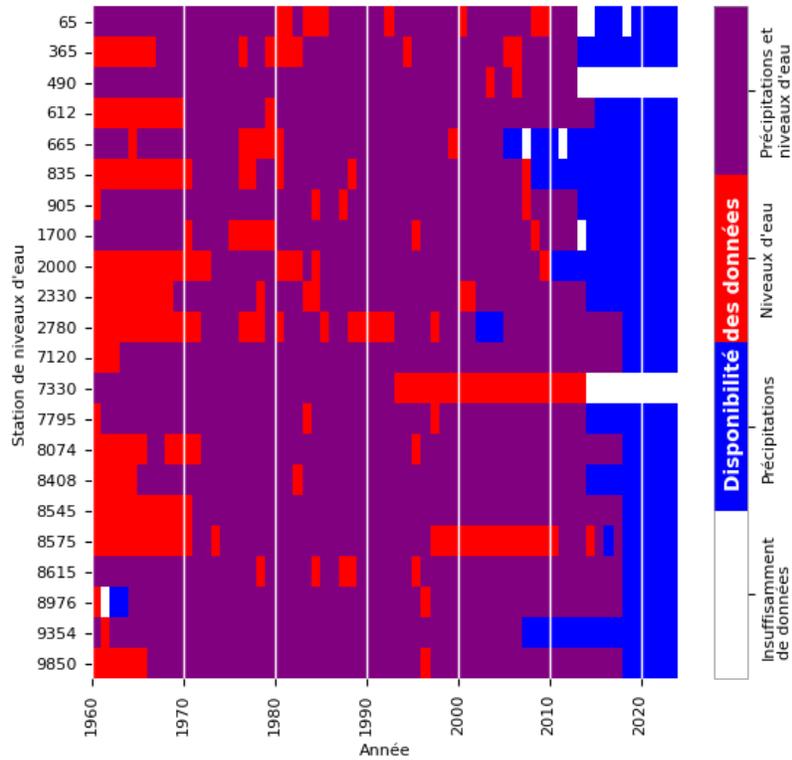


Figure 1 Disponibilité des données aux stations de niveaux d'eau (rouge) et de précipitations (bleu) ainsi que leur chevauchement (violet). Les paires de stations sont indiquées avec le numéro de station de niveaux d'eau.

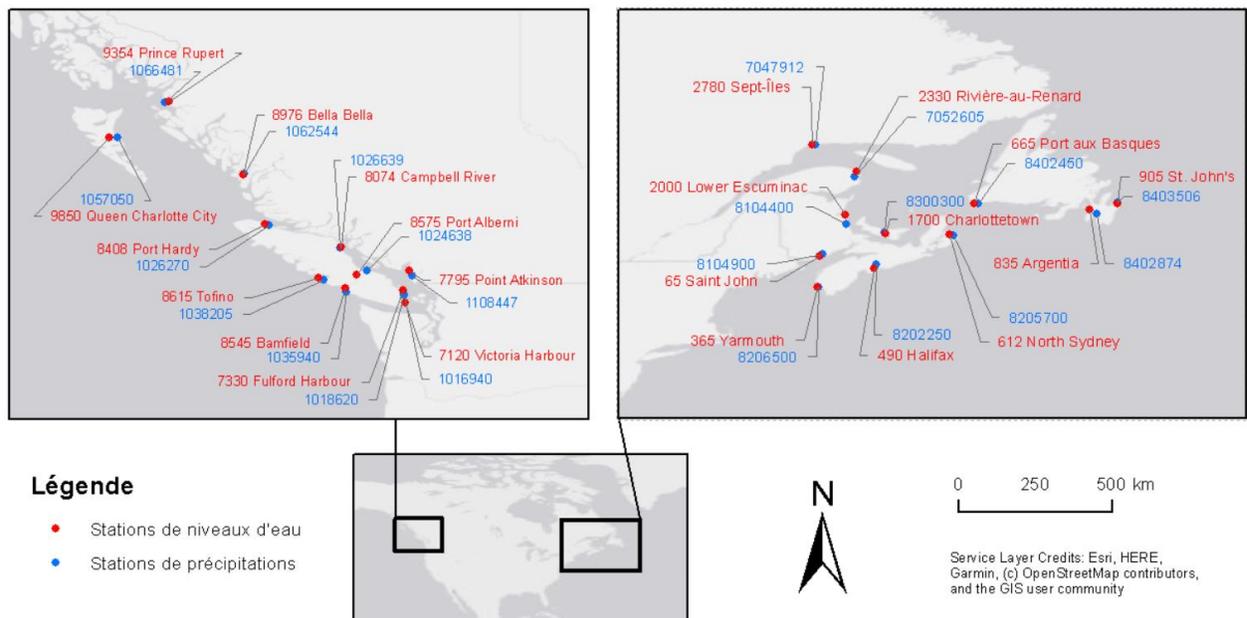


Figure 2 Carte des 22 paires de stations sélectionnées pour l'analyse.

3. Extrêmes de niveaux d'eau

3.1. MÉTHODOLOGIE

3.1.1. Extrêmes historiques

L'analyse des valeurs extrêmes, qui consiste à ajuster une distribution statistique aux événements rares, est une étape essentielle pour concevoir des infrastructures résilientes face aux événements côtiers extrêmes. La méthode suivie ici repose sur une revue de la littérature, comprenant des documents de référence canadiens, américains et internationaux (OMM 2011, Nadal-Caraballo et Melby (USACE) 2014, Zhai et al. (MPO) 2015, FEMA 2016, Enda et Naveed (CRN) 2017, Sweet et al. (NOAA) 2022), ainsi que des synthèses (Arns et al. 2013, Wahl et al. 2015, Yilmaz et al. 2021, Caruso et Marani 2022) et des études de cas (par exemple, Watson 2023 pour la côte est des États-Unis, Watson 2022 pour l'Australie). Coles (2001) est une référence fondamentale sur la théorie des valeurs extrêmes. Les travaux disponibles soulignent que l'analyse des valeurs extrêmes est complexe et sujette à des erreurs susceptibles de produire des résultats absurdes. Les méthodes ne sont pas standardisées.

Deux choix méthodologiques clés ont été effectués dans ce projet. Premièrement, les niveaux d'eau totaux ont été utilisés plutôt que les surcotes, car ils sont plus directement pertinents pour les ingénieurs dans les évaluations des risques. En plus, à certains endroits la marée et les ondes de tempêtes ne sont pas indépendantes (par exemple dans la Baie de Fundy et à Charlottetown). Les niveaux d'eau totaux incluent donc les marées, les ondes de tempêtes, et les fluctuations saisonnières.

Deuxièmement, la méthode des dépassements de seuil (en anglais « peak-over-threshold », POT) couplée à la distribution de Pareto généralisée (en anglais « generalized pareto distribution », GPD) a été privilégiée par rapport à la méthode des maxima par blocs (en anglais « block maxima », BM) utilisant la distribution généralisée des valeurs extrêmes (en anglais « generalized extreme value distribution », GEV). Bien que les deux approches soient couramment utilisées, la méthode GPD permet une meilleure exploitation des données extrêmes (Nadal-Caraballo et Melby 2014, Enda et Naveed 2017).

Les étapes méthodologiques du projet sont illustrées dans la **Error! Reference source not found.** et expliquées ci-dessous :

- **Coupe à 1960** : Seules les données postérieures à 1960 ont été retenues. Ce choix vise à garantir que l'analyse reflète les conditions actuelles.
- **Pas de coupe à la période de référence** : Contrairement aux indicateurs de température et de précipitations du *Portail Ingénieurs*, les indicateurs côtiers incluent tous les événements extrêmes survenus après 1960, indépendamment de la période de référence définie par l'utilisateur. Cette approche permet d'améliorer la robustesse des statistiques en intégrant un plus grand nombre de pics, tout en remédiant à une éventuelle insuffisance d'événements extrêmes dans la période de référence.
- **Élimination des tendances**: Une approche d'élimination de la tendance linéaire a été adoptée, en se basant uniquement sur la tendance observée depuis 1960, considérée comme plus représentative des taux de changement récents. Bien que d'autres méthodes, telles que la suppression des moyennes annuelles ou l'utilisation d'une moyenne mobile sur 19 ans, aient été envisagées, elles n'ont pas été jugées nécessaires en raison des fluctuations interannuelles modérées.
- **Normalisation** : La normalisation par rapport à la période de référence définie par l'utilisateur a été effectuée en tenant compte de la tendance linéaire. Après plusieurs essais, cette méthode a été privilégiée à une normalisation basée sur la différence des moyennes calculées sur différentes périodes, afin d'éviter les biais liés aux données manquantes et de permettre une extrapolation cohérente.
- **Sélection du seuil** : Le choix du seuil est une étape critique car il influence significativement les résultats. Ce choix repose sur un équilibre entre biais et variance (Coles, 2001) et dépend des caractéristiques

propres à chaque série temporelle (Watson, 2023). Pour chaque station, le seuil a été déterminé à partir d'indicateurs et d'analyses graphiques, notamment la durée résiduelle moyenne, la stabilité des paramètres GPD, et la stabilité des périodes de retour.

- **Calcul des POT indépendants** : Après avoir défini le seuil pour chaque station, les extrêmes sont identifiés comme les événements dépassant ce seuil, avec une période minimale de 25 heures entre chaque événement pour garantir leur indépendance (Coles, 2001). Différentes durées de séparation ont été testées pour générer des événements indépendants, en tenant compte de la persistance des événements au-dessus du seuil (Watson, 2022).
- **Ajustement de la distribution** : Les paramètres de la GPD ont été ajustés via les moments pondérés par probabilité (en anglais « probability weighted moments », PWM). Bien que l'estimation par maximum de vraisemblance (en anglais « maximum likelihood estimation », MLE) soit couramment utilisée, elle présente des limitations connues pour la GPD (Bommier, 2014). Les distributions ajustées par PWM et MLE ont été comparées à travers plusieurs graphiques (fonction de distribution de probabilité (PDF), fonction de distribution cumulative (CDF), quantile-quantile (Q-Q), probabilité-probabilité (P-P), valeurs de retour), et le PWM s'est avéré plus stable.
- **Qualité d'ajustement** : La qualité de l'ajustement a été évaluée à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov (KS) et d'analyses visuelles des graphiques PDF, CDF, Q-Q, P-P, et valeurs de retour (Figure 4).
- **Calcul des aléas** : Les méthodes de distribution ont été utilisées pour évaluer les aléas, par exemple, la fonction de survie a été utilisée pour calculer la probabilité de dépassement d'un seuil. Étant donné l'adoption de la distribution GPD, les résultats ont été ajustés en fonction du nombre de dépassements annuels du seuil.
- **Incertitudes** : Une méthodologie de bootstrap a été utilisée pour calculer les intervalles de confiance des paramètres GPD. Cependant, le choix effectué par Ouranos pour *Portail Ingénieur* a été de fournir une sortie sous forme d'une seule valeur afin de simplifier l'outil pour les utilisateurs non techniques. Pour cette raison, les indices côtiers rapportés dans l'outil sont basés sur la médiane des échantillons bootstrap.

3.1.2. Ajout des simulations

Les projections de niveau de la mer sont intégrées à l'analyse en ajoutant un changement du niveau moyen relatif de la mer aux pics historiques observés. Ainsi, les impacts climatiques sont pris en compte uniquement pour les changements du niveau moyen de la mer, et non pour les changements potentiels dans la fréquence des surcotes. Ceci est une simplification, car les changements climatiques, dont la réduction de la couverture de glace, auront probablement un impact sur les surcotes (Bevacqua et al., 2020a). Les étapes méthodologiques pour intégrer ces simulations sont les suivantes :

- **Normalisation** : Les projections de niveau de la mer sont fournies sous forme de deltas par rapport à la période 1995-2014. Par conséquent, lorsque l'utilisateur sélectionne une période de référence différente de 1995-2014, une normalisation basée sur les tendances linéaires historiques est appliquée.
- **Ajustement** : Le delta des projections est utilisé pour modifier le paramètre de localisation de la GPD, qui a été ajustée aux événements historiques.
- **Pondération** : Les projections de niveau de la mer sont disponibles sous forme de quantiles. Les quantiles sont convertis en une distribution à l'aide de méthode « bootstrap », sans pondération des modèles, contrairement aux indices basés sur la température et les précipitations du *Portail Ingénieurs* (voir projections FACTS Section 2.1). Conformément aux méthodes du *Portail Ingénieurs*, la pondération des scénarios est appliquée (Huard et al., 2022).
- **Calcul des aléas** : Le calcul des aléas suit la même approche que pour les données historiques, mais avec le paramètre GPD modifié (Figure 4).

- **Incertitude** : Pour s'aligner avec le choix effectué par Ouranos de fournir valeur unique de probabilité à l'utilisateur dans *Portail Ingénieurs*, l'incertitude résultant de l'ajustement statistique, des scénarios et des modèles est combinée.

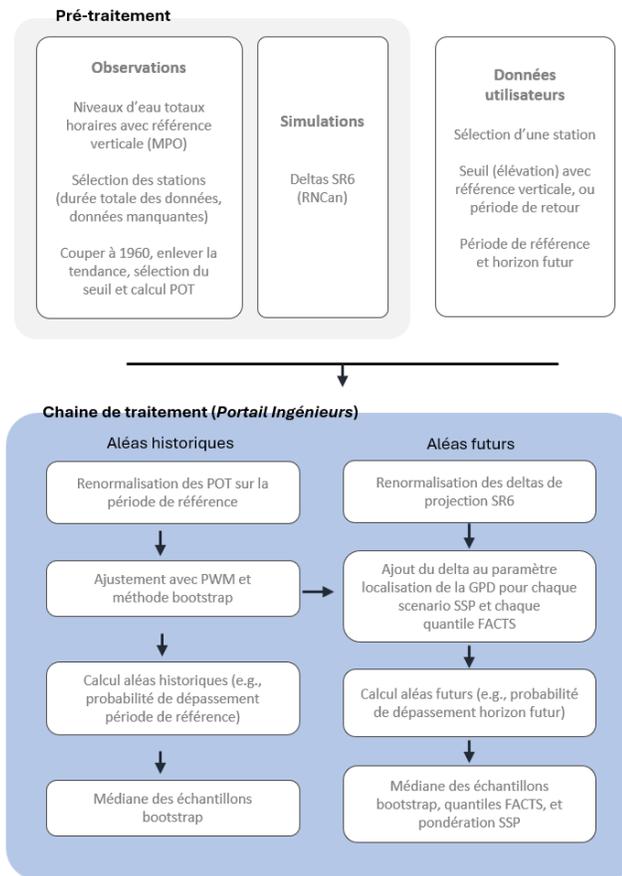


Figure 3 Étapes méthodologiques de l'analyse d'extrêmes de niveaux d'eau côtiers.

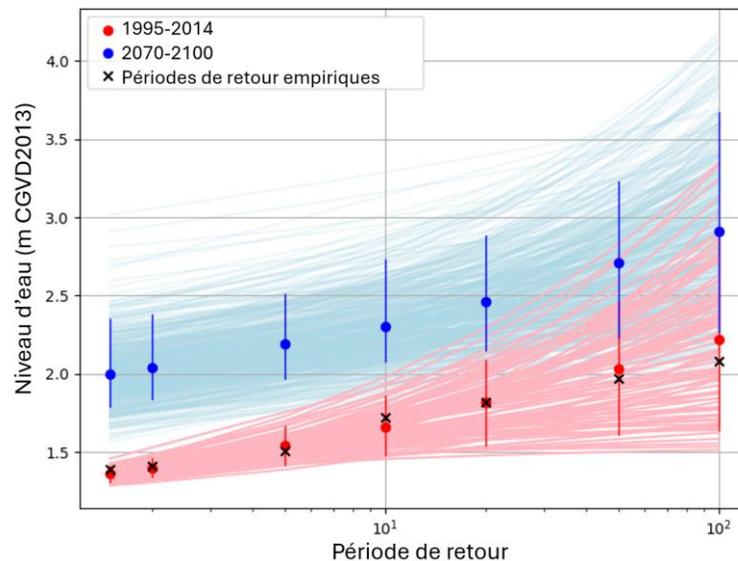


Figure 4 Exemple de l'ajustement pour la station 1700 Charlottetown, montrant des échantillons bootstrap (lignes claires), le 50^e percentile (cercle), et les 10^e et 90^e percentiles (ligne verticale).

3.1.3. Implémentation python

Le package *pyextremes* a été utilisée pour la sélection des seuils, tandis que le package *lmoments3* a été employée pour l'ajustement des distributions. D'autres packages python avaient été initialement envisagés, tels que *openturns*, *pywafo*, *thresholdmodeling*, *statsmodels*, *Scikit-ExtremeValue* et *extremes*. Les critères utilisés pour sélectionner les packages incluent la disponibilité de la GPD, la possibilité de produire des graphiques et des métriques de sélection des seuils, les méthodes d'ajustement et leur flexibilité, l'analyse de l'incertitude et l'estimation des intervalles de confiance, la capacité à fournir des valeurs de retour empiriques, ainsi que la réputation du package.

3.2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.2.1. Paramètres de GPD

Le paramètre de forme de la GPD constitue un facteur important dans l'analyse. Plus de 80 % des stations présentent des paramètres de forme entre $\pm 0,3$, ce qui est typique pour ce type d'étude (Nadal-Caraballo et Melby, 2014). Certaines recommandations suggèrent de contraindre les paramètres de forme trop élevés ($> 0,25$, Nadal-Caraballo et Melby, 2014), mais cela n'a pas été nécessaire dans ces résultats. En effet, la plupart des stations présentent des paramètres légèrement négatifs. Une bonne cohérence spatiale des paramètres de forme est observée (Figure 5). Les deux valeurs les plus basses correspondent à des stations avec de fortes amplitudes de marée (Saint John et Queen Charlotte City).

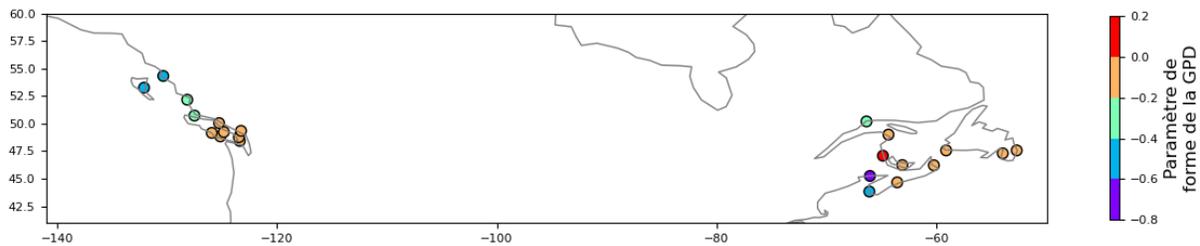


Figure 5 Carte du paramètre de forme de la GPD avec ajustement PWM.

Un paramètre de forme négatif veut dire que la GPD a une queue supérieure bornée, ce qui, selon Arns et al. (2013) et Watson (2023), est une forme attendue pour les phénomènes des systèmes naturels, qui tendent à être asymptotiquement limités par des forçages naturels. Par exemple, les formations de vagues dues au vent sont généralement limitées par les vitesses maximales des vents mesurées et les distances disponibles pour la propagation dans les bassins océaniques. Wahl et al. (2017) montrent que, globalement, 85 % des paramètres de forme sont négatifs (d'après les données globales de marégraphes GESLA-2).

Beck et al. (2020), qui ont également analysé les niveaux d'eau extrêmes au Canada atlantique, ont choisi de fixer le paramètre de forme, estimant que les différences observées entre les stations adjacentes étaient négligeables par rapport à l'erreur standard. Cependant, fixer un paramètre de forme est risqué car les résultats sont sensibles à cette valeur. Étant donné la cohérence spatiale des résultats de paramètres de forme de cette étude-ci, nous avons choisi de ne pas imposer de contrainte sur ce paramètre. Cette approche pourrait être révisée à l'avenir.

L'ajustement a été fait avec la méthode PWM, mais des comparaisons ont été faites avec un ajustement MLE. Les paramètres de forme obtenus par MLE présentaient une gamme plus large, de -2,01 à 0,48, et moins de cohérence spatiale.

3.2.2. Extrêmes historiques

Les niveaux d'eau historiques associés à une période de retour de 50 ans (dénoté 1:50) varient d'environ 1 m à 4 m CGVD2013 (Figure 6), selon l'amplitude des marées, la position sur le géoïde, l'exposition aux ondes de tempête et d'autres facteurs. Une recherche approfondie a été menée pour obtenir des comparaisons à partir

de la littérature. En tout, six études ont fourni des valeurs pouvant être comparées (Bernier et Thompson 2006, Zhai et al. 2015, Daigle 2017, Beck et al. 2020, Han et Lu, 2023, Bizhanimanzar et al. 2024), en plus des analyses séparées issues de projets précédents menés par CBCL. Dans certains cas, les auteurs ont été contacté confirmer les repères verticaux, et dans d'autres cas des hypothèses ont été présent sur les repères d'origine. Certaines valeurs étaient disponibles dans des tableaux, tandis que d'autres ont dû être extraites de figures. Ceci a donné plusieurs douzaines de comparaisons pour différentes stations et différentes périodes de récurrence. En général, les résultats sont jugés comparables, malgré les différences de méthodologie tel que des variations de la période de référence, de la méthode d'ajustement, et même de la distribution utilisée.

3.2.3. Ajout des simulations

La probabilité d'occurrence des extrêmes historiques augmente rapidement dans le futur (Figure 6). Par exemple, pour la plupart des stations, une tempête actuellement associée à une période de retour de 50 ans pourrait se produire chaque année d'ici 2070-2100. Ces changements rapides sont cohérents avec les paramètres de forme négatifs obtenus (Section 3.2.1).

La magnitude de ces résultats est en accord avec d'autres études. Par exemple, Sweet et al. (2022) a estimé que, dans divers endroits aux États-Unis, des événements ayant des périodes de retour comprises entre 1 sur 20 et 1 sur 100 pourraient se produire chaque année d'ici les années 2060. Wahl et al. (2015) ont également conclu que, dans de nombreux sites à l'échelle mondiale, un événement actuel de 100 ans se produira statistiquement au moins une fois par an d'ici 2050 (scénario RCP4.5). Selon Watson (2023), un événement à Sydney (Australie) de 500 ans en 2020 aurait une période de retour de 20 ans en 2100 (SSP5-8.5). Ces études ont des méthodes et scénarios climatiques qui varient légèrement, mais cela permet de confirmer que les résultats obtenus sont dans l'ordre de grandeur anticipé.

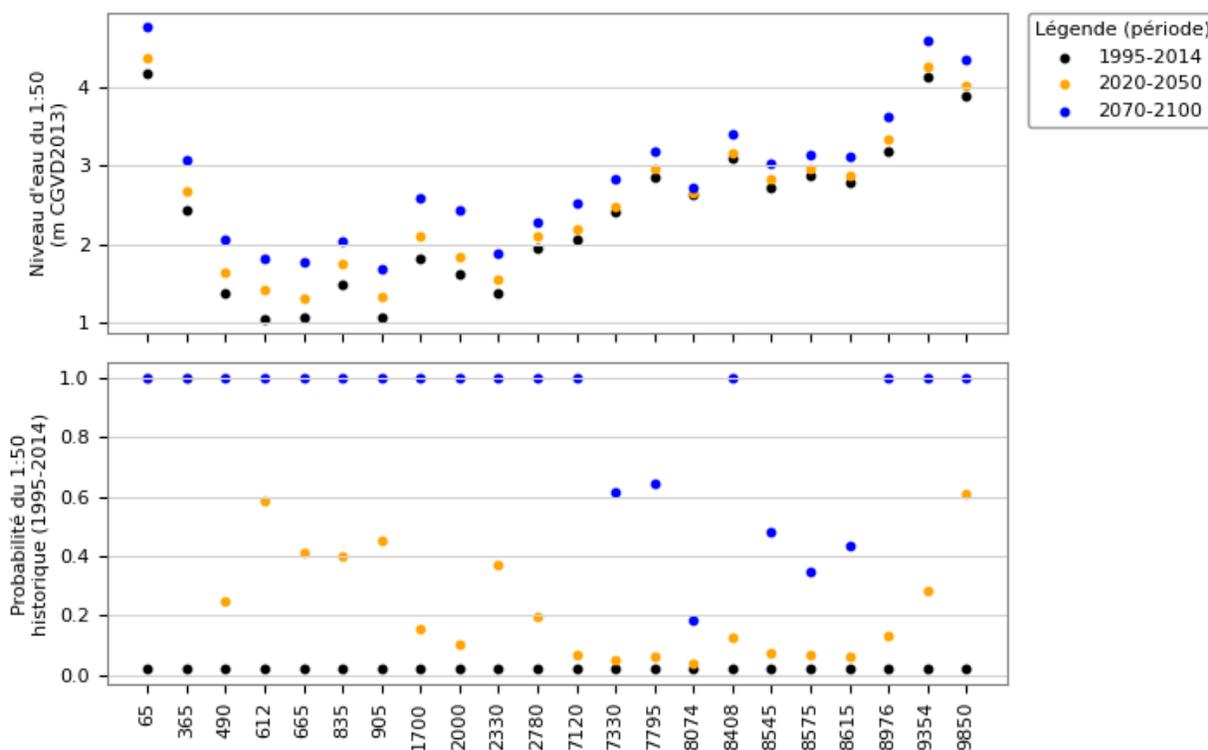


Figure 6 Résultats des extrêmes de niveaux d'eau historiques et futurs.

3.3. LIMITATIONS

Plusieurs limitations doivent être prises en compte. L'utilisation des niveaux d'eau totaux rend les résultats plus directement pertinents aux ingénieurs, mais limite l'analyse aux stations où des observations historiques sont disponibles, ce qui restreint la couverture géographique et temporelle des données.

Les analyses ont été effectuées seulement pour les événements relativement extrêmes (période de retour de plus de 1 an), car la GPD n'est valide que si le seul de dépassement est plus grand que le seuil utilisé dans l'analyse POT. Les probabilités approchant 1 ne sont donc pas fiables, et les événements qui se produisent plusieurs fois par an n'ont pas été évalués.

Dans la majorité des cas, les jauges de niveaux d'eau peuvent être considérées comme ayant une tendance linéaire. Cependant, cette hypothèse pourrait ne pas être appropriée dans certaines situations, et des analyses plus poussées pourraient être nécessaires pour explorer d'autres comportements des niveaux d'eau moyens et d'autres approches de normalisation.

Enfin, bien qu'il soit supposé qu'il n'y ait pas de changement de surcotes, cette hypothèse pourrait ne pas être valide dans certains contextes, notamment en raison de changements dans la couverture de glace de mer.

4. Extrêmes conjoints

4.1. CONTEXTE

Les événements conjoints sont définis comme la survenue simultanée ou successive de plusieurs événements liés à un facteur externe commun (Naseri et Hummel, 2022). Il n'est pas nécessaire que les indices respectifs soient extrêmes pour entraîner des conséquences graves : ainsi, un drainage de précipitations modérées bloqué par des surcotes modérées peut provoquer des inondations majeures (Wahl et al., 2015).

Les tempêtes, notamment les cyclones tropicaux et extratropicaux, jouent un rôle clé dans les inondations conjointes, en combinant précipitations abondantes et ondes de tempête (Wahl et al. 2015, Bevacqua et al. 2019, Lai et al. 2021). Par exemple, le passage d'un ouragan peut augmenter les niveaux d'eau, pénétrer dans les bassins versants et se joindre à des précipitations intenses pour provoquer des inondations majeures (Jalili Pirani et Najafi 2023).

Ces processus sont particulièrement pertinents pour le Canada Atlantique en raison de la fréquence des cyclones tropicaux (Jalili Pirani et Najafi 2023). Sur la côte pacifique du Canada, bien que les cyclones tropicaux soient rares, des dynamiques similaires peuvent se produire avec les tempêtes extratropicales (Bromirski et al. 2017, Bevacqua et al. 2020a). Une forte dépendance entre les précipitations et les ondes de tempête est plus probable dans les zones côtières vallonnées (Svensson et Jones 2004, Lai et al. 2021), telles que certaines côtes du Canada.

Cette étude se concentre sur les événements conjoints de précipitations –plutôt que débits fluviaux – combinées aux niveaux d'eau. Cette approche basée sur les précipitations est particulièrement pertinente pour les bassins côtiers à réponse hydrologique rapide, tels que les bassins escarpés de la côte pacifique ou les petits bassins urbains imperméables (Jalili Pirani et Najafi 2023). L'utilisation des précipitations peut également servir d'approximation pour les débits des petites rivières : Bevacqua et al. (2020b) suggère qu'une analyse conjointe basée sur les précipitations est adaptée pour évaluer le potentiel d'inondations composées dans les estuaires de petites à moyennes rivières moins de 5 000 km². Bien que ce seuil soit peut-être trop élevé (par exemple, de nombreux bassins de cette taille au Canada ont des extrêmes dominés par la fonte des neiges), l'idée reste valable : dans certains cas, les précipitations peuvent être représentatives des inondations dans des petits bassins versants.

Il est attendu que l'occurrence d'événements conjoints varie le long des côtes canadiennes, notamment en raison de la bathymétrie et de la géométrie des côtes, qui influencent la hauteur des ondes de tempête

(Bloemendaal et al. 2019). De plus, l'amplitude des marées module également les événements conjoints. Dans les régions à grandes amplitudes de marée, les surcotes extrêmes peuvent coïncider avec des marées modérées, réduisant ainsi la dépendance entre les ondes de tempête et les niveaux marins totaux (Haigh et al. 2016, Ward et al. 2018). D'autre part, pour certains sites, la profondeur accrue de la marée haute facilite la propagation des vagues et des surcotes (Bevacqua et al. 2020a). Enfin, les projections de l'élévation du niveau de la mer et de l'intensification des précipitations risquent d'aggraver les risques du au événements conjoints, au Canada et ailleurs (Bevacqua et al. 2019, Bevacqua et al. 2020a).

4.2. MÉTHODOLOGIE

4.2.1. Extrêmes historiques

La deuxième partie de ce projet s'est concentrée sur la co-occurrence des niveaux d'eau côtiers extrêmes et des précipitations extrêmes. Dans la recherche hydrologique et côtière, les copules sont souvent utilisées comme méthode d'analyse multivariée pour modéliser la dépendance entre variables extrêmes (Salvadori et De Michele 2004, Sadegh et al. 2017). Les copules sont des fonctions mathématiques qui « joignent » ou « couplent » deux ou plusieurs variables indépendantes dans le temps, quel que soit leur type de distribution univariée (Genest et Favre, 2007).

Les analyses hydrologiques et côtières multivariées utilisent principalement un groupe restreint de copules : elliptiques (par exemple, gaussienne, Student) et archimédiennes (par exemple, Frank, Gumbel, Clayton; Lucey et Galien, 2022). Certains chercheurs favorisent l'utilisation du plus grand nombre de copules possible (Sadegh et al. 2017), tandis que d'autres insistent sur un choix des familles de copules stratégique (Tu et al. 2017, Ward et al. 2018). Dans ce projet, les cinq copules mentionnées ci-dessus ont été utilisées en raison de leur popularité dans la littérature côtière et hydrologique et de leur disponibilité en Python. Le lecteur est référé à Tootoonchi et al. (2022) pour une synthèse des propriétés de dépendance en queue et de symétrie de ces cinq copules. En général, la copule de Gumbel présente une dépendance en queue supérieure, celle de Frank aucune dépendance en queue, et celle de Clayton une dépendance en queue inférieure. Les copules gaussiennes et de Student sont toutes deux symétriques, mais la copule de Student offre une plus grande flexibilité pour modéliser les queues grâce à un paramètre supplémentaire de degré de liberté.

L'analyse des probabilités conjointes est menée en identifiant les événements cooccurrents, en ajustant chaque variable de manière univariée, en transformant les marginales en rangs (« pseudo-observations ») et en utilisant des copules pour modéliser la structure de dépendance. Un aspect central de cette approche est donc la sélection des événements cooccurrents.

Dans ce projet, les niveaux d'eau horaires maximaux et les précipitations journalières maximales dans une fenêtre de ± 1 jour ont été retenus comme événements co-occurrents. Cette approche repose sur l'idée que les extrêmes conjoints, tels que les tempêtes, influencent à la fois les niveaux d'eau horaires maximaux et les précipitations journalières, plutôt que des précipitations de plus courte durée. Zheng et al. (2014) ont montré qu'en Australie, les événements conjoints sont principalement liés à des forçages météorologiques synoptiques, avec une dépendance significative pouvant s'étendre à plusieurs centaines de kilomètres entre les marégraphes et les pluviomètres. Cette dépendance est plus marquée lorsque l'on considère des précipitations cumulées sur 24 heures plutôt que sur des intervalles horaires. Bien que réalisée dans un contexte australien, cette étude, ainsi que les travaux de Jalili Pirani et Najafi (2020, 2023), appuie l'utilisation des précipitations journalières plutôt qu'horaires.

De plus, dans les cas où les précipitations sont utilisées comme un proxy pour les débits de petites rivières (voir Section 1), le décalage de ± 1 jour permet de tenir compte des retards entre précipitations et débits de pointe. Des décalages plus longs ne sont pas inclus, car ils indiqueraient que les précipitations ne constituent pas un proxy adapté pour les débits.

Les étapes méthodologiques du projet sont illustrées dans la Figure 7 et décrites ci-dessous :

- **Marginale des niveaux d'eau** : La marginale des niveaux d'eau a été préparée en limitant la série temporelle aux données postérieures à 1960, en supprimant les tendances, et en normalisant les données, comme dans la première partie de cette étude (Section 3).
- **Marginale des précipitations** : Les données de précipitations ont été nettoyées et tronquées pour commencer en 1960. Comme pour les niveaux d'eau, tous les extrêmes ont été utilisés, indépendamment de la période de référence définie par l'utilisateur. Cependant, les précipitations n'ont pas été normalisées. Cette approche est cohérente avec les analyses suggérant que les tendances des extrêmes de précipitations historiques ne sont pas significatives dans la majorité du Canada (Jalili Pirani et Najafi 2020).
- **Seuil du 95e percentile** : Les POT de la première marginale sont sélectionnés au-dessus du 95e percentile sur la période depuis 1960. Augmenter le nombre d'événements (en utilisant le 95e percentile au lieu du 98e ou du 99e) a permis de détecter une dépendance significative de Kendall sur un plus grand nombre de stations.
- **Événements conditionnels** : Les événements de la seconde marginale sont sélectionnés en utilisant les POT de la première marginale, en identifiant le maximum dans une fenêtre de ± 1 jour. Un décalage de ± 2 jours a également été testé, mais il a montré une dépendance plus faible. Les événements conditionnels ont été identifiés selon deux approches : avec les niveaux d'eau en première marginale (indice « *wl_prcond* ») et avec les précipitations en première marginale (indice « *pr_wlcond* »). Les précipitations inférieures à 1 mm ont été exclues de l'analyse.
- **Tau de Kendall** : Le tau de Kendall a été calculé pour les deux séries de paires d'événements (« *wl_prcond* » et « *pr_wlcond* »). La dépendance a également été examinée à l'aide de méthodes graphiques, notamment des nuages de points de pseudo-observations et des diagrammes de Kendall (Genest et Favre, 2007 ; Tootoonchi et al., 2022).
- **Ajustement des marginales** : Une GPD est ajusté à la première marginale en utilisant la méthode PWM, comme dans la première partie de cette étude (Section 3). Pour la seconde marginale, une distribution univariée (parmi les distributions normales, t, gamma, GEV, log-normale et uniforme) est sélectionnée avec le CIB, ajustée par MLE, et évalué avec le test KS.
- **Pseudo-observations** : Les marginales sont converties en pseudo-observations à l'aide de la copule empirique (comme dans Couasnon et al., 2020). Il convient de noter que la CDF ajustée aurait pu être utilisée à la place (Jalili Pirani et Najafi, 2023), mais la conversion imparfaite en une distribution uniforme a été jugée problématique pour les étapes ultérieures. La moyenne des rangs a été utilisée pour résoudre les concordances (voir Tootoonchi et al. 2022 pour une discussion sur les différentes options pour gérer les concordances, en anglais « ties »).
- **Ajustement des copules** : Les copules ont été ajustées avec la méthode MLE, avec des estimations initiales basées sur les relations théoriques avec le tau de Kendall ou rho de Spearman, avec les package python *copulae* (Section Implémentation 3.1.3). Cette méthode est préférable à l'ajustement paramétrique (voir discussion dans Genest et Favre, 2007).
- **Qualité de l'ajustement** : Idéalement, le test S_n de Genest et al. (2009) aurait été utilisé pour évaluer la qualité de l'ajustement des copules. Cela a été tenté, mais il a été constaté que son implémentation dans le package *copulae* était incomplète. Par conséquent, des méthodes visuelles (nuages de points, Q-Q plots) ont été employées (Genest et al. 2006, Bizhanimanzar et al. 2024).
- **Sélection des copules** : Les copules ont été sélectionnées selon la valeur CIB la plus basse, ce qui a permis de comparer des modèles ayant des nombres de paramètres différents. Dans d'autres projets où le test S_n ne différenciait pas les familles de copules, le CIB a aussi été le facteur déterminant pour la sélection de la copule (Jalili Pirani et Najafi, 2023 ; Tootoonchi et al. 2022).

- **Calcul des aléas.** La copule est utilisée pour calculer la probabilité de dépassement dans le scénario AND, où les deux marginales dépassent leurs seuils respectifs (Salvadori et al., 2016). Ce calcul consiste à convertir les seuils donnés par l'utilisateur en probabilités univariées à l'aide des distributions marginales, puis à utiliser la copule pour déterminer la probabilité conjointe. Dans le cas où les variables sont statistiquement indépendantes, leur distribution conjointe est simplement le produit des distributions marginales. Étant donné que la distribution GPD a été adoptée pour l'une des marginales, les résultats ont été corrigés en fonction du nombre annuel de dépassements de seuil.
- **Incertitudes.** Comme indiqué dans la Section 3, le choix effectué pour *Portail Ingénieur* a été de fournir une sortie sous forme d'une seule valeur afin de simplifier l'outil pour les utilisateurs non techniques. Par conséquent, à ce stade, l'évaluation d'incertitude des paramètres de la copule n'a pas été priorisée, et les incertitudes des marginales n'ont pas été propagées dans l'analyse de la copule. D'un point de vue scientifique, il serait idéal de conserver toutes les incertitudes distinctes et de les propager tout au long de l'analyse. Cela pourrait être envisagé dans une phase ultérieure.

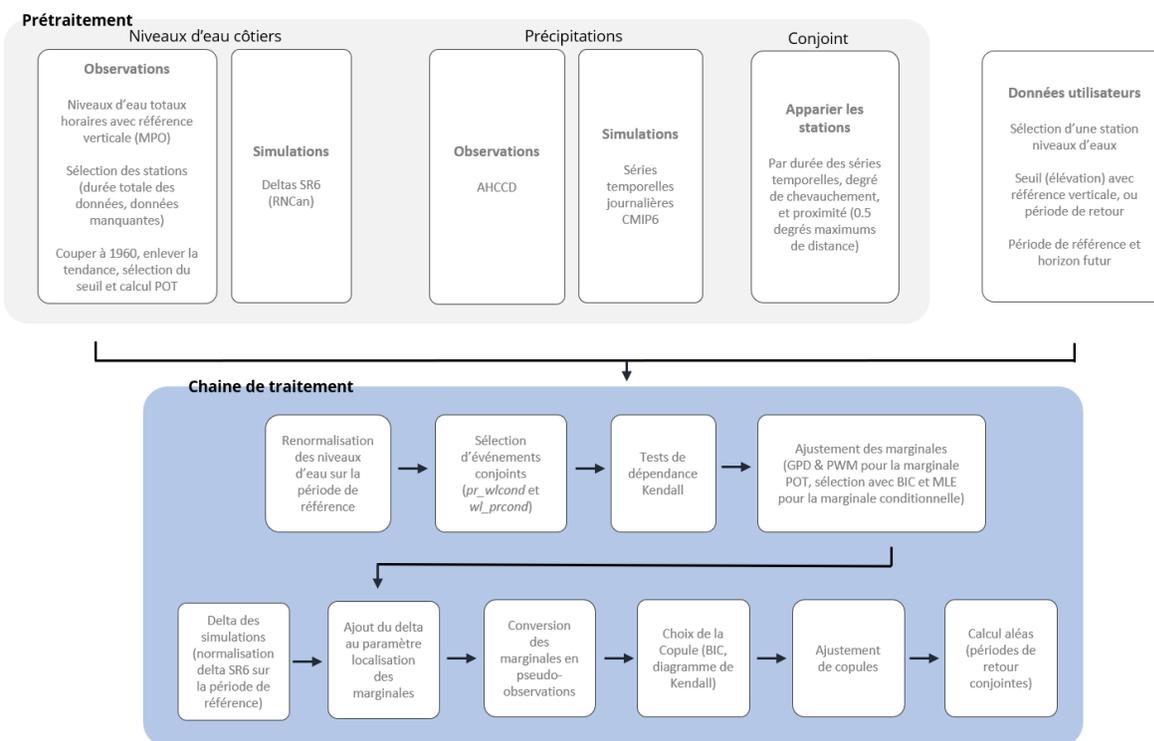


Figure 7 Étapes méthodologiques de l'analyse des extrêmes conjoints de niveaux d'eau et de précipitations.

4.2.2. Ajout des simulations

Pour l'analyse conjointe futur, les simulations sont prises en compte avec l'usage de deltas. Ceci suppose une structure de dépendance stationnaire entre les niveaux d'eau et les précipitations, malgré des preuves suggérant le contraire dans certains cas (par exemple, Wahl et al., 2015). Pour simuler les niveaux d'eau futurs, un delta de niveau de mer projeté est ajouté aux niveaux d'eau historiques. Pour le cas des précipitations, la sélection d'événements conditionnels est impossible en raison de l'absence de séries temporelles futures des niveaux d'eau. Par conséquent, les projections de précipitations sont également appliquées sous forme de deltas aux observations historiques, suivant la même approche utilisée pour le niveau de mer. Dans ce cadre, le changement climatique modifie les distributions marginales, mais pas leur structure de dépendance, ce qui signifie que la même copule est utilisée pour les analyses historiques et futures.

Les deltas climatiques utilisés pour les marginales sont précisés ci-dessous :

- **Delta niveaux d'eau.** Les projections de niveau de la mer sont fournies sous forme de deltas par rapport à la période 1995-2014. Par conséquent, lorsque l'utilisateur sélectionne une période de référence différente de 1995-2014, une normalisation basée sur les tendances linéaires historiques est appliquée. Le même delta est appliqué aux niveaux d'eau POT ainsi qu'aux niveaux d'eau conditionnels (indices *wl_prcond* et *pr_wlcond* respectivement).
- **Delta précipitations POT.** Pour la marginale des précipitations POT dans *pr_wlcond*, le delta est la différence entre le 95e percentile de l'horizon futur et celui de la période de référence. Une approche alternative aurait été de calculer le delta moyen des événements dépassant le 95e percentile, mais le delta du 95e percentile a été choisi pour des raisons de simplicité.
- **Delta précipitations conditionnelles.** Pour la marginale conditionnelle des précipitations dans *wl_prcond*, un delta a été calculé en utilisant les rangs des extrêmes conditionnels de la période historique. Le processus est démontré dans la Figure 8. **Error! Reference source not found.**

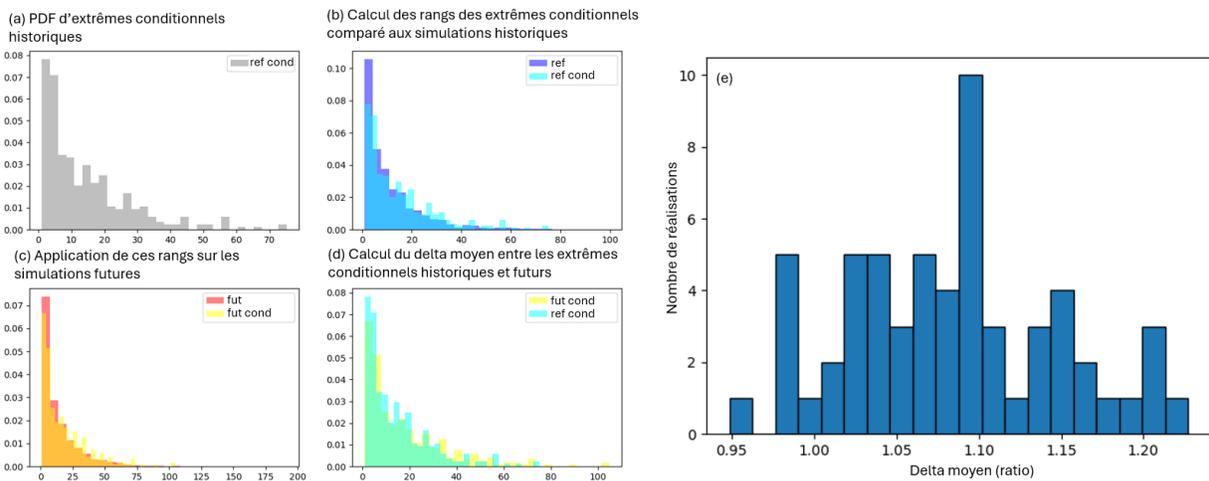


Figure 8 Processus pour obtenir le delta des précipitations conditionnelles. Les cadres (a) à (d) sont pour une seule réalisation CMIP6. Le cadre (e) démontre les deltas à travers toutes les réalisations, pour une station (490, Halifax)

4.2.3. Implémentation python

Les packages python suivants ont été examinés : *copulae*, *openturns*, *statsmodels*, *copulas*, *pycop*, *copulabayesnet*, *pycopula*, *Clayton/COPPY*, *copula wrapper* et *copulalib*. Après évaluation, une combinaison de *copulae* et *openturns* a été choisie. *Copulae* a été sélectionné pour le test de qualité d'ajustement Sn de Genest et al. (2009), et *openturns* pour le calcul du CIB. Les classes des deux packages sont intégrées dans un module de *Portail Ingénieur*.

La Figure 9 Classes python pour l'intégration des analyses côtières et conjointes dans *Portail Ingénieur* Figure 9 présente les classes python conçues pour s'aligner avec la structure existante d'Ouranos du *Portail Ingénieur* (les classes *IndicatorObsDA* et *IndicatorDA*, basées sur *param.Parameterized*). Les classes *IndicatorObsWL* et *IndicatorSimWL* permettent d'effectuer l'analyse des extrêmes côtiers (première partie du projet, Section 3). Pour l'analyse conjointe, quatre autres classes ont été ajoutées pour les marginales, ainsi que deux classes pour les analyses conjointes historiques et futures. En tout, il a été nécessaire de créer 10 classes distinctes en raison des divergences dans les calculs dans chaque cas (par exemple : traitement du delta, normalisation, sélection et ajustement de la distribution).

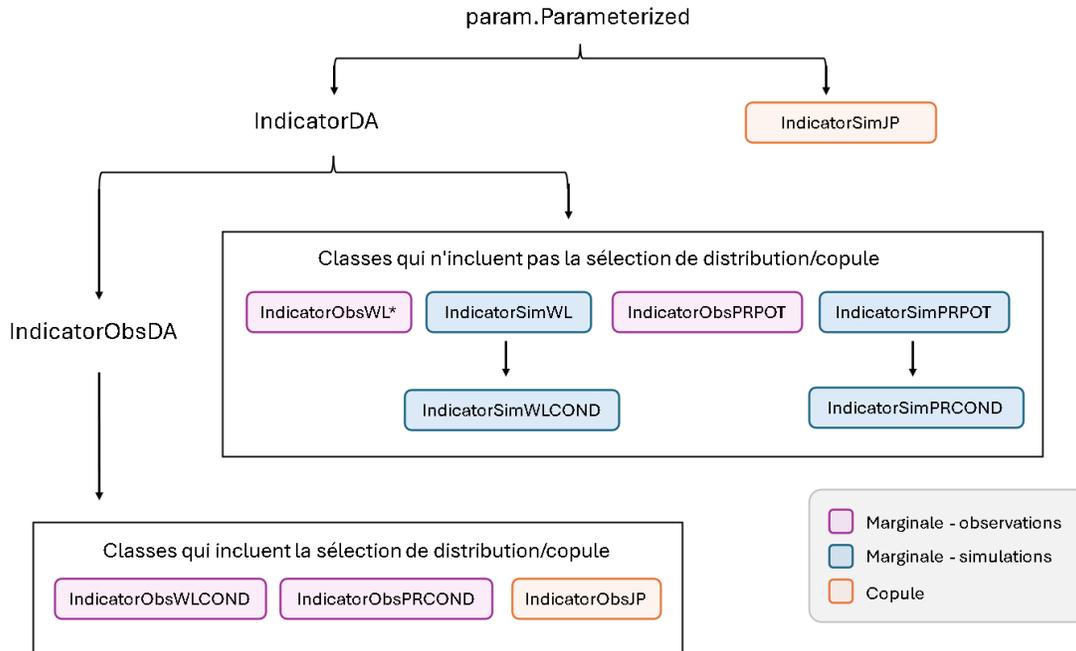


Figure 9 Classes python pour l'intégration des analyses côtières et conjointes dans *Portail Ingénieur*

4.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.3.1. Dépendance

Comme décrit dans la méthodologie, après des tests exploratoires, le seuil pour la méthode de POT a été ajusté afin d'améliorer la dépendance observée. En utilisant le seuil défini dans la Section 3 du rapport (environ 1,1 à 1,5 événements par an selon la station), le nombre de stations présentant des valeurs significatives de tau de Kendall était de 2 pour *pr_wlcond* et 2 pour *wl_prcond*. Ce nombre est passé respectivement à 10 et 16 lorsqu'un seuil au 95^e percentile a été appliqué.

Il est notable que 16 stations ont montré une dépendance pour *wl_prcond*, contre 10 pour *pr_wlcond*. Cela suggère que la dépendance est plus souvent observée pour des précipitations élevées survenant dans la journée précédant ou suivant un niveau d'eau POT que pour des niveaux d'eau élevés précédant ou suivant un épisode de précipitation POT extrême.

Un seuil de signification de 0,05 a été utilisé pour évaluer le tau de Kendall, bien que certaines études, comme Ward et al. (2018), aient adopté un seuil de 0,1. Il est également important de souligner que le tau de Kendall ne capture pas pleinement les subtilités des dépendances, en particulier dans les queues des distributions. Par conséquent, l'absence de dépendance significative n'exclut pas nécessairement une relation significative entre les variables (Jalili Pirani et Najafi, 2023).

La Figure 10 présente une carte du tau de Kendall à travers le Canada. La dépendance est en moyenne positive. D'autres études ayant analysé la dépendance entre les précipitations intenses et les niveaux d'eau côtiers élevés ont également mis trouvé une dépendance faible mais positive (Zheng et al. 2014, Tu et al. 2017, Jalili Pirani et Najafi 2023). Par exemple, Zheng et al. (2014) ont identifié une faible mais significative dépendance statistique entre les précipitations extrêmes et les surcotes extrêmes à 42 des 49 marégraphes le long des côtes australiennes, soulignant que même une faible dépendance peut avoir des implications significatives pour les estimations du risque d'inondation.

Les résultats de tau de Kendall de Jalili Pirani et Najafi (2023) sont inclus pour comparaison dans la Figure 10. Ces auteurs ont constaté que les dépendances *pr_wlcond* étaient principalement positives,

variant de -0,2 à plus de 0,3, avec 31 stations sur 41 présentant une dépendance significative. Leurs résultats sont généralement en accord avec les conclusions de cette étude, bien que certaines différences sont attendues en raison de différences méthodologiques tel que le traitement des tendances, la sélection des événements et les périodes temporelles analysées.

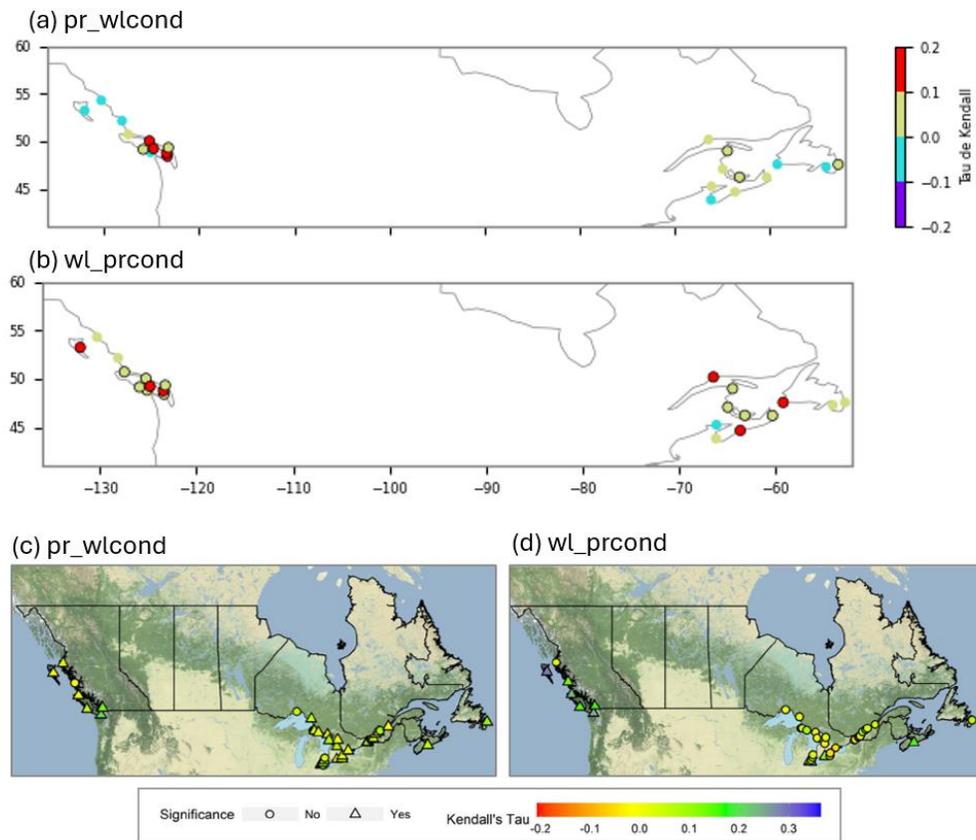


Figure 10 Carte du tau de Kendall. Les cadres (a) et (b) montrent les résultats de cette étude, et les cadres (c) et (d) montrent ceux de Jalili Pirani et Najafi (2023).

4.3.2. Choix des copules

En regroupant les résultats pour *pr_wlcond* et *wl_prcond*, les copules les plus fréquemment sélectionnées sur la base du CIB étaient la Gumbel (15), suivie de la Gaussienne (11), de la Frank (10) et de la Clayton (8). Aucune copule de Student n'a été retenue, probablement en raison de sa structure à deux paramètres, ce qui augmente la valeur du CIB. Le CIB n'est pas une mesure adaptée pour la copule indépendante dans ce contexte, car cette dernière n'a pas de paramètres. Sa vraisemblance correspond au produit des vraisemblances marginales, qui est toujours égale à 1 pour des marginales uniformes. Cependant, la copule indépendante pourrait être sélectionnée dans certaines stations lors de travaux futurs si des tests d'adéquation sont implémentés, notamment dans les cas où tous les autres modèles de copules sont rejetés.

Bien que cette étude partage des stations avec Jalili Pirani et Najafi (2023), ils ont utilisé un plus grand éventail de copules, ce qui complique les comparaisons des résultats avec cette étude. Parmi les sélections de copules de 18 résultats (*pr_wlcond* et *wl_prcond* pour 9 stations en commun entre les deux études), on observe trois correspondances exactes, sept cas où les copules sélectionnées sont étroitement liées (par exemple, une Tawn Type 1 et une Frank), cinq cas où la copule gaussienne est choisie dans une des deux études, et trois cas où les copules sélectionnées sont contradictoires (par exemple, une Clayton inversée et une Frank).

Il n'existe pas de consensus dans la littérature sur un type de copule qui serait systématiquement plus approprié que les autres pour modéliser les distributions conjointes des précipitations et des niveaux d'eau côtiers. Cela s'explique par les différences de structures de dépendance selon les sites (par exemple, certains sites présentent une dépendance uniquement pour les événements les plus extrêmes, tandis que d'autres montrent une dépendance plus marquée pour des événements moins extrêmes).

Dans cette étude, des figures ont également été utilisées pour valider le choix des copules (voir l'exemple en Figure 11). Dans les quatre cas où l'inspection visuelle des diagrammes de Kendall a suggéré une dépendance visuelle plus marquée, la copule choisie par CIB a été la Gumbel. Cependant, il y a d'autres cas où la Gumbel était le meilleur modèle selon le CIB, alors que l'interprétation visuelle était peu concluante. Si les diagrammes de Kendall ont offert une certaine utilité, les nuages de points se sont révélés plus difficiles à interpréter visuellement. Ce constat est cohérent avec les observations d'autres auteurs, qui ont rapporté des informations limitées à tirer de ces graphiques (Tootoonchi et al., 2022).

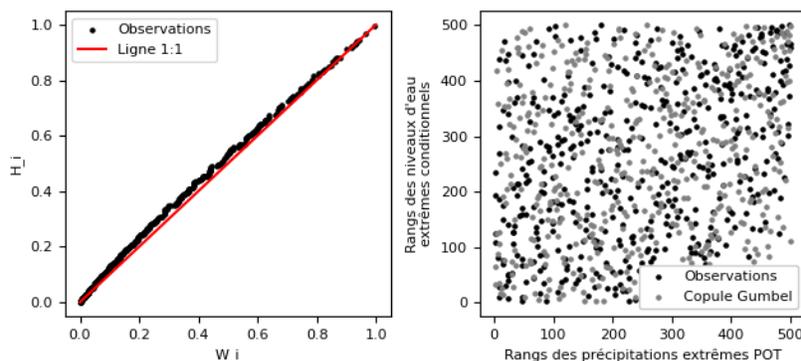


Figure 11 Diagrammes démontrant la structure de dépendance des données. Exemple pour la station 7330 Fulford Harbour et l'indice pr_wlcond (tau de Kendall significatif de 0.19). (a) diagramme de Kendall (voir explications dans Genest et Favre 2007) (b) nuage de points de pseudo-observations et de la copule.

4.3.3. Probabilités conjointes

Les résultats pour un événement conjoint de précipitation et de niveaux d'eau ayant chacun une période de retour de 1 sur 50 ans (denoté « 1:50 ») sont présentés dans la Figure 12. Le cadre (a) montre les probabilités, le cadre (b) affiche les périodes de retour, et le cadre (c) présente un facteur de multiplication, calculé comme le rapport entre la probabilité obtenue via l'analyse conjointe et celle estimée sous l'hypothèse d'indépendance. Cette hypothèse suppose que la probabilité conjointe est le produit des probabilités marginales ($0,02 \times 0,02 = 0,0004$, correspondant à une période de retour de 1 sur 2500 ans), représentée par la ligne pointillée. Ces mêmes résultats sont cartographiés dans la Figure 13.

Les résultats indiquent que, selon les copules ajustées, la probabilité conjointe de ces événements est systématiquement plus élevée que celle prévue par l'hypothèse d'indépendance, et ce, pour toutes les stations. Plus précisément, 13 stations montrent un facteur de multiplication de 5 ou plus, dont 4 stations entre 15 et 25 et une au-dessus de 25. Ces résultats supposent que les copules ajustées représentent fidèlement les ensembles de données. Il est également précisé que les résultats sont moyennés entre les analyses conditionnelles pr_wlcond et wl_prcond . Ainsi, aucune diminution des probabilités conjointes n'a été observée, bien que certaines dépendances (tau de Kendall) négatives aient été identifiées pour pr_wlcond et wl_prcond séparément.

En ce qui concerne l'ampleur des augmentations des probabilités conjointes, les résultats sont conformes aux attentes pour les régions ces latitudes influencées par des cyclones tropicaux et extratropicaux (Bevacqua et al. 2020a, Jalili Pirani et Najafi 2023, Naseri et Hummel 2022). Par exemple, Bevacqua et al. (2020a) ont rapporté que dans la plupart des régions côtières du monde, les événements extrêmes sont environ 20 fois

plus susceptibles de se produire conjointement que sous l'hypothèse d'indépendance. De même, Zheng et al. (2014) ont constaté qu'en Australie, la probabilité d'une surcote extrême pendant une précipitation extrême peut être jusqu'à 35 fois plus élevée que prévu par l'indépendance. D'autres études rapportent également des augmentations significatives des probabilités conjointes (par exemple, Wahl et al. 2015, pour les côtes des États-Unis; Lai et al. 2021, au niveau mondial).

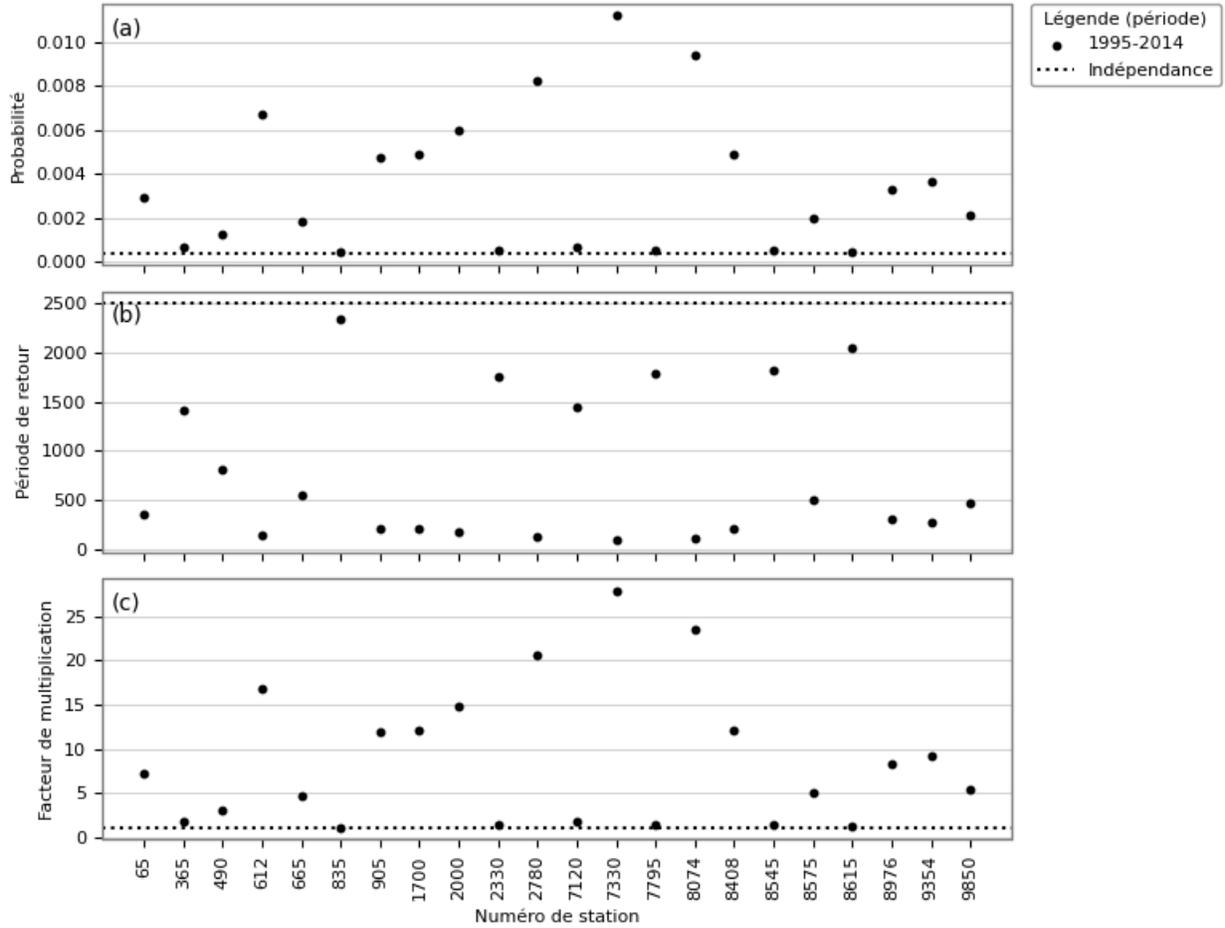


Figure 12 Résultats des extrêmes conjoints historiques. Évènement 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations.

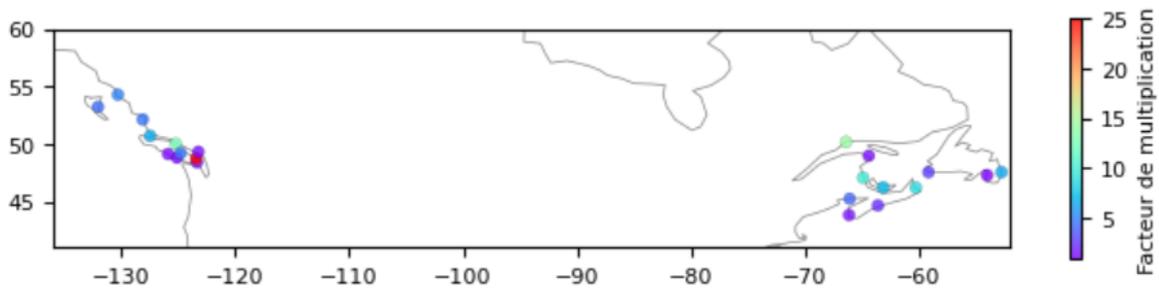


Figure 13 Carte des extrêmes conjoints historiques. Évènement 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations.

L'intégration des changements climatiques, y compris les projections de l'élévation du niveau de la mer et l'intensification des événements extrêmes de précipitation, augmente la probabilité des événements conjoints. Les résultats pour les périodes 2020–2050 et 2070–2100 sont présentés dans la Figure 14. D'ici 2070–2100, un événement conjoint de précipitation 1:50 et de niveau d'eau 1:50 pourrait atteindre une probabilité annuelle supérieure à 0,1 dans 10 stations. Ces projections sont basées sur l'hypothèse que les copules ajustées représentent non seulement les conditions actuelles, mais aussi les conditions futures.

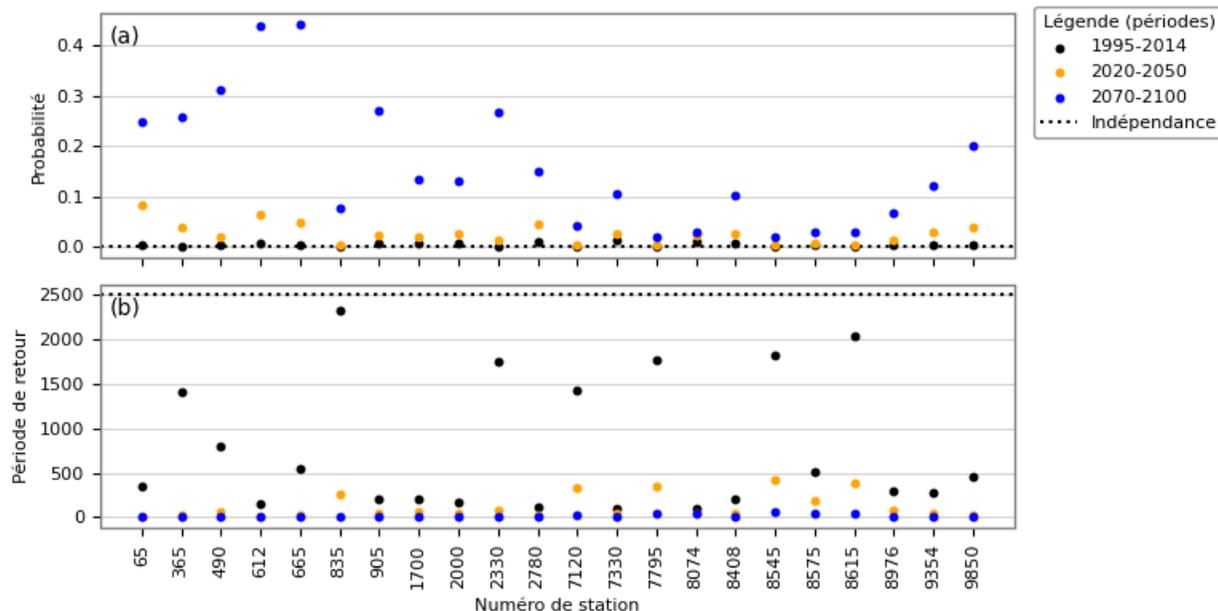


Figure 14 Résultat des extrêmes conjoints historiques et futurs. Évènement 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations.

4.3.4. Sensitivité aux choix de la copule

Les résultats de la Section 4.3.3 reposent sur l'hypothèse que les copules choisies, sélectionnées sur la base du plus faible CIB, représentent fidèlement les ensembles de données. Cette hypothèse mérite d'être examinée. La sélection de copules en fonction du CIB ou du critère d'information d'Akaike (CIA) est l'approche la plus courante dans la littérature (par exemple, Sadegh et al. 2017, Bevacqua et al. 2020a). De plus, les études combinant le test S_n avec le CIB/CIA finissent souvent par se baser sur le CIB/CIA, car le test S_n échoue rarement pour la plupart des copules (Jalili Pirani et Najafi 2023, Lucey et Gallien 2022, Tootoonchi et al. 2022). Par exemple, Jalili Pirani et Najafi (2023) ont constaté que le test S_n échouait dans seulement 20% des cas pour les stations canadiennes analysées.

Dans cette étude, les différences de CIB entre copules pour chaque station se sont avérées relativement faibles (inférieures à 0,05). Cela suggère qu'il n'existe pas de preuves solides pour privilégier une copule particulière. Des résultats similaires ont été rapportés dans d'autres études, où de faibles différences de CIB ou d'AIC ont soulevé des doutes quant à leur fiabilité en tant que critères décisifs (par exemple, Tu et al. 2017, Bizhanimanzar et al. 2024).

Étant donné les faibles différences de CIB, une analyse de sensibilité a été menée pour évaluer l'impact du choix de la copule sur les résultats. Peu d'études explorent explicitement cette question, notamment celles de Lucey et Gallien (2022) et Dubois et al. (2023). Les résultats de cette analyse, présentés dans les Figure 15 (1995–2014) et Figure 16 (2070–2100), révèlent une forte sensibilité au choix de la copule. Par exemple, pour une station donnée, l'utilisation d'une copule de Gumbel peut produire un facteur de multiplication plusieurs fois supérieur à celui obtenu avec une autre copule. Cela souligne l'influence considérable du choix de la copule et de l'ajustement de la copule sur les estimations des probabilités d'événements conjoints.

La Figure 16 montre que l'importance relative du choix de la copule diminue dans les scénarios de changements climatiques. Plus les changements climatiques sont marqués, plus les différences entre les projections climatiques des stations dominent les résultats, éclipsant ainsi l'impact du choix de la copule.

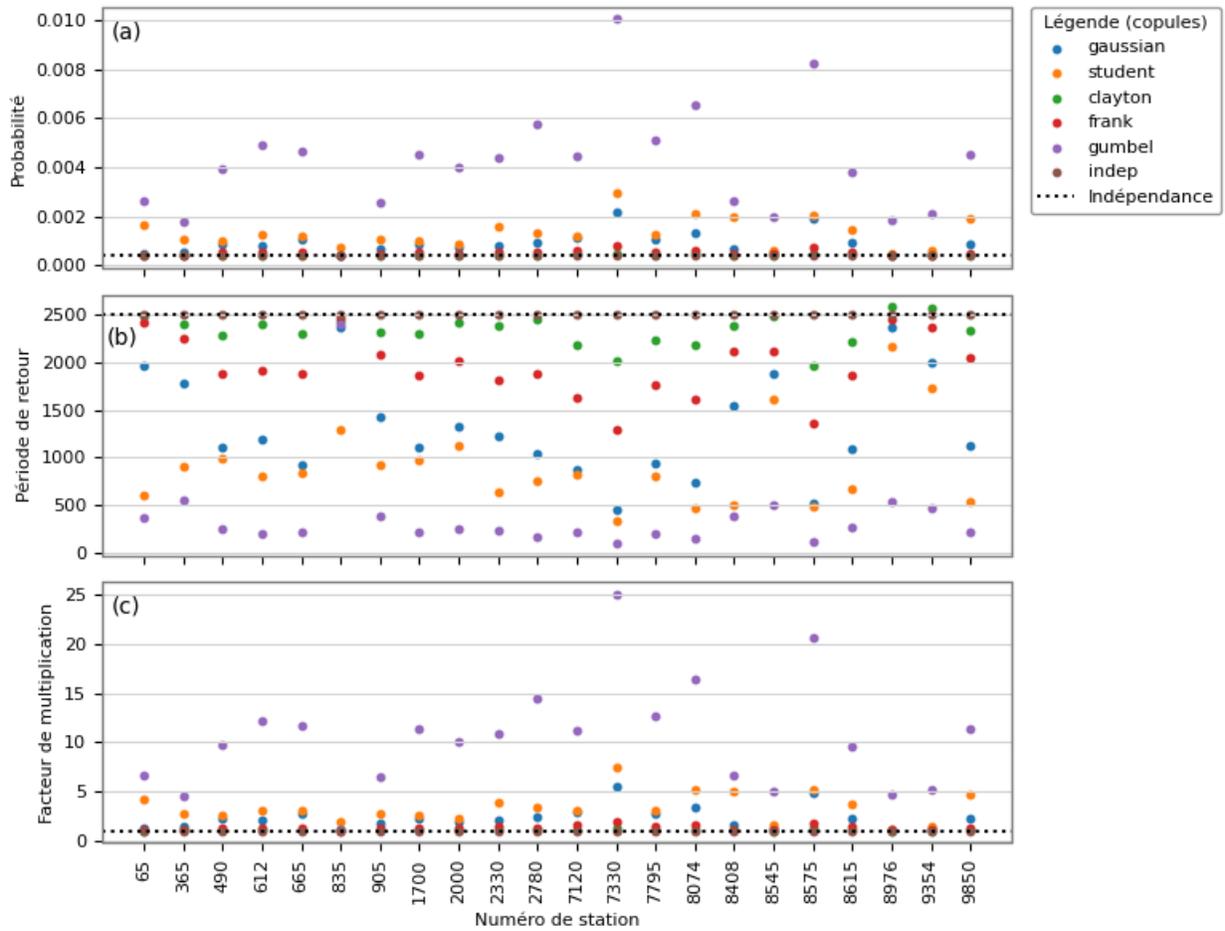


Figure 15 Test de sensibilité des copules sur les analyses d'extrêmes conjoints historiques. Évènement avec 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations.

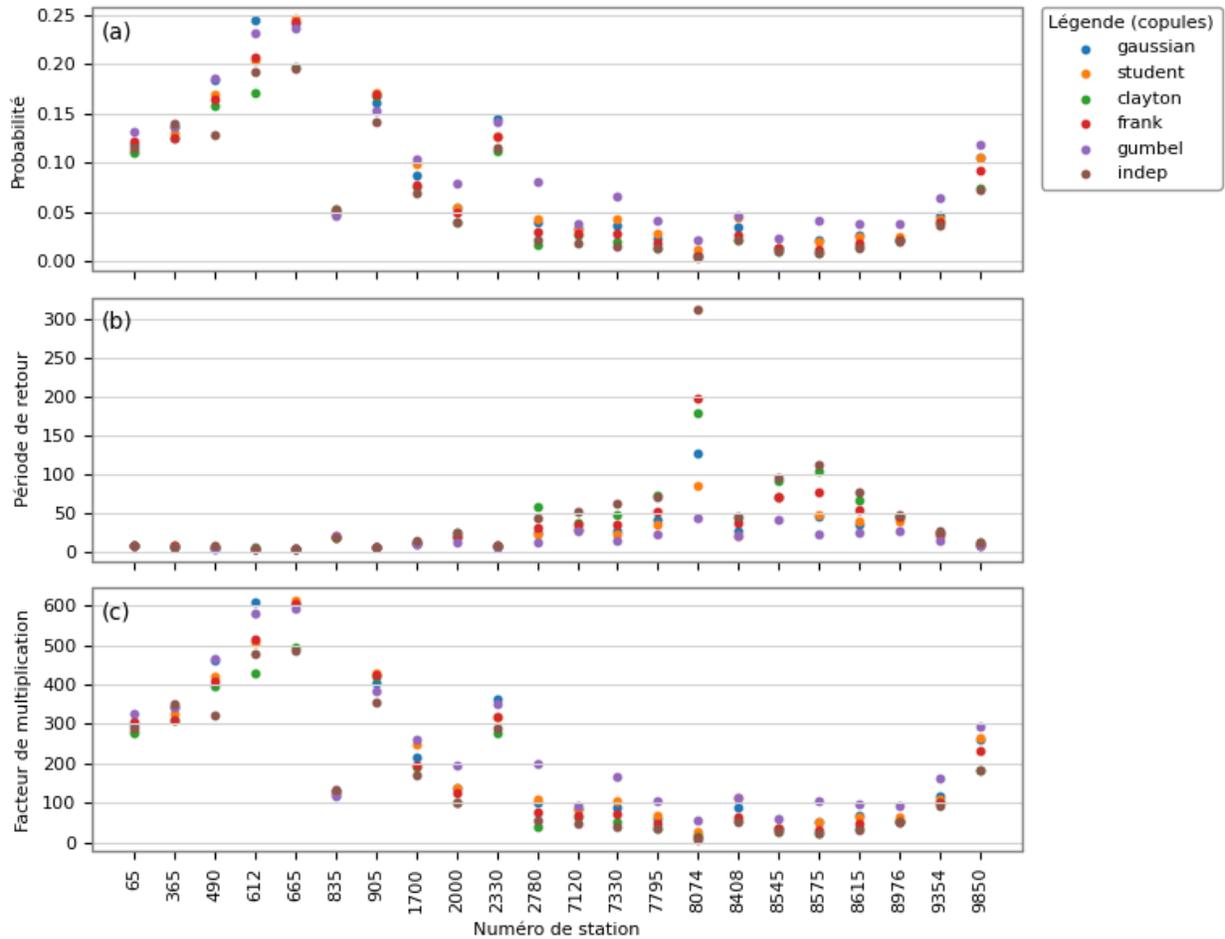


Figure 16 Test de sensibilité des copules sur les analyses d'extrêmes conjoints historiques et futurs. Évènement avec 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations.

4.3.5. Investigation des paramètres de Gumbel

Une analyse additionnelle des ajustements de la copule de Gumbel a révélé que de petites variations du paramètre ajusté de Gumbel entre différentes stations ont un impact significatif sur les probabilités conjointes obtenues (non illustré). Selon la valeur de ce paramètre, les facteurs de multiplication pour les copules de Gumbel varient de 1 à plus de 20. Autrement dit, les copules de Gumbel produisent des facteurs de multiplication élevés uniquement lorsque le paramètre de Gumbel est élevé.

Pour évaluer la fiabilité du paramètre de Gumbel, celui-ci a été comparé à des valeurs théoriques dérivées du tau de Kendall, conformément à Genest et Favre (2007). Au lieu d'être estimé par MLE, le paramètre a été calculé directement à l'aide de la relation théorique. Une comparaison entre les valeurs de tau dérivées par MLE et celles obtenues par la relation théorique a montré une forte corrélation (non illustré), ce qui est attendu, car la relation théorique sert de point de départ pour l'estimation MLE dans la procédure d'ajustement du package *copulae*.

Étant donné la forte influence du paramètre de Gumbel sur le facteur de multiplication et son lien direct avec tau de Kendall, il n'est pas surprenant qu'une relation claire ait été identifiée entre tau de Kendall et le facteur de multiplication (Figure 17). Cela indique que les stations présentant une dépendance plus élevée, mesurée par tau de Kendall, affichent également des paramètres de Gumbel plus forts et des impacts plus marqués sur les probabilités conjointes.

Bien que cette relation ne soit pas parfaite, elle renforce la confiance dans les résultats. Elle suggère que la variabilité des facteurs de multiplication entre stations est intrinsèquement liée à la structure de dépendance des données de chaque station. Cela confirme que la dépendance est un facteur clé déterminant les impacts sur les probabilités conjointes.

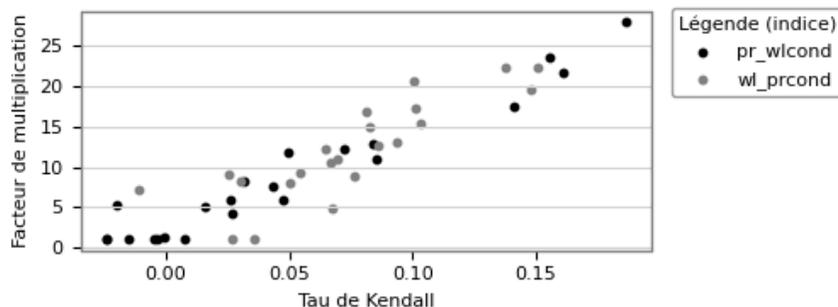


Figure 17 Relation entre le tau de Kendall et le facteur de multiplication des extrêmes conjoints pour la copule de Gumbel.

4.4. RECOMMANDATIONS

Les résultats démontrent que la dépendance (moyenne entre *pr_wlcond* et *wl_prcond*) est positive dans l'ensemble des stations, avec des facteurs de multiplication des probabilités conjointes en accord avec les conclusions d'autres études. Cependant, le processus actuel de sélection des copules repose sur la minimisation du CIB, malgré des différences souvent faibles entre les copules. De plus, les copules sélectionnées et leurs paramètres varient considérablement d'une station à l'autre, ce qui engendre des variations importantes dans les résultats—un constat également observé dans d'autres travaux (e.g., Lucey et Gallien 2022). Une approche plus robuste pour la sélection des copules, ainsi qu'une meilleure compréhension de leur influence sur les résultats, renforcerait la confiance dans les conclusions.

Pour répondre à ces enjeux, nous proposons trois recommandations principales. Premièrement, intégrer des métriques d'adéquation pour solidifier le processus de sélection des copules. Deuxièmement, adopter une approche d'analyse spécifique à chaque station et examiner l'influence des conditions locales de surcote. Enfin, introduire une quantification des incertitudes et communiquer explicitement l'impact du choix de la copule aux utilisateurs.

La mise en œuvre de ces recommandations dépasserait les pratiques standards de la plupart des études scientifiques, où la sélection des copules repose principalement sur le critère Sn/CIB/CIA. Toutefois, étant donné le public cible du *Portail Ingénieurs*—des utilisateurs sans expertise technique approfondie—il est essentiel de garantir des résultats à la fois fiables et clairs pour une utilisation pratique dans les évaluations de risques. Cet approfondissement de la rigueur scientifique soutiendra des applications plus confiantes des résultats dans les efforts d'adaptation aux changements climatiques.

4.4.1. Qualité de l'ajustement et autres métriques

La première recommandation est de mettre en œuvre le test d'ajustement Sn de Genest et al. (2009). Cela n'a pas été réalisé dans le projet actuel en raison de défis techniques liés au package *copulae*, qui nécessitent des ajustements. De plus, Genest et Favre (2007) suggèrent que, pour ce test, un échantillon important devrait être tiré de la copule, plutôt qu'un échantillon de la même taille que les données. Selon eux, cette approche évite l'effet arbitraire introduit par la variabilité de l'échantillonnage. Lors de l'implémentation du test Sn, le package *copulae* pourrait être aussi être modifié pour adopter cette recommandation.

Comme discuté dans la Section 4.3.2, le test Sn, même lorsqu'il est mis en œuvre, ne constitue souvent pas un facteur décisif, car il a tendance à rejeter peu de copules (Tootoonchi et al. 2022, et Jalili Pirani et Najafi 2023). Par conséquent, il est recommandé de compléter Sn avec des métriques supplémentaires pour mieux

évaluer le choix de la copule. En particulier, l'utilisation de tests de symétrie radiale est recommandée pour évaluer si une copule symétrique est plus appropriée qu'une copule asymétrique (par exemple, Gaussienne, Student t, ou Frank plutôt que Gumbel, Clayton; Genest et al. 2012). De plus, des estimations non paramétriques de la dépendance dans les queues sont conseillées (Schmidt et Stadtmüller, 2006).

Étant donné la variabilité naturelle associée aux données observées, l'interprétation de ces métriques risque de ne pas être simple et nécessitera probablement des expérimentations, comme l'ajustement des seuils pour les estimations non-paramétriques de la dépendance dans les queues. Cependant, ces métriques, en complément des outils déjà implémentés comme le CIB et les graphiques de Kendall, offre une base plus robuste pour la sélection des copules et l'interprétation des résultats de l'analyse conjointe.

4.4.2. Analyse par station

Une évaluation spécifique à chaque station n'était pas incluse dans le cadre de l'étude initiale, mais elle est suggérée pour mieux comprendre les variations spatiales dans la sélection des copules et des probabilités conjointes. Les étapes suivantes sont proposées :

- **Affinement des paires de stations** : L'étude actuelle a apparié les stations en sélectionnant la station la plus proche dans un rayon de 0.5 degrés. Cependant, des travaux futurs pourraient comparer plusieurs stations dans cette zone ou étendre le rayon de recherche, car des études comme celle de Zheng et al. (2014) ont observé des dépendances sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres. L'objectif est d'explorer si c'est possible d'augmenter la durée des données conjointes, réduisant ainsi l'incertitude, qui est fortement sensible à la longueur des séries conjointes (Naseri et Hummel, 2022).
- **Sélection des événements spécifique à chaque station** : Cette étude a utilisé le 95e percentile pour sélectionner les événements, car il offrait une dépendance plus forte pour plus de stations. Cependant, ce seuil a quelque peu détérioré la qualité de l'ajustement de la GPD pour certaines stations, par exemple, les sites avec des amplitudes de marée plus élevées, probablement parce que le seuil du 95e percentile incluait plusieurs populations d'événements extrêmes. Il est probable que différents ensembles d'extrêmes à une station donnée soient liés à des processus distincts. Par exemple, Van der Hurk et al. (2015) ont constaté que la corrélation entre la surcote de tempête et les fortes précipitations aux Pays Bas augmente avec le niveau d'eau intérieur jusqu'à un certain seuil, mais diminue à des niveaux plus élevés où les caractéristiques des marées dominent. Par conséquent, réévaluer les seuils station par station—en évaluant simultanément la dépendance (tau de Kendall), les ajustements marginaux (test KS) et les ajustements de copules pour différents seuils—pourrait améliorer la robustesse des résultats.
- **Évaluation du potentiel de surcote** : Nous recommandons : (1) d'évaluer la sensibilité des sites aux surcotes de tempête en fonction de l'amplitude des marées et de leur variabilité, et (2) d'évaluer la sensibilité des sites en fonction de la bathymétrie et de la forme de la côte. Bien qu'une analyse complexe, comme le typage synoptique, ne soit pas envisagée, une évaluation générale de ces facteurs pourrait classer les sites selon leur exposition aux surcotes. La comparaison des caractéristiques des sites avec les résultats spécifiques aux stations aiderait à interpréter plus efficacement les variations spatiales.

En intégrant ces étapes, l'étude pourrait mieux considérer les facteurs influençant les variations spatiales de probabilités conjointes entre les stations.

4.4.3. Caractérisation et communication des incertitudes

Suite à l'ajout des tests d'ajustement et d'autres métriques, ainsi que de l'analyse spécifique à chaque station, il est envisageable que, pour certaines stations, deux ou plusieurs modèles de copules soient tous plausibles pour représenter les données et leur dépendance. Par conséquent, une partie de la solution pour renforcer la robustesse réside dans la manière de communiquer les résultats, et pas uniquement dans le choix des copules. Nous recommandons deux axes d'amélioration : (1) la prise en compte de l'incertitude des paramètres et (2) la prise en compte de l'incertitude dans le choix de la copule.

La première partie de l'étude (Section 3) a inclus une procédure de bootstrap pour estimer l'incertitude des paramètres de la GPD. Nous recommandons d'étendre cette analyse d'incertitude à l'évaluation des copules en mettant en œuvre une procédure de bootstrap pour leur ajustement. Cela semble particulièrement important au vu de la sensibilité des résultats au paramètre de la copule de Gumbel (Section 4.3.5).

Dans la littérature, peu d'études examinent l'impact du choix de la copule sur les résultats, bien que ce choix soit souvent incertain. Nous suggérons de reconsidérer cette approche et d'intégrer explicitement l'incertitude structurelle en explorant plusieurs copules, comme le proposent Lucien et Gallien (2022). Plus précisément, si une copule n'est pas rejetée par le test S_n ou d'autres critères, les résultats pourraient inclure le scénario le plus défavorable (par exemple, Gumbel), en complément des autres copules retenues. Une autre approche consisterait à présenter les résultats pour toutes les copules envisagées. Nous recommandons d'explorer ces options en tenant compte des besoins des utilisateurs finaux, afin de garantir des résultats aussi pertinents que possible pour le public cible.

Bien que d'autres indices dans le cadre du *Portail Ingénieurs* privilégient la communication d'une valeur unique, l'impact significatif du choix de la copule sur les probabilités conjointes justifie ici une exception. Fournir des mesures d'incertitude aidera les utilisateurs à mieux appréhender l'éventail des résultats possibles et à prendre des décisions plus éclairées pour l'adaptation aux changements climatiques.

4.4.4. Autres recommandations

Plusieurs autres approches ont été examinées pour renforcer la confiance dans les résultats de l'analyse conjointe. Ces approches visaient soit à atténuer les incertitudes associées au manque de données observées (#1 et #2 ci-dessous), soit à explorer les processus physiques différemment afin de mettre en évidence des patterns de dépendance plus clairs (#3, #4, #5). Par ailleurs, des modifications méthodologiques ont été envisagées pour renforcer la robustesse des résultats (#6 et #7), tandis que le typage synoptique a été proposé pour fournir plus de contexte permettant d'interpréter les différences observées entre les stations (#8).

Bien que certaines de ces approches soient prometteuses, elles ont été écartées à ce stade, car elles dépassent le cadre du projet actuel, ne s'alignent pas avec les objectifs du *Portail Ingénieurs*, ou introduisent des défis supplémentaires en termes d'interprétation ou de mise en œuvre. Les sections suivantes détaillent ces méthodes, leurs avantages potentiels et les raisons pour lesquelles elles n'ont pas été retenues dans l'immédiat :

1. **Agrégation spatiale** : Sweet et al. (2022) a proposé une méthode pour regrouper les marégraphes adjacents afin de réduire la variabilité naturelle et augmenter les données disponibles pour l'ajustement des modèles (dans leur cas, des modèles univariés). Cette méthode conserve seulement le niveau d'eau maximal dans une région. Cependant, à la connaissance des auteurs, une approche similaire n'a pas été appliquée aux analyses de probabilités conjointes. Adapter cette approche aux scénarios d'événements conjoints nécessiterait donc des efforts de recherche plus approfondi. Ceci pourrait constituer une piste de travail à envisager ultérieurement, après avoir mis en œuvre les recommandations des Sections 4.4.1 à 4.4.3.
2. **Analyse basée sur des modèles** : Des travaux comme ceux de Wu et al. (2018), Bevacqua et al. (2020a), et Couasnon et al. (2020) utilisent des données de réanalyse de surcotes pour aider à combler le manque de données observées. Bien que cette approche soit utile pour cartographier la dépendance à grande échelle, la représentativité locale des réanalyses de surcotes reste limitée.
3. **Analyse des surcotes résiduelles** : Cette méthode consiste à étudier les surcotes résiduelles (niveaux d'eau total moins les composantes de marée), comme dans les travaux de Jalili Pirani and Najafi (2022) et Wahl et al. (2015). L'avantage principal est une augmentation attendue du rapport signal-bruit dans certains cas, grâce à l'élimination du bruit des marées. Dans d'autres cas, les marées hautes facilitent la propagation des ondes de tempêtes. En général, l'interprétation des résultats dans le cadre d'une évaluation des risques devient plus complexe. Étant donné que l'objectif du *Portail Ingénieurs* est de fournir des résultats directement exploitables par des ingénieurs, et non de se focaliser sur l'étude des processus fondamentaux, cette recommandation n'a pas été priorisée.

4. **Données de précipitations horaires** : L'utilisation de données horaires pourrait révéler une dépendance plus forte entre les extrêmes horaires de précipitations et les niveaux d'eau horaires. Zheng et al. (2014) ont exploré cette question en Australie. Une analyse des niveaux d'eau horaires permettrait d'identifier les durées typiques des surcotes aux stations Canadiennes. Cette approche exigerait l'utilisation des stations de précipitations d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) qui ont des données horaires, plutôt que les données AHCCD. Bien que prometteuse, cette méthode est rarement utilisée dans la littérature, dépasse le cadre de cette analyse, et serait mieux envisagée dans une étude distincte.
5. **Évaluation de la saisonnalité** : Certaines études (par exemple, Lucey et Gallien 2022, Wang et al. 2023) ajustent les copules de manière saisonnière afin de réduire le bruit dans les cas où les événements conjoints se concentrent durant certaines périodes. Bien que cette approche puisse fournir des informations utiles sur les processus, sa mise en œuvre systématique est compliquée en raison de la rareté des données sur les événements extrêmes. Elle pourrait être envisagée ultérieurement, après avoir mis en œuvre les recommandations des Sections 4.4.1 à 4.4.3.
6. **Copule empirique** : Environ 10 % des études de probabilités conjointes en hydrologie utilisent des copules empiriques (d'après les 76 études revues par Tootoonchi et al. 2022). Cette méthode évite les hypothèses paramétriques, mais repose entièrement sur les données observées, ce qui la rend moins adaptée aux régions sans données ou aux queues extrêmes. Elle est plus appropriée pour des analyses préliminaires ou comme solution de repli en cas d'échec des modèles paramétriques.
7. **Analyse non stationnaire** : L'étude conduite a date repose sur l'hypothèse de stationnarité dans la fréquence des extrêmes. Cependant, Wahl et al. (2015) a montré que le tau de Kendall peut varier au fil du temps, ce qui peut entraîner une partie des différences entre les stations ayant des périodes de données différentes. Réduire la période de référence pour obtenir plus de concordance entre les stations introduit également des complications dans l'optimisation de l'utilisation des données. Quoi qu'il en soit, une analyse non-stationnaire ajouterait une complexité considérable et serait donc envisageable après avoir mis en œuvre les recommandations des Sections 4.4.1 à 4.4.3.
8. **Typage synoptique** : L'analyse des trajectoires historiques des tempêtes (tropicales et extratropicales) ou leur catégorisation selon leurs caractéristiques météorologiques et synoptiques (par exemple, Wu et al. 2018) pourrait fournir des informations sur les patterns spatiaux. Cependant, en raison de la variabilité naturelle et de la complexité d'interprétation des événements météorologiques, cette approche est laborieuse et requiert une expertise spécialisée. Elle pourrait être envisagée pour approfondir la recherche à une étape ultérieure.

5. Conclusion

Cette étude a évalué (1) les niveaux extrêmes côtiers et (2) les extrêmes conjoints des niveaux d'eau côtiers et des précipitations dans 22 stations des côtes Atlantique et Pacifique du Canada. Les probabilités des niveaux d'eau extrêmes obtenues sont cohérentes avec celles d'autres études, et sont fortement influencées par les projections de la montée du niveau de la mer. L'analyse conjointe a révélé une dépendance généralement positive entre les niveaux d'eau extrêmes et les précipitations, avec des facteurs de multiplication de probabilité conjointe correspondant aux résultats d'autres travaux. Plusieurs recommandations immédiates ont été proposées pour renforcer l'analyse de probabilité conjointe, ainsi que des pistes de recherche à explorer ultérieurement. L'objectif ultime est de fournir aux utilisateurs du *Portail Ingénieur* d'Ouranos des informations accessibles et fiables pour les évaluations des risques climatiques, afin de soutenir une adaptation climatique éclairée.

Références

- ARNS A., WAHL T., HAIGH I. D., JENSEN J., PATTIARATCHI C. (2013). Estimating extreme water level probabilities: A comparison of the direct methods and recommendations for best practice. *Coastal Engineering*, 81, 51–66.
- BECK N., GENEST C., JALBERT J., MAILHOT M. (2020). Predicting extreme surges from sparse data using a copula-based hierarchical Bayesian spatial model. *Environmetrics*, 31(5), e2616.
- BERNIER N. B., THOMPSON K. R. (2006). Predicting the frequency of storm surges and extreme sea levels in the northwest Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C10).
- BEVACQUA E., MARAUN D., VOUSDOUKAS M. I., VOUKOUVALAS E., VRAC M., MENTASCHI L., WIDMANN M. (2019). Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Science Advances*, 5(9), eaaw5531.
- BEVACQUA E., VOUSDOUKAS M. I., SHEPHERD T. G., VRAC M. (2020b). Brief communication: The role of using precipitation or river discharge data when assessing global coastal compound flooding. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(6), 1765–1782.
- BEVACQUA E., VOUSDOUKAS M. I., ZAPPA G., HODGES K., SHEPHERD T. G., MARAUN D., MENTASCHI L., FEYEN L. (2020a). More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 47. <https://www.nature.com/articles/s43247-020-00044-z.pdf>
- BIZHANIMANZAR M., RONDEAU-GENESSE G., CARON L. P., LEFAIVRE D., MAILHOT E. (2024). Joint occurrence of extreme water level and river flows in St. Lawrence River coasts under present and sea level rise conditions. *Earth's Future*, 12(8), e2023EF004027.
- BLOEMENDAAL N., MUIS S., HAARSMA R.J., VERLAAN M., IRAZOQUI APECECHEA M., DE MOEL H., WARD P.J., AERTS J.C.J.H. (2019). Global modeling of tropical cyclone storm surges using high-resolution forecasts. *Climate Dynamics*, 52, 5031. doi: 10.1007/s00382-018-4430-x
- BROMIRSKI P.D., FLICK R.E., MILLER A.J. (2017). Storm surge along the Pacific coast of North America. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(1), 441-457.
- BUSH E., LEMMEN D. S. (2019). Canada's changing climate report. Government of Canada= Gouvernement du Canada.
- CAIRES S. (2011). Extreme Value Analysis: Still Water Level. JCOMM Technical Report No. 58. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION (OF UNESCO), 33 p.
- CARUSO M. F., MARANI M. (2022). Extreme-coastal-water-level estimation and projection: A comparison of statistical methods. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(3), 1109–1128.
- COLES S., BAWA J., TRENNER L., DORAZIO P. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values (Vol. 208, p. 208). Springer.
- COUASNON A., EILANDER D., MUIS S., VELDKAMP T. I., HAIGH I. D., WAHL T., WARD P. J. (2020). Measuring compound flood potential from river discharge and storm surge extremes at the global scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 489–504.
- DAIGLE R.J. (2017). Sea-Level Rise and Flooding Estimates for New Brunswick Coastal Sections 2017. New Brunswick Department of Environment and Local Government, 81 pp.
- DUBOIS K., LARSEN M. A. D., DREWS M., NILSSON E., RUTGERSSON A. (2023). Influence of data source and copula statistics on estimates of compound extreme water levels in a river mouth environment. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2023, 1–28.

ENDA M., NAVEED K.M. (2017). Input to Canadian National Guideline for Flood Hazard Mapping: Coasts & Lakes. National Research Council – Ocean, Coastal and River Engineering (NRC – OCRE). Technical Report - UNCLASSIFIED OCRE-TR-2017-005.

FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). (2016). Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping: Coastal Flood Frequency and Extreme Value Analysis. Guidance Document 76, 22 p.

GENEST C., FAVRE A.-C. (2007). Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(4): 347–368:4.

GENEST C., NEŠLEHOVÁ J., QUESSY J.-F. (2012). Tests of symmetry for bivariate copulas. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 64: 811–834.

GENEST C., QUESSY J. F., RÉMILLARD B. (2006). Goodness-of-fit procedures for copula models based on the probability integral transformation. *Scandinavian Journal of Statistics* 33(2): 337–366.

HAIGH I.D., WADEY M.P., WAHL T., OZSOY O., NICHOLLS R.J., BROWN J.M., HORSBURGH K., GOULDBY B. (2016). Spatial and temporal analysis of extreme sea-level and storm surge events around the coastline of the UK. *Scientific Data*, 3, 160107. doi: 10.1038/sdata.2016.107

HAN G., LU J. (2023). Extreme sea levels and their attribution for the Canadian Pacific Coast from a baroclinic regional ocean model and tide-gauge data. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 128(7): e2022JC019482.

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. *Earth's Future*, 10, e2022EF002715.

JALILI PIRANI F., NAJAFI M.R. (2023). Characterizing compound flooding potential and the corresponding driving mechanisms across coastal environments. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(5), 1943-1961. doi: 10.1007/s00477-022-02374-0

JALILI PIRANI, F., & NAJAFI, M. R. (2020). Recent trends in individual and multivariate compound flood drivers in Canada's coasts. *Water Resources Research*, 56(8), e2020WR027785.

KOPP, R. E., et al. (2023). The Framework for Assessing Changes To Sea-level (FACTS) v1.0: a platform for characterizing parametric and structural uncertainty in future global, relative, and extreme sea-level change. *Geoscientific Model Development*, 16(24), 7461-7489.

LAI Y., LI Q., LI J., ZHOU Q., ZHANG X., WU G. (2021). Evolution of frequency and intensity of concurrent heavy precipitation and storm surge at the global scale: Implications for compound floods. *Frontiers in Earth Science* 9: 660359.

LUCEY J. T., GALLIEN T. W. (2022). Characterizing multivariate coastal flooding events in a semi-arid region: the implications of copula choice, sampling, and infrastructure. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22(6): 2145–2167.

NADAL-CARABALLO N.C., MELBY J.A. (2014). North Atlantic Coast Comprehensive Study Phase I: Statistical Analysis of Historical Extreme Water Levels with Sea Level Change. Engineer Research and Development Center, ERDC/CHL TR-14-7.

NASERI, K., & HUMMEL, M. A. (2022). A Bayesian copula-based nonstationary framework for compound flood risk assessment along US coastlines. *Journal of Hydrology*, 610, 128005.

SADEGH M., RAGNO E., AGHAKOUCHAK A. (2017). Multivariate copula analysis toolbox (MvCAT): describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework. *Water Resources Research* 53(6): 5166–5183.

SALVADORI G., DE MICHELE C. (2004). Frequency analysis via copulas: theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water Resources Research* 40(12): W12511.

- SALVADORI G., DURANTE F., DE MICHELE C., BERNARDI M., PETRELLA L. (2016). A multivariate copula-based framework for dealing with hazard scenarios and failure probabilities. *Water Resources Research* 52(5): 3701–3721.
- SCHMIDT R., STADMÜLLER U. (2006). Nonparametric estimation of tail dependence. *Scandinavian Journal of Statistics*, 33, 307-335.
- SVENSSON, C., & JONES, D. A. (2004). Dependence between sea surge, river flow and precipitation in south and west Britain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(5), 973-992.
- SWEET W.V., HAMINGTON B.D., KOPP R.E., WEAVER C.P., BARNARD P.L., BEKAERT D., BROOKS W., CRAGHAN M., DUSEK G., FREDERIKSE T., GARNER G., GENZ A.S., KRASTING J.P., LAROUE E., MARCY D., MARRA J.J., OBEYSEKERA J., OSLER M., PENDLETON M., ROMAN D., SCHMIED L., VEATCH W., WHITE K.D., ZUZAK C. (2022). Global and Regional Sea Level Rise Scenarios for the United States: Updated Mean Projections and Extreme Water Level Probabilities Along U.S. Coastlines. NOAA Technical Report NOS 01. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Silver Spring, MD, 111 pp.
- TOOTOONCHI F., SADEGH M., HAERTER J. O., RÄTY O., GRABS T., TEUTSCHBEIN C. (2022). Copulas for hydroclimatic analysis: A practice-oriented overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 9(2): e1579.
- TU, X., DU, Y., SINGH, V. P., & CHEN, X. (2018). Joint distribution of design precipitation and tide and impact of sampling in a coastal area. *International Journal of Climatology*, 38, e290-e302.
- VAN DEN HURK, B., VAN MEIJGAARD, E., DE VALK, P., VAN HEERINGEN, K. J., & GOOIJER, J. (2015). Analysis of a compounding surge and precipitation event in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 10(3), 035001.
- WAHL, T., JAIN, S., BENDER, J., MEYERS, S. D., & LUTHER, M. E. (2015). Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. *Nat. Clim. Change*, 5, 1093–1097.
- WANG, H., XUAN, Y., TRAN, T. V. T., COUASNON, A., SCUSSOLINI, P., LUU, L. N., ... & REEVE, D. E. (2023). Changes in seasonal compound floods in Vietnam revealed by a time-varying dependence structure of extreme rainfall and high surge. *Coastal Engineering*, 183, 104330.
- WARD P. J., COUASNON A., EILANDER D., HAIGH I. D., HENDRY A., MUIS S., ... & WAHL T. (2018). Dependence between high sea-level and high river discharge increases flood hazard in global deltas and estuaries. *Environmental Research Letters* 13(8): 084012.
- WATSON, P. J. (2022). Determining extreme still water levels for design and planning purposes incorporating sea level rise: Sydney, Australia. *Atmosphere*, 13(1), 95.
- WATSON, P. J. (2022). Extreme Value Analysis of Ocean Still Water Levels along the USA East Coast—Case Study (Key West, Florida). *Coasts*, 3(4), 294-312.
- WU, W., MCINNES, K., O'GRADY, J., HOEKE, R., LEONARD, M., & WESTRA, S. (2018). Mapping dependence between extreme rainfall and storm surge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(4), 2461-2474.
- YILMAZ, A., KARA, M., & ÖZDEMİR, O. (2021). Comparison of different estimation methods for extreme value distribution. *Journal of Applied Statistics*, 48(13-15), 2259-2284.
- ZHAI L., GREENAN B. J. W., HUNTER J., JAMES T. S., HAN G., MACAULAY P., HENTON J. A. (2015). Estimating sea-level allowances for Atlantic Canada using the Fifth Assessment Report of the IPCC. *Atmosphere-Ocean*, 53(5), 476–490.
- ZHENG, F., WESTRA, S., LEONARD, M., & SISSON, S. A. (2014). Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk. *Water Resources Research*, 50(3), 2050-2071.

Liste des figures

Figure 1 Disponibilité des données aux stations de niveaux d'eau (rouge) et de précipitations (bleu) ainsi que leur chevauchement (violet). Les paires de stations sont indiquées avec le numéro de station de niveaux d'eau. 8

Figure 2 Carte des 22 paires de stations sélectionnées pour l'analyse. 8

Figure 3 Étapes méthodologiques de l'analyse d'extrêmes de niveaux d'eau côtiers. 11

Figure 4 Exemple de l'ajustement pour la station 1700 Charlottetown, montrant des échantillons bootstrap (lignes claires), le 50^e percentile (cercle), et les 10^e et 90^e percentiles (ligne verticale). 11

Figure 5 Carte du paramètre de forme de la GPD avec ajustement PWM. 12

Figure 6 Résultats des extrêmes de niveaux d'eau historiques et futurs. 13

Figure 7 Étapes méthodologiques de l'analyse des extrêmes conjoints de niveaux d'eau et de précipitations. 17

Figure 8 Processus pour obtenir le delta des précipitations conditionnels. Les cadres (a) à (d) sont pour une seule réalisation CMIP6. Le cadre (e) démontre les deltas à travers toutes les réalisations, pour une station (490, Halifax). 18

Figure 9 Classes python pour l'intégration des analyses côtières et conjointes dans *Portail Ingénieur* 19

Figure 10 Carte du tau de Kendall. Les cadres (a) et (b) montrent les résultats de cette étude, et les cadres (c) et (d) montrent ceux de Jalili Pirani et Najafi (2023). 20

Figure 11 Diagrammes démontrant la structure de dépendance des données. Exemple pour la station 7330 Fulford Harbour et l'indice pr_wcond (tau de Kendall significatif de 0.19). (a) diagramme de Kendall (voir explications dans Genest et Favre 2007) (b) nuage de points de pseudo-observations et de la copule. 21

Figure 12 Résultats des extrêmes conjoints historiques. Évènement 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations. 22

Figure 13 Carte des extrêmes conjoints historiques. Évènement 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations. 22

Figure 14 Résultat des extrêmes conjoints historiques et futurs. Évènement 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations. 23

Figure 15 Test de sensibilité des copules sur les analyses d'extrêmes conjoints historiques. Évènement avec 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations. 24

Figure 16 Test de sensibilité des copules sur les analyses d'extrêmes conjoints historiques et futurs. Évènement avec 1:50 niveaux d'eau et 1:50 précipitations. 25

Figure 17 Relation entre le tau de Kendall et le facteur de multiplication des extrêmes conjoints pour la copule de Gumbel. 26

Liste des abréviations, sigles et acronymes

ABRÉV.	Abréviation
AHCCD	Données Climatiques Canadiennes Ajustées et Homogénéisées, en anglais Adjusted and Homogenized Canadian Climate Data
BM	Méthode des maxima par blocs, en anglais Block Maxima

CBCL	Canadian British Consulting Limited
CDF	Fonction de distribution cumulative, en anglais Cumulative Distribution Function
CGVD2013	Système canadien de référence altimétrique de 2013, en anglais Canadian Geodetic Vertical Datum of 2013
CIA	Critère d'Information d'Akaike
CIB	Critère d'Information Bayésien
CMIP6	Sixième Projet d'Intercomparaison des Modèles Couplés, en anglais Sixth Coupled Model Intercomparison Project
CNR	Conseil national de recherches (Canada)
ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
ECS	Sensibilité du climat, en anglais Ecosystem Climate Sensitivity
FACTS	Cadre pour l'évaluation des changements du niveau de la mer, en anglais Framework for Assessing Changes to Sea-level
FEMA	Federal Emergency Management Agency (Étas-Unis)
GEV	Distribution généralisée des valeurs extrêmes, en anglais Generalized Extreme Value distribution
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GPD	Distribution de Pareto généralisée, en anglais Generalized Pareto Distribution
HyVSEP	Surfaces de Séparation Verticale Hydrographiques, en anglais Hydrographic Vertical Separation Surfaces
INRS	L'Institut national de la recherche scientifique
KS	Kolmogorov-Smirnov
MEDS	Services des données sur le milieu marin, en anglais Marine Environmental Data Section
MLE	Estimation par maximum de vraisemblance, en anglais Maximum Likelihood Estimation
MPO	Ministère des Pêches et des Océans (Canada)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Étas-Unis)
OMM	Organisation météorologique mondiale
PDF	Fonction de distribution de probabilité, en anglais Probability Distribution Function

POT	Dépassements de seuil, en anglais Peaks-Over-Threshold
P-P	Probabilité-probabilité
USACE	U.S. Army Corps of Engineers (Étas-Unis)
<i>pr_wlcond</i>	Indice de précipitations extrêmes (dépassement de seuil) et niveaux d'eau extrêmes conditionnels
PWM	Moments pondérés par probabilité, en anglais Probability Weighted Moments
Q-Q	Quantile-quantile
RNCan	Ressources naturelles Canada
SR6	Sixième Rapport d'Évaluation (du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat)
SSP	Trajectoires socio-économiques partagées, en anglais Shared Socioeconomic Pathway
<i>wl_prcond</i>	Indice de niveaux d'eaux extrêmes (dépassement de seuil) et précipitations extrêmes conditionnelles



Ouranos

Consortium sur les changements climatiques

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

ouranos.ca

