



**Analyse statistique des inondations
conjointes aux exutoires des rivières
visées par les travaux d'INFO-Crue dans
le tronçon maritime du Saint-Laurent
dans le contexte de changements
climatiques**

Rapport du LOT2
Décembre 2021

Analyse statistique des inondations conjointes aux exutoires des rivières visées par les travaux d'INFO-Crue dans le tronçon maritime du Saint-Laurent dans le contexte de changements climatiques

Rapport du LOT2
Décembre 2021

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

Mohammad Bizhanimanzar, Ouranos
Gabriel Rondeau-Genesse, Ouranos
Louis-Philippe Caron, Ouranos

Titre du projet Ouranos: Estimation des surcotes et du rehaussement marin aux exutoires des rivières situées dans le tronçon maritime du Saint-Laurent (estuaire et golfe du Saint-Laurent)

Numéro du projet Ouranos: 705300

Citation suggérée : Bizhanimanzar,M., Rondeau-Genesse,G., Caron,L.P., (2021). *Analyse statistique des inondations conjointes aux exutoires des rivières visées par les travaux d'INFO-Crue dans le tronçon maritime du Saint-Laurent dans le contexte de changements climatiques – LOT2*. Rapport présenté à Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 67 p. + annexe.

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.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| Table des matières..... | ii |
| Liste des figures | iii |
| Liste des tableaux..... | v |
| Liste des abréviations, sigles et acronymes..... | vi |
| Résumé..... | 1 |
| 1. Contexte et objectifs..... | 3 |
| 2. Introduction..... | 5 |
| 3. Méthodologie | 9 |
| 3.1 Bases de données de débits et niveaux d'eau | 9 |
| 3.1.1 Secteur à l'ouest de Saint-Joseph-de-la-Rive | 9 |
| 3.1.2 Rivière Saguenay | 9 |
| 3.1.3 Estuaire, golfe et Baie des Chaleurs | 10 |
| 3.1.4 Évaluation des données TPXO9 | 11 |
| 3.1.5 Discussion des hypothèses sous-jacentes..... | 13 |
| 3.2 Construction des séries débits-niveaux d'eau conjoints | 14 |
| 3.3 Analyse d'événements de crues conjoints par copules | 15 |
| 4. Résultats et discussion | 16 |
| 4.1 Analyse fréquentielle univariée des niveaux d'eau et des débits extrêmes | 16 |
| 4.2 Évaluation de la concomitance des niveaux d'eau et des débits maximums annuels .. | 18 |
| 4.3 Analyse des évènements extrêmes conjoints..... | 20 |
| 5. Analyse de l'effet du rehaussement marin sur les inondations conjointes..... | 30 |
| 5.1 Scénarios de rehaussement marin..... | 30 |
| 5.1.1 Secteur à l'ouest de Saint-Joseph-de-la-Rive | 31 |
| 5.1.2 Rivière Saguenay | 31 |
| 5.1.3 Estuaire, golfe et Baie des Chaleurs | 31 |
| 5.2 Analyse des événements extrêmes conjoints dans un contexte de rehaussement marin | 32 |
| 6. Conclusions et recommandations pour les travaux futurs..... | 42 |
| 6.1 Principales sources d'incertitude et recommandations pour des travaux futurs..... | 43 |
| Références | 45 |
| Annexe A | 47 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1. Localisation des exutoires du LOT 2 (cercles noirs) et les stations marégraphiques (étoiles rouges)..... | 8 |
| Figure 2. Comparaison des marées de l'atlas TPXO9 (axe Y) et TideHarmonics (axe X) extraites à la station de Rimouski pour la période 1984-2019, ainsi que la régression linéaire (ligne bleue) entre ces deux variables. La ligne noire représente une relation parfaite..... | 12 |
| Figure 3. Différence (en m) entre le niveau de marée estimé par TPXO et TideHarmonics à la station Rimouski pour la période 1984-2019..... | 13 |
| Figure 4. Comparaison du niveau de surcote (m) pour différentes récurrences à la station Rimouski et aux exutoires des rivières Mitis, Matane et aux Outardes provenant de (Beck et al., 2020)..... | 14 |
| Figure 5. Séries temporelles des niveaux d'eaux aux embouchures sélectionnées du LOT 2. Les maxima annuels et les niveaux maximums conditionnés ($WL_{cond}Q$) sont identifiés par des cercles rouges et noirs, respectivement. | 17 |
| Figure 6. Séries temporelles des débits journaliers aux embouchures sélectionnées du LOT 2. Les maxima annuels et les débits maximums conditionnés ($Q_{cond}WL$) sont identifiés par des cercles rouges et noirs respectivement. | 17 |
| Figure 7. Coefficient de corrélation de Kendall (τ) avec les valeur-p correspondants de la série $WL_{cond}Q$ pour les exutoires du LOT2..... | 18 |
| Figure 8. Coefficient de corrélation Kendall (τ) avec les valeur-p correspondants de la série $Q_{cond}WL$ pour les exutoires du LOT2..... | 19 |
| Figure 9. Nuage de points montrant les tendances et les corrélations entre les variables principales et conditionnées dans les séries $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ pour les embouchures des rivières du Gouffre et Montmorency. | 20 |
| Figure 10. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire de la rivière Chaudière, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans..... | 23 |
| Figure 11. Semblable à Figure 10 mais pour la rivière au Renard. | 23 |
| Figure 12. Semblable à Figure 10 mais pour la rivière Petit Saguenay. | 24 |
| Figure 13. Semblable à Figure 10 mais pour la rivière Mitis. | 24 |
| Figure 14. Semblable à Figure 10 mais pour la Petite rivière Cascapédia. | 25 |
| Figure 15. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{cond}WL$ à l'exutoire de la rivière Chaudière, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans..... | 27 |
| Figure 16. Semblable à Figure 15 mais pour la rivière au Renard. | 27 |
| Figure 17. Semblable à Figure 15 mais pour la rivière Petit Saguenay. | 28 |
| Figure 18. Semblable à Figure 15 mais pour la rivière Mitis. | 28 |
| Figure 19. Semblable à Figure 15 mais pour la Petite rivière Cascapédia. | 29 |
| Figure 20. Rehaussement marin correspondant au 95e percentile du RCP 8.5 à l'horizon 2070 pour les embouchures du LOT2. Source de données (James et al., 2021). | 32 |
| Figure 21. Isolignes des crues conjointes pour $WLRM_{cond}Q$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire de la rivière Chaudière (horizon temporel de 2070). Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$ avec une période de retour de 100 ans en climat actuel. | 35 |
| Figure 22. Semblable à Figure 21 mais pour la rivière au Renard. | 36 |
| Figure 23. Semblable à Figure 21 mais pour la rivière Petit-Saguenay..... | 36 |

| | |
|--|----|
| Figure 24. Semblable à Figure 21 mais pour la rivière Mitis. | 37 |
| Figure 25. Semblable à Figure 21 mais pour la Petite rivière Cascapédia. | 37 |
| Figure 26. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{cond}WLRM$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire de la rivière Chaudière (horizon temporel de 2070). Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{cond}WL$ avec une période de retour de 100 ans en climat actuel. | 39 |
| Figure 27. Semblable à Figure 26 mais pour la rivière au Renard. | 40 |
| Figure 28. Semblable à Figure 26 mais pour la rivière Petit Saguenay. | 40 |
| Figure 29. Semblable à Figure 26 mais pour la rivière Mitis. | 41 |
| Figure 30. Semblable à Figure 26 mais pour la Petite rivière Cascapédia. | 41 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| Tableau 1. Liste des exutoires visés pour le LOT1 et LOT2 du projet ainsi que de la méthodologie utilisée pour estimer les niveaux d'eau aux différents exutoires..... | 6 |
| Tableau 2. Les deux séries de scénarios débit-niveau d'eau utilisées pour le calcul d'un évènement conjoint de 100 ans dans le cas de copules indépendantes. | 15 |
| Tableau 3. Paramètres de la distribution ajustée aux variables conditionnées des séries $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ pour les embouchures sélectionnées du LOT2..... | 21 |
| Tableau 4. Scénarios niveau-débit pour la série $WL_{cond}Q$, pour une probabilité au dépassement de 1%..... | 22 |
| Tableau 5. Scénarios niveau-débit pour la série $Q_{cond}WL$ pour une probabilité au dépassement de 1%..... | 26 |
| Tableau 6. Paramètres de la distribution ajustés à la variable conditionnée de la série ($WLRM_{cond}Q$) pour les embouchures sélectionnées du LOT2..... | 33 |
| Tableau 7. Scénarios niveau-débit basés sur la série $WLRM_{cond}Q$ pour une probabilité au dépassement de 1% pour les embouchures sélectionnées du LOT2. | 34 |
| Tableau 8. Scénarios niveau-débit basés sur la série $Q_{cond}WLRM$ pour une probabilité au dépassement de 1% pour les embouchures sélectionnées du LOT2. | 38 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|-----------------------------|---|
| DEH | Direction de l'expertise hydrique |
| MPO | Pêches et Océans Canada |
| RCP | Representative Concentration Pathway |
| MhAST | Multihazard Scenario Analysis Toolbox |
| WL_{cond}Q | La série de niveaux d'eau maximums dans un intervalle de ± 1 jour des débits maximums annuels |
| Q_{cond}WL | La série de débits maximums dans un intervalle de ± 1 jour des niveaux maximums annuels |
| WLRM_{cond}Q | La série de niveaux d'eau maximums incluant le rehaussement marin de $d_{\pm 1}$ dans un intervalle de ± 1 jour des débits maximums annuels |
| Q_{cond}WLRM | La série de débits maximums annuels dans un intervalle de ± 1 jour des niveaux d'eau maximums avec rehaussement marin |

Résumé

Les inondations conjointes sont des événements extrêmes résultant de l'interaction entre le débit d'un affluent et le niveau d'eau d'un milieu récepteur qui, dans les régions côtières du fleuve Saint-Laurent peuvent avoir des impacts socio-économiques importants sur les infrastructures et sur le bien-être de ces communautés. Les changements climatiques peuvent aggraver la situation en augmentant le niveau moyen de la mer et les niveaux de crue, ce qui peut mener à une augmentation de la zone inondable près des côtes. Cette étude a pour objectif de développer une méthodologie pour l'analyse des crues conjointes aux exutoires visés par les travaux d'INFO-Crue en climat actuel et pour un horizon de 50 ans, et fournir les données nécessaires pour cartographier les zones inondables qui sont influencées à la fois par les niveaux d'eau en milieu estuaire ou maritime et les débits de la rivière. La méthodologie, présentée en détails dans le rapport du LOT1 du projet, est basée sur l'analyse statistique bivariée du débit et des niveaux d'eau extrêmes en utilisant la méthode par copules. La sélection des paires extrêmes débit-niveau d'eau est basée sur les maxima annuels de la variable indépendante (débit ou niveau d'eau) et la valeur maximale de la variable conditionnée correspondante (niveau d'eau/débit) dans un intervalle de ± 1 jour. La significativité de la corrélation entre les deux séries temporelles détermine quel type de modèle de copule sera utilisé (dépendant ou indépendant). Dans le cas d'une corrélation significative, la meilleure fonction de copule est sélectionnée sur la base du critère BIC (*Bayesian Information Criterion*). Cette fonction peut ensuite être utilisée dans la production d'isolignes de périodes de retour conjointes de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans en supposant une occurrence simultanée du débit ET du niveau d'eau élevés (scénario dénommé *AND* dans la littérature scientifique). Dans le cas où la corrélation entre les paires d'extrêmes est non-significatif, ce qui est le cas pour tous les exutoires étudiés dans ce projet, la copule indépendante, dont la distribution cumulative est définie comme le produit de la fonction de distribution de deux variables, est utilisée pour construire les isolignes conjointes de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans. Ensuite, pour chacune de ces périodes de retour, 7 paires de débit (Q) – niveau d'eau (H), correspondant à divers scénarios équiprobables, sont suggérées comme conditions frontières pour le modèle hydraulique. De cette façon, non seulement la zone inondable associée à la méthode FEMA peut être déterminée, mais aussi la sensibilité de la zone inondable à la présence d'événements moins extrêmes, mais survenant de façon

simultanée. Des scénarios similaires sont également proposés en climat futur, en considérant le rehaussement marin à chacun des exutoires. Les résultats montrent que :

1. Comme pour les exutoires des rivières du LOT 1, aucune corrélation significative n'est détectée entre les paires débits-niveau d'eau aux exutoires des rivières du LOT 2.
2. Le rehaussement marin peut modifier de façon très importante la période de retour conjointe et sa considération dans la cartographie des zones inondables en région côtière est essentielle. La comparaison des débits-niveaux d'eau conjoints produits avec et sans l'effet du rehaussement marin montre qu'un événement conjoint de 100 ans en climat présent peut devenir un événement de récurrence variant de 2 à 50 ans, dépendamment des exutoires, lorsque le rehaussement marin est pris en compte.

1. Contexte et objectifs

Dans la foulée des événements du printemps 2017, le gouvernement du Québec, en impliquant une diversité d'acteurs, a amorcé une réflexion sur la gestion des risques d'inondation à l'échelle de la province, et ce, dans un contexte d'évolution du climat. Cette réflexion a permis de faire plusieurs constats majeurs, dont celui du besoin d'une cartographie des zones inondables à jour et complète pour le Québec permettant une prise en compte adéquate du risque dans l'aménagement du territoire et dans la mise en œuvre de solutions d'adaptation. En réponse à ce constat, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) en collaboration avec plusieurs partenaires a mis en œuvre le projet INFO-Crue, visant entre autres à délimiter les zones inondables par une nouvelle cartographie, pour appuyer l'aménagement du territoire couvrant une grande partie du Québec méridional en tenant compte des changements climatiques.

Cet objectif implique une chaîne de modélisation complexe passant des modèles climatiques, aux modèles hydrologiques et hydrauliques. Rapidement, un besoin a été identifié à la fin de cette chaîne de modélisation, et un projet a été développé avec pour objectif d'améliorer la prise en compte des inondations conjointes dans la cartographie des plaines inondables pour les embouchures de rivière situées en milieux estuarien et maritime.

La modélisation hydraulique utilisée pour les fins d'INFO-Crue est effectuée à l'aide de deux logiciels, soient HEC-RAS (modélisation à fine échelle par les ingénieurs de la Direction de l'expertise hydrique - DEH) et LISFLOOD-FP (modélisation à large échelle). Dans les deux cas, la modélisation est effectuée en régime permanent et requiert des « conditions frontières », soient des débits en entrée et des niveaux d'eau à la sortie du tronçon. La modélisation des débits en provenance des rivières, ainsi que diverses façons d'améliorer cette modélisation, est adressée par d'autres projets d'INFO-Crue, et plus généralement est bien maîtrisée par la DEH. Cependant, la prise en compte des niveaux d'eau et de l'impact de leur changement dans l'estuaire et le golfe du St-Laurent est un nouvel aspect à prendre en compte. Dans ce contexte, le projet vise non seulement à fournir les données nécessaires afin de cartographier les zones inondables dans les exutoires de rivière influencées par les phénomènes estuariens et maritimes, mais vise également à développer une méthodologie et à fournir une expertise à la DEH

afin d'accroître leurs connaissances, de même que la capacité de leurs ingénieurs dans ce domaine.

Cette étude servira à fournir un premier estimé des niveaux d'eau présents et futurs pour les rivières qui possèdent des exutoires se situant dans le tronçon maritime du Saint-Laurent (estuaire et golfe du Saint-Laurent) et dans la rivière Saguenay.

Plus spécifiquement, le projet actuel vise à :

- Identifier un ou des jeu(x) de données adéquat(s) pouvant permettre à la DEH de simuler des inondations conjointes entre le milieu maritime et fluvial en climat actuel.
- Identifier et recommander une technique simple, mais fiable, qui permette d'effectuer des probabilités conjointes entre le milieu fluvial et maritime pour les rivières visées par les travaux d'INFO-Crue.
- Préparer les données nécessaires à la composante maritime de la technique qui aura été identifiée au point précédent (e.g. maximums annuels, niveaux de récurrence T, niveaux moyens, et incertitudes associées).
- Fournir une estimation de l'impact des changements climatiques sur les niveaux d'eau le long de l'estuaire et du golfe du St-Laurent au travers d'enveloppes de rehaussement marin basées sur divers scénarios climatiques.

2. Introduction

Les inondations conjointes ont des impacts socio-économiques importants sur les communautés côtières. Dans ces régions, la limite de la zone inondable n'est pas seulement déterminée par l'ampleur du débit de l'affluent, mais aussi par le niveau d'eau en aval. Les changements climatiques peuvent aussi avoir un impact sur la zone à risque en augmentant le niveau moyen de la mer, de même que la fréquence des niveaux d'eau élevés (extrêmes).

L'objectif de ce projet est d'analyser les crues conjointes de 22 exutoires de rivières identifiées dans le projet INFO-Crue (voir le

| <i>Rivière</i> | <i>Échéancier</i> | <i>Exutoire du BV</i> | <i>Source de donn</i> |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---|
| Etchemin | LOT 1 Juin 2021 | Fleuve aval | Simulation par |
| Jacques-Cartier | | Fleuve aval | Simulation par |
| à Mars | | Saguenay | Station marégraph |
| Sainte-Anne | | Fleuve aval | Simulation par |
| Petite Rivière Cascapédia | LOT 2 Décembre 2021 | Baie-des-Chaleurs | Combinaison de marée de la station marégra |
| du Gouffre | | Estuaire moyen | Simulation par |
| Mitis | | Estuaire maritime | Combinaison de marée de la station marégra |
| Montmorency | | Fleuve aval | Simulation par |
| Petit Saguenay | | Saguenay | "Estimé": interpolation linéaire e |
| au Renard | | Golfe | Station marégraph |
| Ristigouche | | Baie-des-Chaleurs | Combinaison de marée de la station marégra |
| York | | | Combinaison de marée de la station marégra |
| Chaudière | | Fleuve aval | Simulation par |
| Chicoutimi | | Saguenay | À év |
| Ha! Ha! | | Saguenay | Station marégraph |
| Matane | | Estuaire maritime | Combinaison de marée de la station marégra |
| du Moulin | | Saguenay | À év |
| aux Outardes | | Estuaire maritime | Combinaison de marée de la station marégra |
| aux Sables | | Saguenay | À év |
| Saguenay | | Estuaire limite maritime | Retiré c |
| Saint-Charles | Fleuve aval | Simulation par | |
| du Sud | Estuaire moyen | Simulation par | |

Tableau 1 pour la liste des rivières) et de fournir les données nécessaires afin de cartographier les zones inondables dans ces embouchures. Une revue de la littérature révèle deux approches pour l'analyse des inondations conjointes. La première, souvent nommée « méthode FEMA (*Guidance for FEMA's Risk Mapping, Assessment and Planning, 2020*) » en raison de son utilisation par cet organisme gouvernemental américain, suppose que le niveau d'eau extrême et le débit de crue sont statistiquement indépendants (Moftakhari et al., 2019). Dans ce cas, la zone inondable associée à une période de retour de T ans est déterminée par une paire de simulations hydrodynamiques comme suit:

1- La condition limite amont est forcée par le débit de crue T ans, et la condition limite aval est forcée par une valeur de niveau d'eau correspondant au niveau moyen des marées hautes.

2- La condition limite amont est forcée par un débit moyen journalier et la condition limite aval est forcée par le niveau de T années de période de retour.

La zone inondable pour la période de retour de T ans correspond ensuite à l'enveloppe maximale des deux simulations.

La deuxième méthode est basée sur une analyse extrême bivariable dans laquelle une fonction de copule est utilisée pour déterminer la période de retour d'un événement de crue conjoint pour lequel le débit et le niveau d'eau sont corrélés. L'avantage principal de la méthode FEMA est qu'elle requiert seulement deux simulations hydrodynamiques pour cartographier la zone inondable associée à chaque période de retour, ce qui est important dans les cas où les modèles hydrodynamiques sont computationnellement coûteux. Cependant, cette méthode présente deux inconvénients importants :

1) la corrélation entre le niveau d'eau et le débit de la rivière n'est pas prise en compte.

Tableau 1. Liste des exutoires visés pour le LOT1 et LOT2 du projet ainsi que de la méthodologie utilisée pour estimer les niveaux d'eau aux différents exutoires.

| Rivière | Échéancier | Exutoire du BV | Source de données niveau d'eau |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------|---|
| Etchemin | LOT 1 Juin 2021 | Fleuve aval | Simulation par le modèle MPO |
| Jacques-Cartier | | Fleuve aval | Simulation par le modèle MPO |
| à Mars | | Saguenay | Station marégraphique Port-Alfred |
| Sainte-Anne | | Fleuve aval | Simulation par le modèle MPO |
| Petite Rivière Cascapédia | LOT 2 Décembre 2021 | Baie-des-Chaleurs | Combinaison de marées TPXO avec la surcote de la station marégraphique la plus proche |
| du Gouffre | | Estuaire moyen | Simulation par le modèle MPO |
| Mitis | | Estuaire maritime | Combinaison de marées TPXO avec la surcote de la station marégraphique la plus proche |
| Montmorency | | Fleuve aval | Simulation par le modèle MPO |
| Petit Saguenay | | Saguenay | "Estimé": interpolation linéaire entre les stations marégraphiques |
| au Renard | | Golfe | Station marégraphique au Renard |
| Ristigouche | | Baie-des-Chaleurs | Combinaison de marées TPXO avec la surcote de la station marégraphique la plus proche |
| York | | | Combinaison de marées TPXO avec la surcote de la station marégraphique la plus proche |
| Chaudière | | Fleuve aval | Simulation par le modèle MPO |
| Chicoutimi | | Saguenay | À évaluer. |
| Ha! Ha! | | Saguenay | Station marégraphique Port-Alfred |
| Matane | | Estuaire maritime | Combinaison de marées TPXO avec la surcote de la station marégraphique le plus proche |
| du Moulin | | Saguenay | À évaluer. |
| aux Outardes | | Estuaire maritime | Combinaison de marées TPXO avec la surcote de la station marégraphique la plus proche |
| aux Sables | | Saguenay | À évaluer. |
| Saguenay | | Estuaire limite maritime | Retiré du projet. |
| Saint-Charles | Fleuve aval | Simulation par le modèle MPO | |
| du Sud | Estuaire moyen | Simulation par le modèle MPO | |

Cela signifie que la méthode FEMA peut systématiquement sous-estimer la zone inondable dans le cas où les deux événements sont corrélés.

2) La zone inondable d'un événement de T ans de retour pourrait être le produit de conditions qui ne font pas partie des scénarios considérés par la méthode FEMA.

Pour adresser ces lacunes, une analyse statistique bivariée utilisant la méthode de copule est proposée (Moftakhari et al., 2019). Alors que cette approche a souvent été utilisée pour l'analyse d'événements pour lesquels les variables d'intérêt des événements conjoints sont corrélées (Ai et al., 2018; Ghanbari et al., 2021; Moftakhari et al., 2017; Zhao et al., 2017), la méthode est également applicable pour les systèmes non corrélés en utilisant un type spécifique de fonction de copule appelé « copule indépendante » dont la fonction de distribution est le produit de la fonction de distribution des deux variables. Ainsi, la méthodologie développée dans ce projet est basée sur l'analyse statistique bivariée, en sélectionnant la meilleure fonction de copule selon la métrique des critères d'inférence bayésienne (*Bayesian Criteria Inference*). Pour les exutoires ayant une corrélation non-significative entre le niveau d'eau (H) et les débits extrêmes (Q), la copule indépendante est utilisée pour déterminer les isolignes associées à un événement conjoint de T ans (analyse fréquentielle bivariée). Contrairement aux copules pour lesquelles il existe une corrélation significative entre les deux variables, dans le cas de la copule indépendante, toutes les paires Q-H sur une isoligne associée à un événement conjoint de T ans ont la même probabilité d'occurrence. Deux ensembles de 7 paires Q-H associées à un événement conjoint de 100 ans seront fournies comme illustration et pour l'utilisation dans le modèle hydraulique. Ces 7 paires Q-H incluent les paires Q-H recommandées par la méthode FEMA ainsi que des paires Q-H intermédiaires. Dans chaque ensemble, une des variables des crues conjointes est considérée comme étant la variable indépendante et l'autre comme étant la variable conditionnée. Cette méthodologie est donc une extension de celle proposée par la méthode FEMA (Moftakhari et al., 2019). Plus de détails sur la méthodologie utilisée se trouvent au chapitre 3 du rapport portant sur les exutoires du LOT1 de ce projet.

Ce deuxième rapport présente les résultats pour les exutoires fluviaux du LOT2 du projet, soit pour les rivières **Chaudière, Saint-Charles, Montmorency, du Sud, du Gouffre, Ha! Ha!, Petit Saguenay, Mitis, Matane, aux Outardes, au Renard, York, Ristigouche et Petite-Cascapédia**, tel qu'illustré à la Figure 1.

Il faut noter que l'analyse n'a pas été effectuée aux trois exutoires les plus en amont de la rivière Saguenay (**aux Sables, Chicoutimi et du Moulin**) en raison de lacunes

importantes dans les données observées. Notamment, à peine quelques années d'enregistrement existent à la station marégraphique de Chicoutimi. Une méthodologie permettant de reconstruire les niveaux d'eau du Saguenay à l'embouchure des trois exutoires d'intérêt est actuellement en cours de développement à l'aide de données fournies par Rio Tinto, mais les résultats de cette analyse se trouveront dans un rapport subséquent.

D'une manière similaire, alors que la rivière **Saguenay** elle-même est nommée dans les exutoires d'intérêt du projet et d'INFO-Crue (

Tableau 1), l'embouchure est un fjord dont le comportement s'éloigne trop d'une rivière pour

| <i>Rivière</i> | <i>Échéancier</i> | <i>Exutoire du BV</i> | <i>Source de donn</i> |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---|
| Etchemin | LOT 1 Juin 2021 | Fleuve aval | Simulation par |
| Jacques-Cartier | | Fleuve aval | Simulation par |
| à Mars | | Saguenay | Station marégra |
| Sainte-Anne | | Fleuve aval | Simulation par |
| Petite Rivière Cascapédia | LOT 2 Décembre 2021 | Baie-des-Chaleurs | Combinaison de marée de la station marégra |
| du Gouffre | | Estuaire moyen | Simulation par |
| Mitis | | Estuaire maritime | Combinaison de marée de la station marégra |
| Montmorency | | Fleuve aval | Simulation par |
| Petit Saguenay | | Saguenay | "Estimé": interpolation linéaire e |
| au Renard | | Golfe | Station marégra |
| Ristigouche | | Baie-des-Chaleurs | Combinaison de marée de la station marégra |
| York | | | Combinaison de marée de la station marégra |
| Chaudière | | Fleuve aval | Simulation par |
| Chicoutimi | | Saguenay | À év |
| Ha! Ha! | | Saguenay | Station marégra |
| Matane | | Estuaire maritime | Combinaison de marée de la station marégra |
| du Moulin | | Saguenay | À év |
| aux Outardes | | Estuaire maritime | Combinaison de marée de la station marégra |
| aux Sables | | Saguenay | À év |
| Saguenay | | Estuaire limite maritime | Retiré c |
| Saint-Charles | Fleuve aval | Simulation par | |
| du Sud | Estuaire moyen | Simulation par | |

que la notion de « débit », voire le concept de « modélisation hydraulique », soit applicable. Par conséquent, cet exutoire a été retiré du projet, avec l'accord de la DEH.

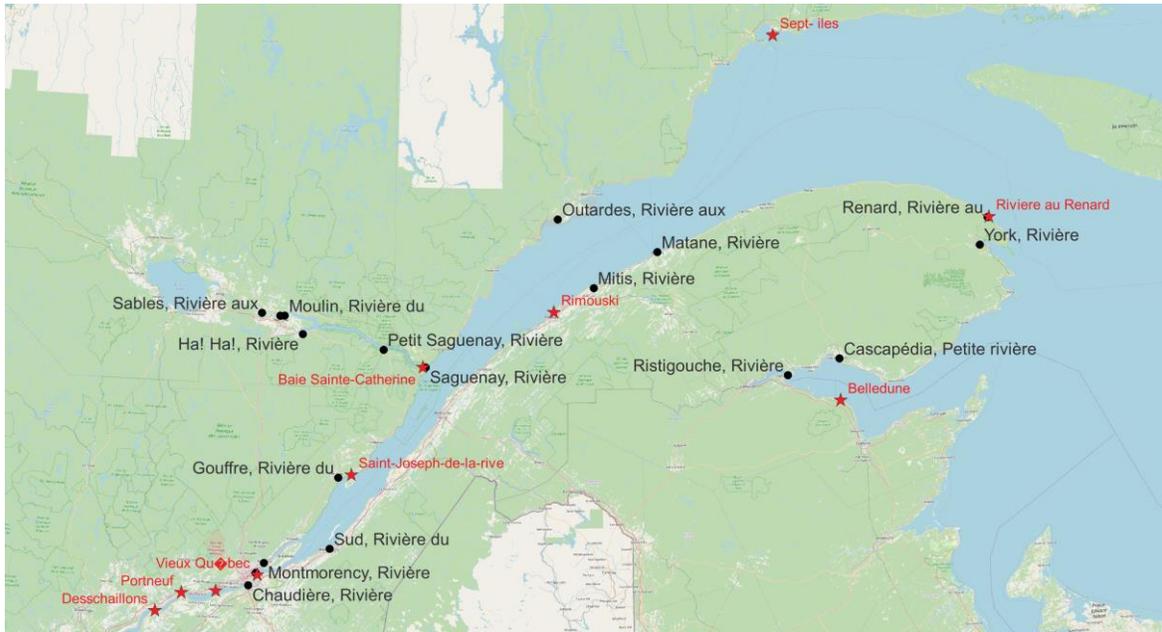


Figure 1. Localisation des exutoires du LOT 2 (cercles noirs) et les stations marégraphiques (étoiles rouges).

3.MÉTHODOLOGIE

3.1 Bases de données de débits et niveaux d'eau

Tel que détaillé dans le rapport du LOT1, la méthodologie développée dans ce projet utilise les débits et les niveaux d'eau extrêmes identifiés à partir de leurs séries temporelles respectives. Les débits journaliers ont été fournis par la DEH à l'ensemble des tronçons d'intérêt pour la période 1968-2019 et ont été utilisés pour calculer les débits extrêmes de récurrence 2 à 350 ans, ainsi que pour identifier les paires de Q-H extrêmes dans l'analyse statistique bivariée. Toutefois, les données de niveau d'eau proviennent de différentes sources, tel qu'identifié par les différentes couleurs du Tableau 1.

3.1.1 Secteur à l'ouest de Saint-Joseph-de-la-Rive

Pour les exutoires situés dans le secteur fluvial du fleuve, à savoir les rivières Chaudière, Saint-Charles, Montmorency, du Sud, et du Gouffre, nous avons utilisé les résultats de simulations rétrospectives du fleuve Saint-Laurent provenant du modèle de Pêches et Océans Canada (MPO) (Lefavre et al., 2016). Ces simulations ont été réalisées en utilisant un modèle unidimensionnel du fleuve entre le Lac Saint-Louis (Montréal) et Saint-Joseph-de-la-Rive (100km à l'est de Québec). Le modèle utilise comme conditions frontières les observations du niveau d'eau en aval ainsi que la vitesse du vent entre l'Île d'Orléans et Saint-Joseph-de-la-Rive, de même que le débit du fleuve Saint-Laurent. Il faut noter que les niveaux d'eau simulés, qui sont en SRIGL85, ont été convertis vers le système de référence géodésique vertical canadien de 1928 (CGVD28) pour le calcul des copules Q-H associées aux récurrences bivariées.

3.1.2 Rivière Saguenay

L'exutoire de la rivière Ha ! Ha! se trouve à proximité de la rivière à Mars étudiée dans la première phase du projet et, comme cela avait été le cas précédemment, les niveaux d'eau enregistrés à la station marégraphique de Port-Alfred (code 03460) ont été utilisés comme référence pour les niveaux d'eau et pour construire la série de débits-niveaux d'eau conjointe. À noter que cette station a été mise en opération en 1975, mais que les données sont manquantes pour l'année 2000, de janvier à juin 2001 et de mai 2013 à

juillet 2017. Par conséquent, la série conjointe débit-niveau d'eau a été construite pour la période 1975-2019 en tenant compte seulement des jours pour lesquels les observations de niveau d'eau sont disponibles.

Les séries chronologiques des niveaux d'eau à l'exutoire de la rivière Petite-Saguenay et Saint-Jean sont basées sur une interpolation linéaire entre les niveaux d'eau observés à la station Tadoussac (code 3425) et à la station Port-Alfred (code 03460). La distance entre l'exutoire Petite-Saguenay et les stations Port-Alfred et Tadoussac est d'environ 61 km et 37 km, respectivement. Cette distance pour le cas de la rivière Saint-Jean est 56 km et 42 km respectivement. La régression linéaire dérivée entre les niveaux d'eau maxima quotidiens aux stations Port-Alfred et Tadoussac (se référer au rapport du LOT1, Figure 17) a été réutilisée pour déterminer le niveau d'eau approximatif à l'exutoire de la Petite Rivière Saguenay et Saint-Jean en fonction de la différence entre les niveaux d'eau observés à ces deux marégraphes. De même que pour les exutoires à l'ouest de Saint-Joseph-de-la-Rive (section 3.1.1), les données de niveau d'eau de la station Port-Alfred et Tadoussac sont basées sur le zéro des cartes et ont été converties en système référentiel vertical CGVD28 pour le calcul des récurrences bivariées. Il en va de même pour les niveaux d'eau dérivés de l'analyse conjointe aux stations Ha! Ha!, Petit-Saguenay et Saint-Jean.

3.1.3 Estuaire, golfe et Baie des Chaleurs

Il n'existe que trois stations marégraphiques actives dans tout ce secteur, soient à Rimouski (code 2985), à l'embouchure de la rivière au Renard (code 2330) et du côté sud de la Baie des Chaleurs, à Belledune (code 2145). Ainsi, à l'exception de la rivière au Renard, aucun exutoire dans ce secteur n'est adéquatement couvert par une station marégraphique et il a par conséquent été nécessaire de développer une méthodologie permettant de transposer l'information disponible aux marégraphes vers les exutoires d'INFO-Crués. Comme pour les autres exutoires, les niveaux d'eau de récurrences sont calculés en utilisant le système référentiel vertical CGVD28.

Les exutoires ont été séparés en fonction du marégraphe le plus près, soient :

- Rimouski (code 2985) pour les rivières Mitis, Matane, et aux Outardes.
- au Renard (code 2330) pour la rivière du même nom (distance négligeable) et York.
- Belledune (code 2145) pour les rivières Ristigouche et Petite-Cascapédia.

Pour reconstruire la série temporelle de niveau d'eau d'exutoires situés à une certaine distance d'un marégraphe, le niveau d'eau observé à la station marégraphique est décomposé comme suit (Bernier & Thompson, 2015) :

$$\eta_{obs} = \eta_{TD} + \eta_{TS} + \eta_S + \eta_M + E \quad (3.1)$$

où η_{obs} (m) est le niveau d'eau observé à la station, η_S (m) est la surcote, η_{TD} (m) est la marée déterministe (astronomique), η_{TS} (m) est la marée non-déterministe (dû à l'interaction marée-surcote et d'autres effets environnementaux tels que l'apport de la rivière Saguenay dans le fleuve), η_M (m) est le niveau moyen de la mer et E (m) est l'erreur de mesure.

Afin d'estimer la marée déterministe aux exutoires de la rivière, nous avons utilisé la base de données TPXO9-atlas (Egbert & Erofeeva, 2002), qui est une base de données globale fournissant les marées harmoniques à une résolution de 1/30°. Cela permet d'obtenir une estimation du terme η_{TD} à l'exutoire d'intérêt de même qu'à la station marégraphique la plus près. Soustraire ce dernier du niveau d'eau observé à la station η_{obs} permet d'obtenir une estimation pour la somme des trois termes restants, soit $\eta_M + \eta_S + \eta_{TS}$. En posant l'hypothèse que le niveau moyen de la mer, la surcote et la marée non-déterministe sont similaires aux deux endroits (hypothèse discutée plus bas), ce terme résiduel est additionné aux marées harmoniques des exutoires obtenues de l'atlas TPXO9 pour obtenir le niveau d'eau total aux exutoires d'intérêt. C'est-à-dire, que :

$$\eta_{exutoire} = \eta_{TD_exutoire_TPXO9} + \eta_{TS_station} + \eta_{S_station} + \eta_{M_station} + E \quad (3.2)$$

3.1.4 Évaluation des données TPXO9

Afin d'examiner la capacité de cette base de données à reproduire la composante harmonique de la marée, la série temporelle de TPXO à l'emplacement de la station de Rimouski a été comparée à la marée harmonique extraite par le module *R* "TideHarmonics" (<https://cran.r-project.org/web/packages/TideHarmonics/index.html>) qui, selon l'étude de Beck et al. (2020), permet d'extraire de manière précise le signal de marées harmoniques à partir d'une série temporelle de niveaux d'eau observés. Cette comparaison est illustrée à la Figure 2 et confirme que le moment (phase) du signal de marée prédit par TPXO coïncide relativement bien avec celui de TideHarmonics, mais

qu'il existe une différence d'amplitude de marée (*Tidal range*) entre les deux séries temporelles, ce qui fait en sorte que le nuage de points prend la forme d'une ellipse plutôt qu'une ligne droite.

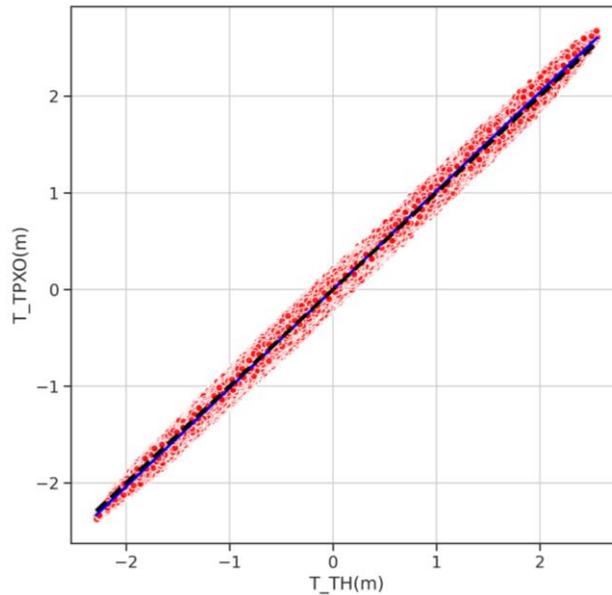


Figure 2. Comparaison des marées de l'atlas TPXO9 (axe Y) et TideHarmonics (axe X) extraites à la station de Rimouski pour la période 1984-2019, ainsi que la régression linéaire (ligne bleue) entre ces deux variables. La ligne noire représente une relation parfaite.

Une comparaison des deux marées (Figure 3) montre que la différence entre TPXO et TideHarmonics demeure raisonnable (environ ± 10 cm) considérant une amplitude pouvant dépasser 2 mètres, mais que les différences maximales peuvent atteindre jusqu'à ± 25 cm entre les deux modèles. Il est à noter que les deux bases de données fournissent seulement une estimation de la marée harmonique. L'utilisation d'autres bases de données, telles que celle maintenue par MPO, pourrait permettre de mieux évaluer cette base de données¹.

¹ Un contact a été réalisé à cet effet, mais les données n'étaient pas encore disponibles au moment de la réalisation de ce rapport.

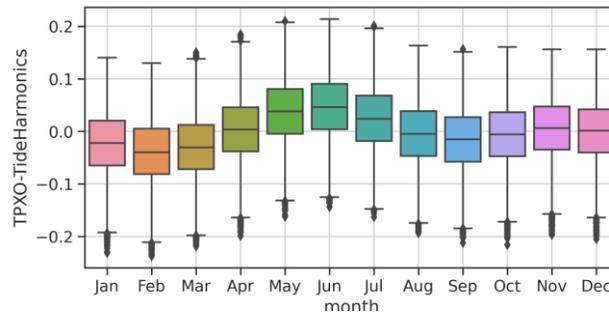


Figure 3. Différence (en m) entre le niveau de marée estimé par TPXO et TideHarmonics à la station Rimouski pour la période 1984-2019.

3.1.5 Discussion des hypothèses sous-jacentes

Outre l'hypothèse que la marée harmonique est adéquatement représentée par la base de données TPXO, trois autres hypothèses sont sous-jacentes à l'application de la méthodologie :

- Le niveau d'eau moyen demeure le même entre la station et l'embouchure visée. Étant donné la proximité entre les stations et les exutoires, cette hypothèse devrait être valide pour les différents exutoires considérés ici.
- Les effets non-harmoniques demeurent similaires sur la distance séparant la station de l'embouchure.
- Les surcotes demeurent similaires sur la distance séparant la station de l'embouchure. La validité de cette hypothèse est explorée plus en détail dans les paragraphes suivants.

Afin d'examiner la crédibilité de l'hypothèse selon laquelle les surcotes sont similaires aux exutoires des rivières qui se trouvent à proximité d'une station marégraphique donnée, nous avons comparé les surcotes de récurrence 2 à 350 ans provenant de Beck et al. (2020) (qui sont calculées aux stations et projetées spatialement à partir d'un modèle hiérarchique Bayésien utilisant la pression comme variable explicative) aux exutoires des rivières Mitis, Matane et aux Outardes et à la station Rimouski. Le résultat est illustré à la Figure 4. On peut voir que le niveau de surcote demeure très semblable entre les exutoires, même pour une récurrence de 350 ans, ce qui renforce la confiance dans l'hypothèse posée. Il est à noter, toutefois, qu'il est impossible avec cette méthodologie de reproduire la progression d'une onde de tempête à travers un secteur donné, ce qui signifie que la combinaison de la marée et de la surcote pourrait ne pas reproduire

exactement les conditions réelles vécues à l'emplacement d'un exutoire (e.g. une surcote survenue à marée haute pourrait survenir à marée montante avec notre reconstruction). En absence de données de terrain plus précises, nous estimons que cet effet est relativement négligeable.

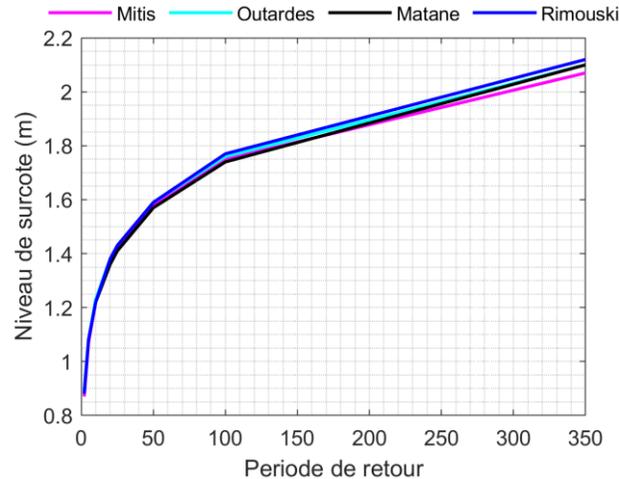


Figure 4. Comparaison du niveau de surcote (m) pour différentes récurrences à la station Rimouski et aux exutoires des rivières Mitis, Matane et aux Outardes provenant de (Beck et al., 2020).

3.2 Construction des séries débits-niveaux d'eau conjoints

Tel que discuté dans le rapport du LOT1 (section 3.2), la sélection des paires débit-niveau d'eau extrêmes est basée sur la méthode conditionnelle (Moftakhari et al., 2019; Sadegh et al., 2018) pour laquelle les maxima annuels de la variable indépendante et la valeur maximum de la variable conditionnée dans un intervalle de ± 1 jour forment les paires Q-H extrêmes. De cette façon, deux séries de paires débit-niveau d'eau extrêmes sont créées : l'une considérant le débit de la rivière comme variable indépendante et le niveau d'eau comme variable conditionnée ($WL_{cond}Q$) et une deuxième pour laquelle niveau d'eau est la variable indépendante et le débit est la variable conditionnée ($Q_{cond}WL$). Cela permet ainsi de considérer les différents types d'inondations qui sont produites. Ceci est important, car les maxima annuels de débit et de niveau d'eau aux exutoires situés dans le fleuve ne se produisent pas nécessairement au même moment de l'année.

3.3 Analyse d'événements de crues conjoints par copules

Les détails de la méthodologie développée pour l'analyse des événements conjoints de débit-niveau d'eau ont été présentés dans les sections 3.3 et 3.4 du rapport du LOT 1. Aucun changement n'a été apporté pour le LOT 2. En bref, une fois les paires Q-H conjoints identifiées, la corrélation de Kendall (τ) est calculée et la significativité de ce coefficient est utilisée pour déterminer si l'analyse fréquentielle bivariée sera effectuée en utilisant la copule dépendante (pour le cas où $valeur-p < 0.05$) ou indépendante (si $valeur-p > 0.05$).

Dans le cas de copules indépendantes, puisque les paires Q-H se situant sur l'isoligne bivariée sont tous équiprobables, 7 paires de Q-H sont sélectionnées dans l'objectif de couvrir une gamme de scénarios possibles. Le Tableau 2 présente les combinaisons Q-H proposées pour l'analyse d'un événement conjoint de 100 ans de période de retour. Comme discuté précédemment, la zone inondable utilisant ces simulations Q-H couvrira les recommandations faites par la méthode FEMA (scénario 1 dans $Q_{cond}WL$ et scénario 7 dans $WL_{cond}Q$), ainsi que les situations pour lesquelles la crue conjointe de récurrence 100 ans est produite par l'interaction de niveaux d'eau et de débits moins élevées (par exemple scénario 4 dans $Q_{cond}WL$ et $WL_{cond}Q$).

L'analyse par copules elle-même est réalisée à l'aide d'une librairie MATLAB libre-accès nommée *Multihazard Scenario Analysis Toolbox* (MhAST), développée à l'Université de Californie, Irvine (UCI) et utilisée dans plusieurs études, notamment dans l'analyse des crues conjoints pour les régions côtières des États-Unis (Moftakhari et al., 2019; Sadegh et al., 2018).

Tableau 2. Les deux séries de scénarios débit-niveau d'eau utilisées pour le calcul d'un événement conjoint de 100 ans dans le cas de copules indépendantes.

| | | Scénario 1 | | Scénario 2 | | Scénario 3 | | Scénario 4 | | Scénario 5 | | Scénario 6 | | Scénario 7 | |
|---------------------------|---------------------------|---|-----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-----------|
| | | \hat{Q} | H_{100} | Q_2 | H_{50} | Q_5 | H_{20} | Q_{10} | H_{10} | Q_{20} | H_5 | Q_{50} | H_2 | Q_{100} | \hat{H} |
| WL_{cond}Q | | Les paires d'extrêmes pour cette série sont le débit maximum annuel et le niveau d'eau maximal dans un intervalle ± 1 jour. Le \hat{Q} et \hat{H} sont respectivement les valeurs minimales du débit et du niveau d'eau pour la série de maximums sélectionnés. | | | | | | | | | | | | | |
| | Q_{cond}WL | Les paires d'extrêmes pour cette série sont le niveau maximum annuel et le débit maximal dans un intervalle ± 1 jour. Le \hat{Q} et \hat{H} sont respectivement les valeurs minimales de débit et le niveau d'eau pour la série de maximums sélectionnés. | | | | | | | | | | | | | |

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Analyse fréquentielle univariée des niveaux d'eau et des débits extrêmes

Cette section présente les résultats de l'analyse fréquentielle univariée effectuée sur les séries temporelles de niveaux d'eau et de débits aux exutoires des rivières du LOT2. Nous présentons ici les résultats d'un exutoire de rivière pour chacun des secteurs à l'étude, soit la rivière Chaudière pour le secteur fluvial, la rivière Petit Saguenay pour le Saguenay, les rivières Mitis et au Renard pour les secteurs l'estuaire et du golfe du fleuve et finalement, la Petite rivière Cascapédia pour la Baie des Chaleurs. Les résultats pour les autres exutoires du LOT2 sont disponibles dans le fichier accompagnant ce rapport (voir l'Annexe A pour la description des variables).

Les Figure 5 et Figure 6 illustrent respectivement les séries temporelles de niveaux d'eau et de débits, dans lesquelles les maximums annuels ont été indiqués par des cercles rouges. Les cercles noirs dans les Figure 5 et Figure 6 représentent les niveaux d'eau et les débits pour les séries $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$, respectivement. Sur la Figure 5, on note que les cercles rouges et noirs ne coïncident généralement pas, ce qui indique que les maxima annuels des débits et niveau d'eau ne se produisent pas de façon simultanée. Tel que mentionné à la section 3.3.1 du rapport du LOT1, la meilleure fonction ajustée est celle pour laquelle la valeur du critère d'information bayésien (BIC) est minimale. Les distributions sélectionnées sont ensuite utilisées pour calculer les débits et les niveaux d'eau associés aux périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans. **Erreur ! Source du renvoi introuvable..**

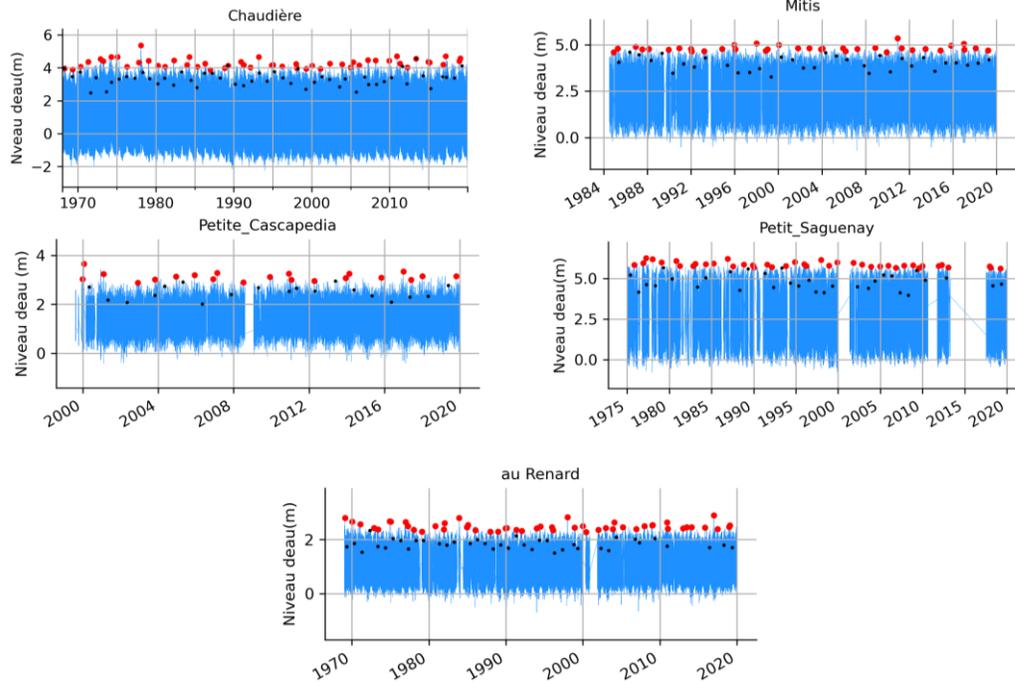


Figure 5. Séries temporelles des niveaux d'eaux aux embouchures sélectionnées du LOT 2. Les maxima annuels et les niveaux maximums conditionnés (WL_{condQ}) sont identifiés par des cercles rouges et noirs, respectivement.

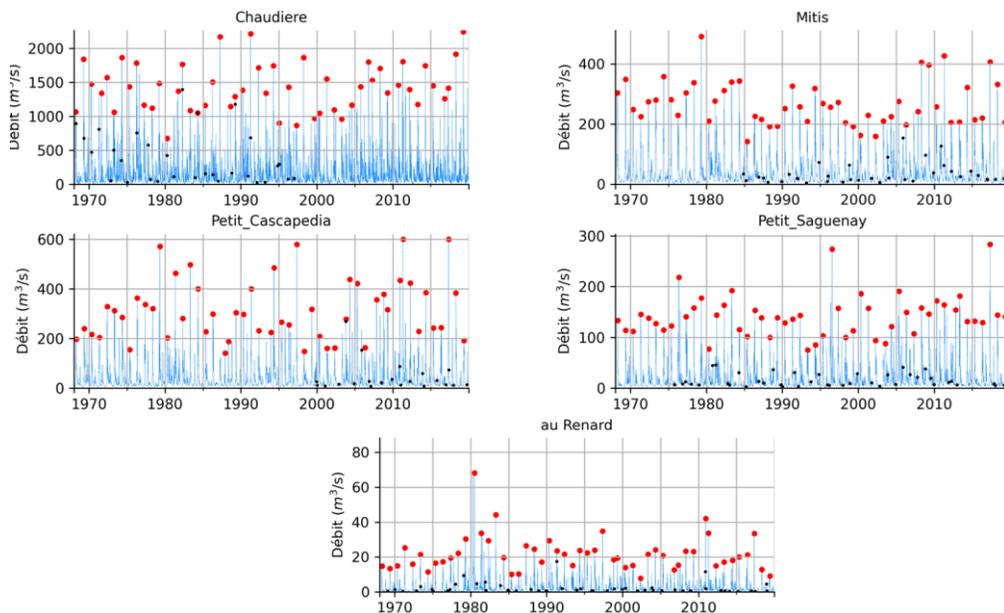


Figure 6. Séries temporelles des débits journaliers aux embouchures sélectionnées du LOT 2. Les maxima annuels et les débits maximums conditionnés (Q_{condWL}) sont identifiés par des cercles rouges et noirs respectivement.

4.2 Évaluation de la concomitance des niveaux d'eau et des débits maximums annuels

Tel que mentionné à la Section 3.3, le choix de la méthodologie à employer pour la prise en compte des événements conjoints est basé sur la significativité de la corrélation entre les extrêmes de niveau d'eau et de débit dans les séries $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$. Les coefficients de corrélation de Kendall (τ) pour les séries $WL_{cond}Q$ sont présentés à la Figure 7. On constate que le τ est inférieur à 0,08 pour toutes les embouchures sauf pour l'exutoire de la rivière Chaudière ($\tau = 0.12$) et celles situées dans la Baie des Chaleurs, où la corrélation atteint 0,15 et 0,21 pour les rivières Ristigouche et Petite-Cascapédia, respectivement. Toutefois, la corrélation demeure non significative (*valeur-p* supérieur à 0,05) pour tous les exutoires. La significativité des corrélations a également été évaluée pour la corrélation de Spearman et les résultats demeurent inchangés.

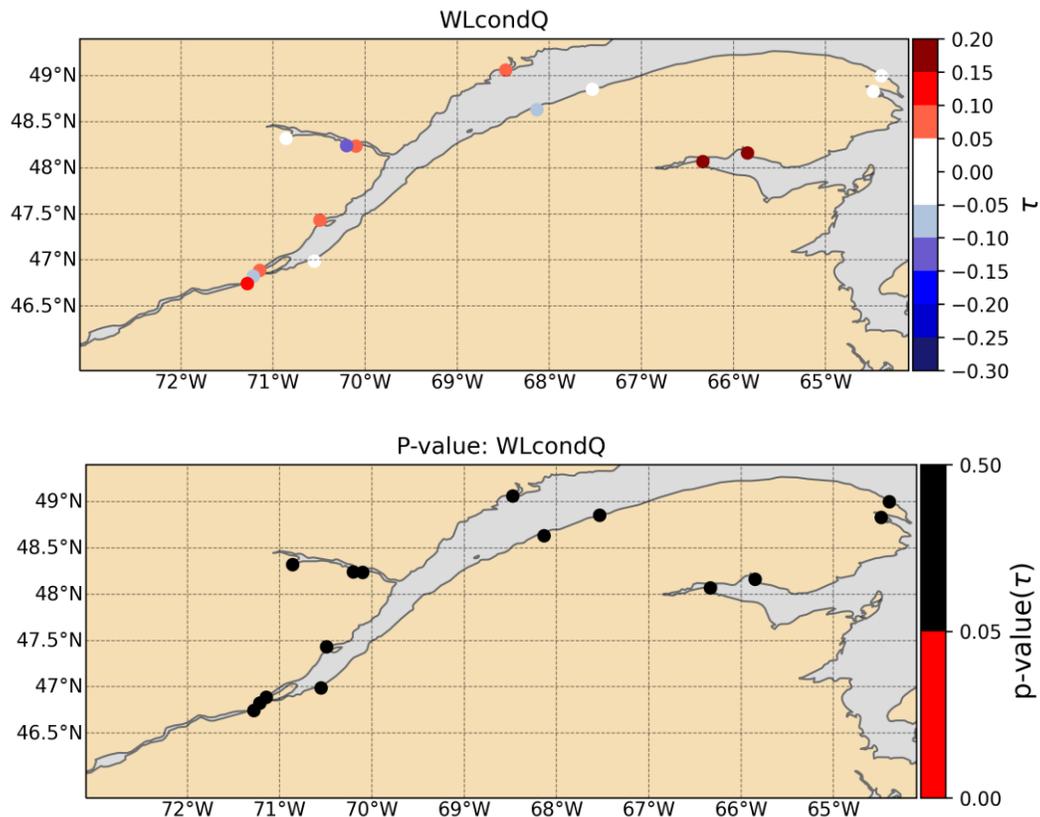


Figure 7. Coefficient de corrélation de Kendall (τ) avec les valeur-p correspondants de la série $WL_{cond}Q$ pour les exutoires du LOT2.

Les coefficients de corrélation de Kendall (τ) pour les séries $Q_{cond}WL$ sont présentés à la Figure 8. La *valeur-p* est non-significative pour la majorité des embouchures, mais est

significative pour les rivières Montmorency et au Renard, où la valeur-p est égale à 0,02 et 0,04, respectivement (les résultats sont similaires avec une corrélation de Spearman). Ce comportement n'a pas été observé dans le cas de $WL_{cond}Q$ pour ces deux rivières. Afin de mieux comprendre la raison derrière la significativité à ces deux exutoires, les variables indépendantes et conditionnées des séries $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ ont été tracées à la Figure 9. Surprenamment, la corrélation demeure significative même lorsque l'on exclue les valeurs plus extrêmes se situant à l'extérieure de la distribution. Cependant, considérant que i) les exutoires voisins ne montrent aucune corrélation significative et que ii) les corrélations pour ces deux rivières sont négatives (niveaux d'eau élevés plus enclins de survenir lors des débits faibles) et que nous ne pouvons expliquer cette corrélation à l'aide d'un mécanisme physique, nous avons appliqué la même méthodologie aux rivières Montmorency et au Renard qu'aux autres exutoires. Ceci implique que l'analyse fréquentielle bivariée (conjointe) est effectuée à l'aide de la copule indépendante pour l'ensemble des exutoires du LOT 2.

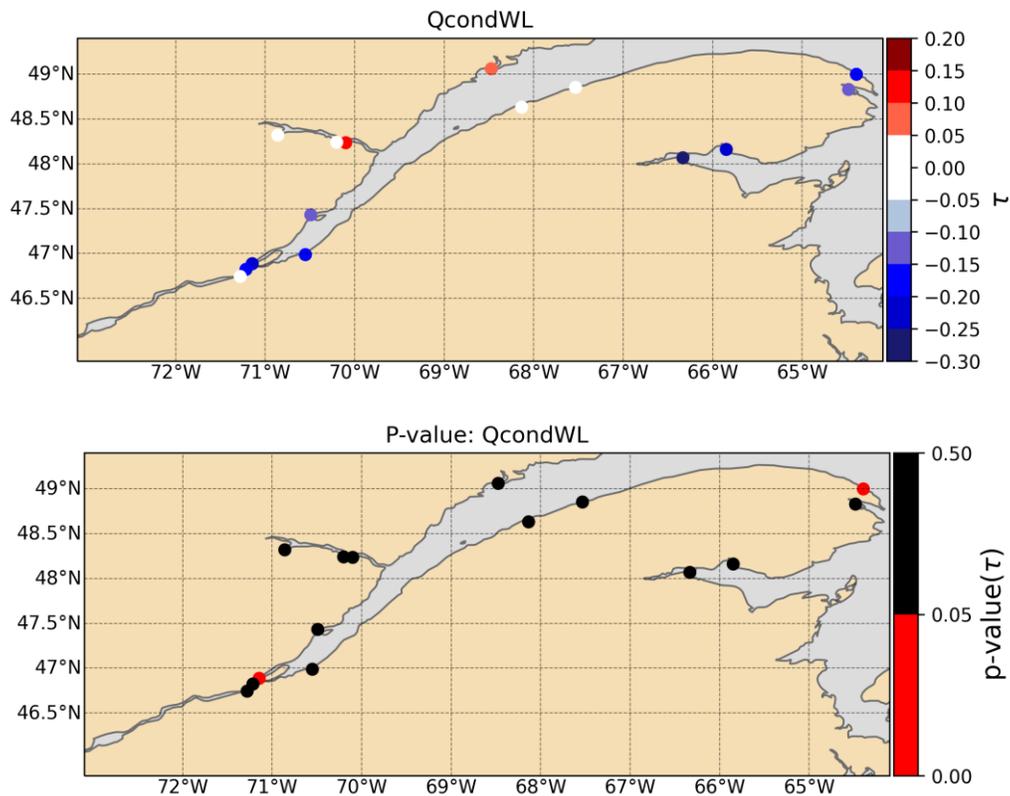


Figure 8. Coefficient de corrélation Kendall (τ) avec les valeur-p correspondants de la série $Q_{cond}WL$ pour les exutoires du LOT2.

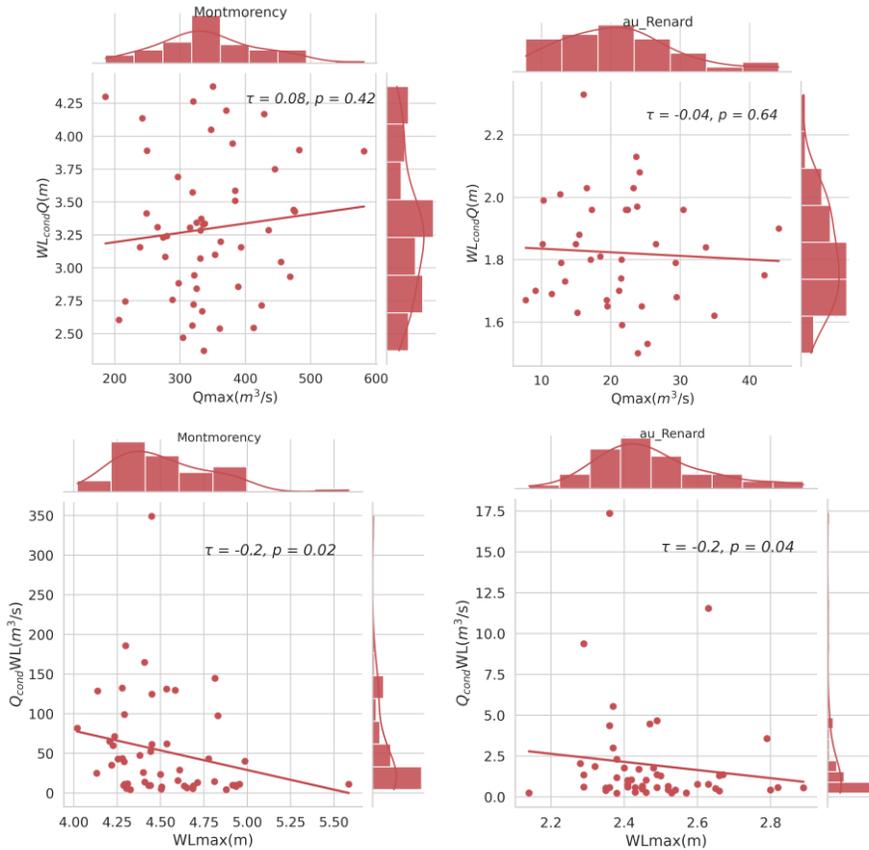


Figure 9. Nuage de points montrant les tendances et les corrélations entre les variables principales et conditionnées dans les séries $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ pour les embouchures des rivières du Gouffre et Montmorency.

4.3 Analyse des événements extrêmes conjoints

Cette section présente les résultats de l'analyse fréquentielle bivariée effectuée sur les deux séries conjointes, c'est-à-dire $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ correspondant aux embouchures du LOT 2.

Le Tableau 3 présente la fonction de distribution ainsi que les paramètres respectifs pour les variables conditionnées des séries $Q_{cond}WL$ et $WL_{cond}Q$ aux embouchures sélectionnées du LOT2. Les résultats pour les autres exutoires du LOT2 se trouvent dans le répertoire accompagnant ce rapport.

Tableau 3. Paramètres de la distribution ajustée aux variables conditionnées des séries WL_{condQ} et Q_{condWL} pour les embouchures sélectionnées du LOT2.

| | Exutoire | Nom de la distribution | Paramètre 1 | Paramètre 2 | Paramètre 3 |
|--------------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| WL_{condQ} | Chaudière | <i>Loglogistic</i> | $\mu = 1.19$ | $\sigma = 0.072$ | - |
| | Rivière au Renard | <i>Birnbaumsaunders</i> | $\beta=0.835$ | $\gamma=0.22$ | - |
| | Petit Saguenay | <i>Generalized Pareto</i> | $\kappa= -1.12$ | $\sigma=1.24$ | $\theta=0.96$ |
| | Mitis | <i>weibull</i> | $A= 1.82$ | $B=5.46$ | - |
| | Petite-Cascapédia | <i>Generalized Pareto</i> | $\kappa= -1.05$ | $\sigma=1.02$ | $\theta=1.11$ |
| Q_{condWL} | Chaudière | <i>Birnbaumsaunders</i> | $\beta=164.48$ | $\gamma=1.40$ | - |
| | Rivière au Renard | <i>Generalized Pareto</i> | $\kappa= 0.618$ | $\sigma=0.779$ | $\theta=0.230$ |
| | Petit Saguenay | <i>Generalized Pareto</i> | $\kappa= 0.035$ | $\sigma=11.90$ | $\theta=2.70$ |
| | Mitis | <i>Inverse Gaussian</i> | $\mu=34.05$ | $\lambda=30.47$ | - |
| | Petite-Cascapédia | <i>Generalized Pareto</i> | $\kappa= 0.693$ | $\sigma=15.48$ | $\theta=6.36$ |

Le Tableau 4 présente les paires Q-H associées aux scénarios 1 à 7 suggérés au Tableau 2, lorsque le débit est considéré comme la variable indépendante de la crue conjointe (WL_{condQ}). Ces paires de Q-H sont également montrées dans l'espace de copules aux Figure 10 à Figure 14. Les cercles bleus représentent les paires Q-H et les autres panneaux présentent les périodes de retour associées au débit maximal (bas) et au niveau d'eau (gauche) dans la série WL_{condQ} .

Les scénarios Q-H sélectionnés (cercles noirs) couvrent une large gamme de combinaisons possibles : les scénarios 1, 2 et 3 peuvent être associés à des situations « moins extrêmes » de débit, alors que les scénarios 5, 6 et 7 sont associés à une crue ayant une période de retour de 20 ans ou plus.

On rappelle que, comme toutes les valeurs de Q-H sur une isoligne ont une probabilité d'occurrence identique dans le cas de copules indépendantes, d'autres paires Q-H que celles du Tableau 4 pourraient également être sélectionnées. Dans ce projet, à titre d'exemple, nous avons choisi des scénarios pouvant couvrir les combinaisons Q-H recommandées par la méthode FEMA (scénario 1 dans Q_{condWL} et scénario 7 dans

WL_{cond}Q), ainsi que les crues conjointes de 100 ans causées par l'interaction d'évènements de 2, 5, 10, 20 et 50 ans pour les variables principales et conditionnées.

Tableau 4. Scénarios niveau-débit pour la série WL_{cond}Q, pour une probabilité au dépassement de 1%.

| | <u>Scénario 1</u> | | <u>Scénario 2</u> | | <u>Scénario 3</u> | | <u>Scénario 4</u> | | <u>Scénario 5</u> | | <u>Scénario 6</u> | | <u>Scénario 7</u> | |
|--------------------------|-------------------|-----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-----------|
| | \hat{Q} | H_{100} | Q_2 | H_{50} | Q_5 | H_{20} | Q_{10} | H_{10} | Q_{20} | H_5 | Q_{50} | H_2 | Q_{100} | \hat{H} |
| Chaudière | 674.9 | 4.56 | 1399.7 | 4.34 | 1717.0 | 4.05 | 1900.2 | 3.84 | 2060.7 | 3.62 | 2251.6 | 3.28 | 2384.9 | 2.27 |
| au Renard | 7.72 | 1.4 | 20.6 | 1.32 | 28.03 | 1.2 | 32.53 | 1.11 | 36.6 | 1.00 | 41.5 | 0.83 | 45.0 | 0.53 |
| Petit-Saguena y | 74.9 | 2.06 | 130.3 | 2.05 | 166.4 | 2.03 | 189.0 | 1.98 | 210.1 | 1.88 | 236.5 | 1.56 | 256.0 | 0.96 |
| Mitis | 141.9 | 2.41 | 241.3 | 2.33 | 303.4 | 2.22 | 341.9 | 2.11 | 377.5 | 1.98 | 421.9 | 1.7 | 454.4 | 0.95 |
| Petite-Cascapédia | 159.7 | 2.08 | 301.3 | 2.07 | 428.7 | 2.04 | 513.5 | 2.0 | 594.3 | 1.90 | 697.7 | 1.61 | 774.3 | 1.11 |

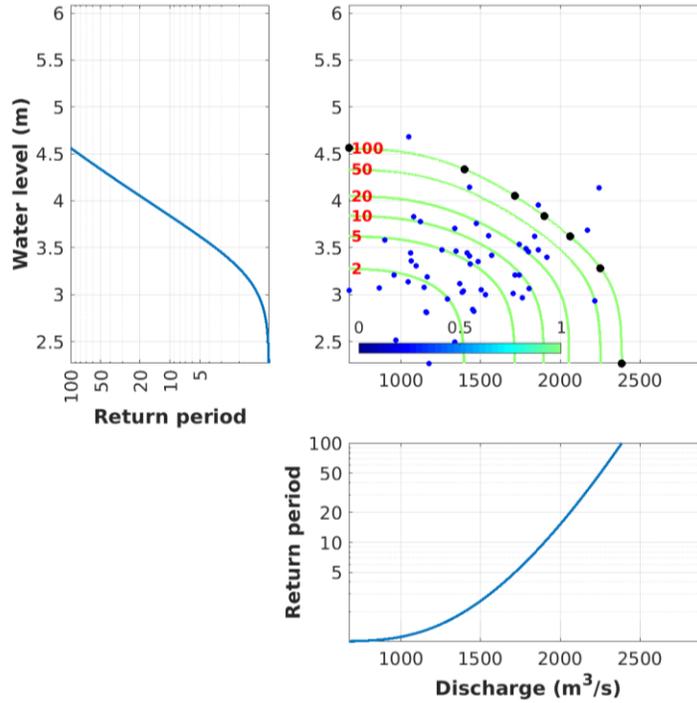


Figure 10. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire de la rivière Chaudière, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

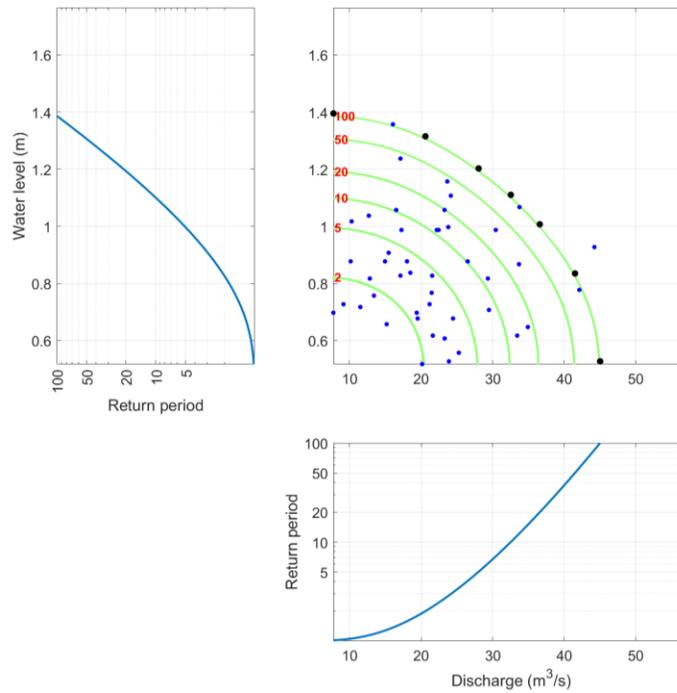


Figure 11. Semblable à Figure 10 mais pour la rivière au Renard.

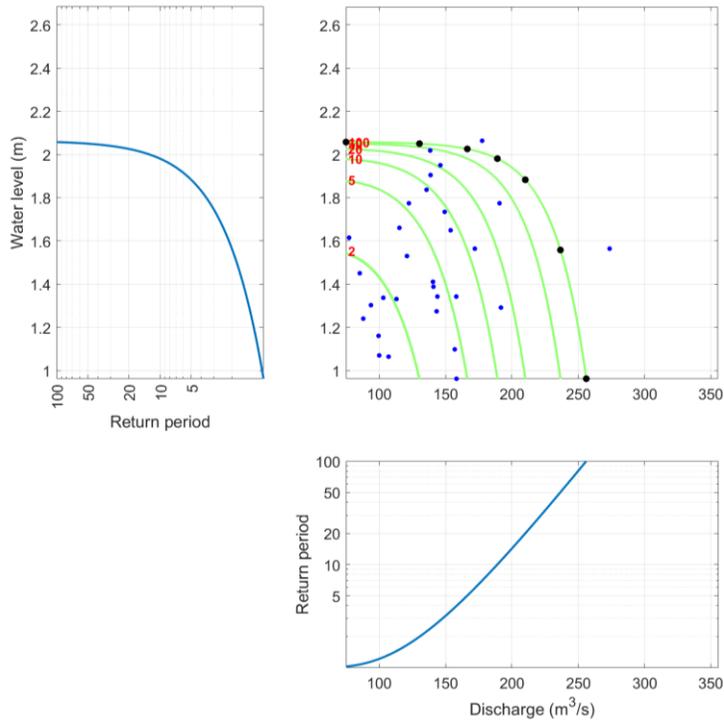


Figure 12. Semblable à Figure 10 mais pour la **rivière Petit Saguenay**.

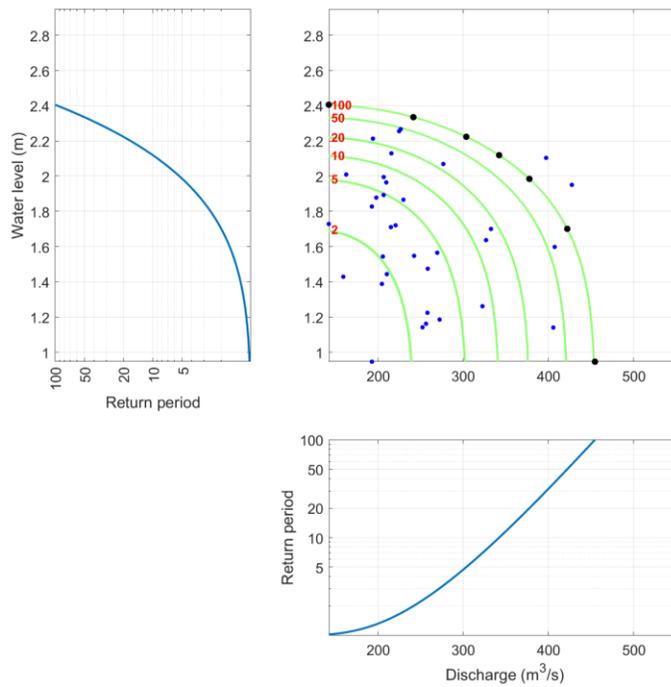


Figure 13. Semblable à Figure 10 mais pour la **rivière Mitis**.

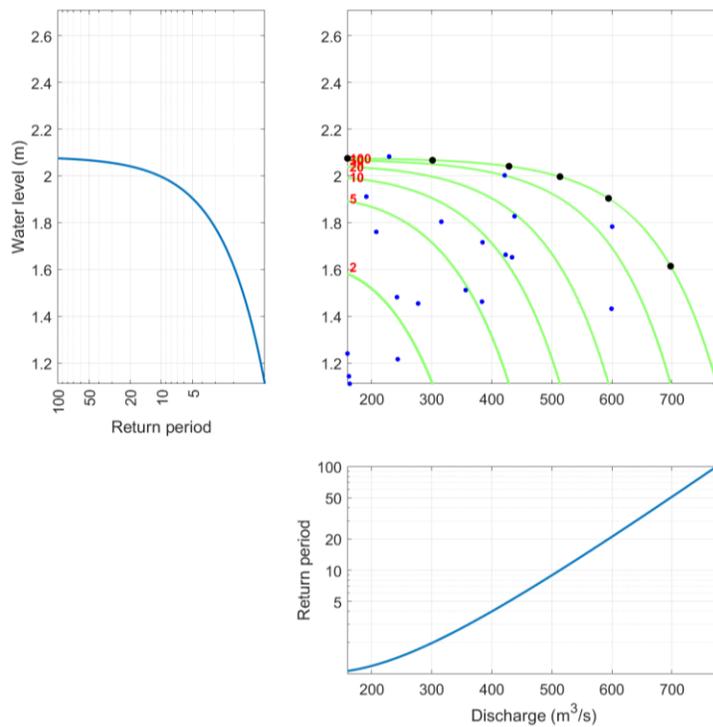


Figure 14. Semblable à Figure 10 mais pour la **Petite rivière Cascapédia**.

D'une manière similaire, le Tableau 5 présente les scénarios Q-H pour la série $Q_{\text{cond}}WL$. Les scénarios Q-H sont également présentés aux Figure 15 à Figure 19. Comme dans le cas de $WL_{\text{cond}}Q$, ici, tous les scénarios Q-H (cercles noirs) associés à une probabilité de 1% sont illustrés sur l'isoligne d'évènement conjoint de 100 ans.

On constate que, comme dans le cas de $WL_{\text{cond}}Q$, la forme de la distribution conjointe est différente entre les exutoires et déterminée par la multiplication des probabilités obtenues lors de l'analyse univariée (débit conditionné au niveau d'eau maximal annuel).

Tableau 5. Scénarios niveau-débit pour la série Q_{condWL} pour une probabilité au dépassement de 1%.

| | <u>Scénario 1</u> | | <u>Scénario 2</u> | | <u>Scénario 3</u> | | <u>Scénario 4</u> | | <u>Scénario 5</u> | | <u>Scénario 6</u> | | <u>Scénario 7</u> | |
|--------------------------|-------------------|-----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-----------|
| | \hat{Q} | H_{100} | Q_2 | H_{50} | Q_5 | H_{20} | Q_{10} | H_{10} | Q_{20} | H_5 | Q_{50} | H_2 | Q_{100} | \hat{H} |
| Chaudière | 21.0 | 5.2 | 164.5 | 5.0 | 505.2 | 4.83 | 829.1 | 4.7 | 1183.7 | 4.5 | 1681.1 | 4.26 | 2071.4 | 3.9 |
| au Renard | 0.23 | 1.9 | 0.9 | 1.87 | 2.4 | 1.81 | 4.2 | 1.74 | 7.0 | 1.65 | 13.11 | 1.49 | 20.68 | 1.32 |
| Petit-Saguenay | 2.7 | 2.45 | 11.05 | 2.43 | 22.4 | 2.4 | 31.2 | 2.35 | 40.28 | 2.29 | 52.57 | 2.17 | 62.1 | 2.04 |
| Mitis | 3.9 | 2.97 | 22.19 | 2.88 | 49.3 | 2.76 | 74.3 | 2.68 | 102.8 | 2.59 | 144.9 | 2.46 | 179.3 | 2.27 |
| Petite-Cascapédia | 6.36 | 2.69 | 20.14 | 2.62 | 52.17 | 2.52 | 94.19 | 2.45 | 162.1 | 2.34 | 320.1 | 2.24 | 527.3 | 1.97 |

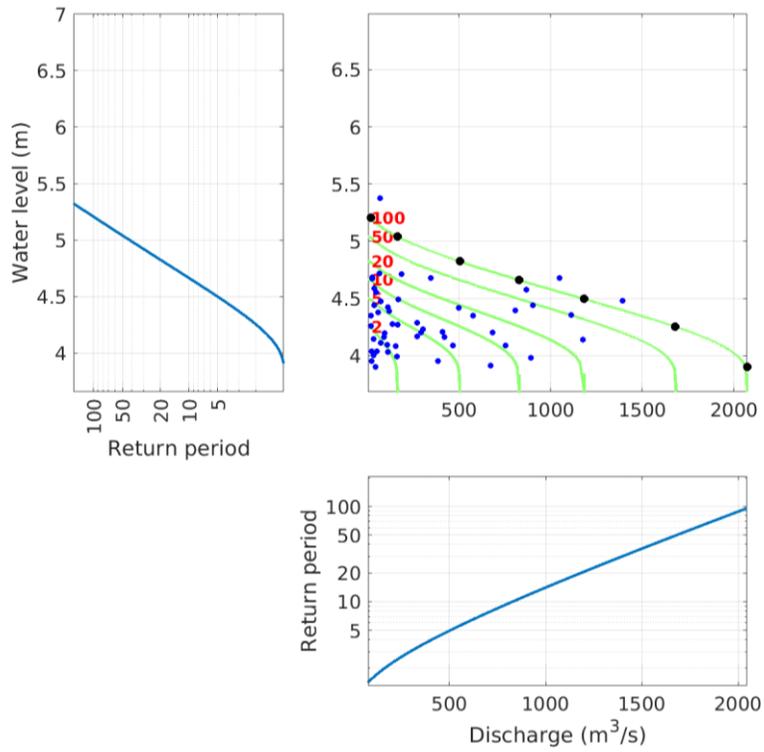


Figure 15. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{\text{cond}}\text{WL}$ à l'exutoire de la **rivière Chaudière**, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de **100 ans**.

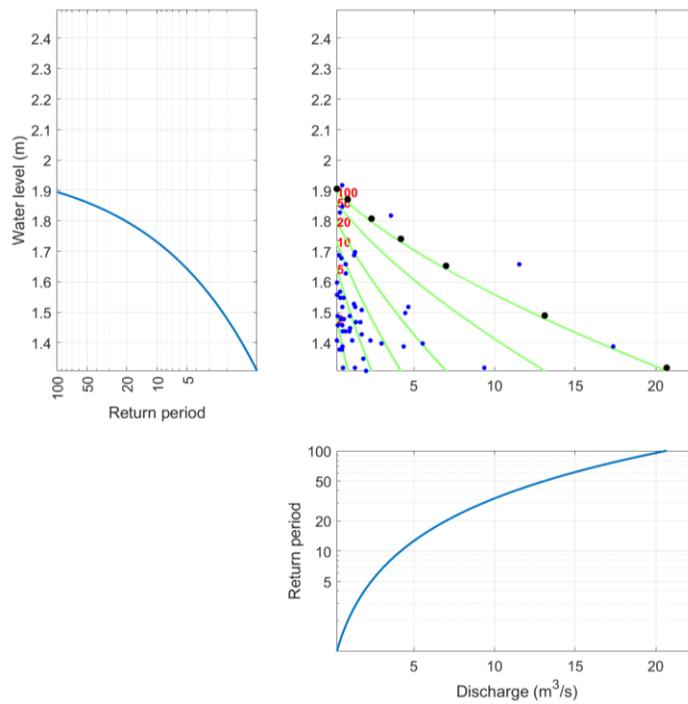


Figure 16. Semblable à Figure 15 mais pour la **rivière au Renard**.

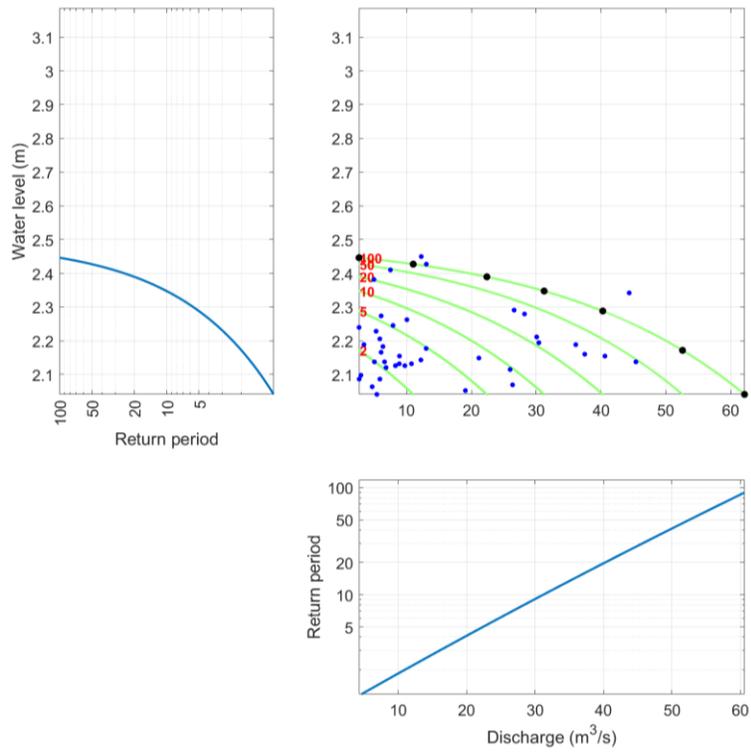


Figure 17. Semblable à Figure 15 mais pour la **rivière Petit Saguenay**.

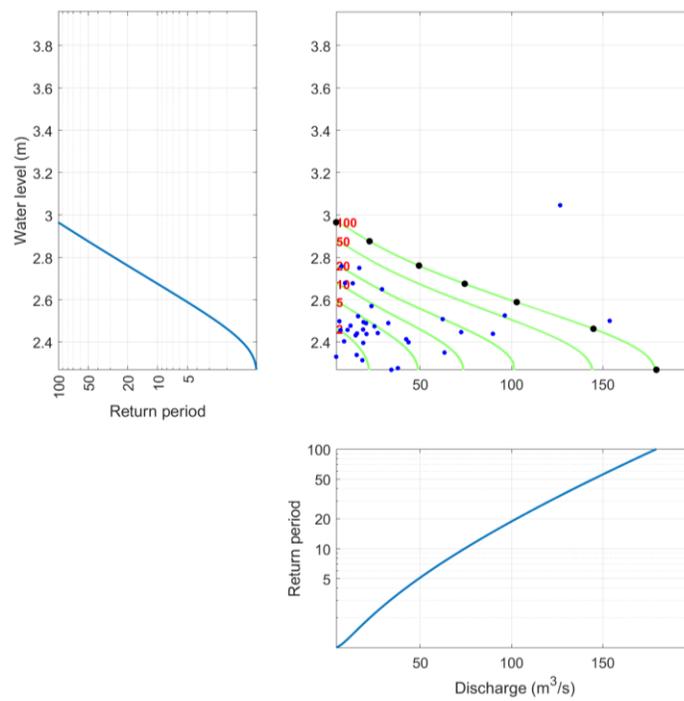


Figure 18. Semblable à Figure 15 mais pour la **rivière Mitis**.

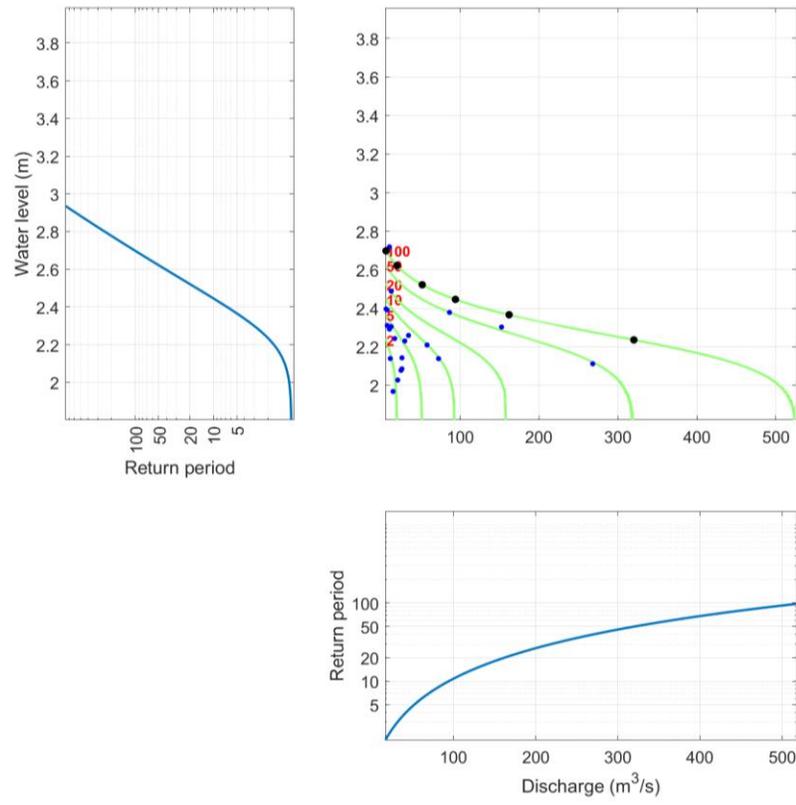


Figure 19. Semblable à Figure 15 mais pour la **Petite rivière Caspédia**.

5. Analyse de l'effet du rehaussement marin sur les inondations conjointes

5.1 Scénarios de rehaussement marin

L'analyse des inondations conjointes telles que décrites dans le chapitre précédent permet de fournir une estimation des zones inondables aux exutoires, mais seulement pour le climat actuel, car le rehaussement marin résultant de l'expansion thermique et de la fonte des banquises fait en sorte que les périodes de retour des niveaux d'eau extrêmes en région côtière seront modifiées de façon significative dans le futur. Cette section décrit la méthodologie adoptée pour intégrer l'impact du rehaussement marin sur les risques d'événements conjoints.

Tel que discuté dans le précédent rapport, un rehaussement correspondant au 95^e percentile du rehaussement marin projeté par un ensemble de simulations suivant le scénario d'émission RCP8.5 pour l'horizon 2070 est utilisé (voir le Tableau 9 du rapport LOT1). L'utilisation d'un quantile aussi élevé pourrait être jugé excessivement prudent, par contre il s'agit de la recommandation de James et al. (2021) pour les régions côtières à faible tolérance au risque. De plus, bien qu'il n'existe pas encore d'adaptation régionale du niveau de rehaussement marin tel que créée par James et al. (2021), les projections CMIP6 suggèrent un rehaussement marin plus élevé par rapport à CMIP5 (Hermans et al., 2021; Payne et al., 2021) entre autres en raison d'une fonte plus rapide du Groenland. Finalement, des projections beaucoup plus pessimistes liées à l'incertitude par rapport à la fonte de la calotte Ouest Antarctique ne sont pas non plus à écarter entièrement (James et al., 2021). Par conséquent, le choix du rehaussement marin correspondant au 95^e centile du Scénario RCP 8.5 se veut un compromis entre la prudence et les différentes incertitudes liées à ce rehaussement.

Comme dans le cas des embouchures du LOT 1, l'estimation de l'amplitude du rehaussement marin aux exutoires d'intérêt provient de différentes sources, car la base de données de rehaussement marin produite par Ressources naturelles Canada (James et al., 2021) ne couvre pas toutes les embouchures du LOT 2.

5.1.1 Secteur à l'ouest de Saint-Joseph-de-la-Rive

En complément aux projections de Ressources naturelles Canada (James et al., 2021), une simulation produite par le modèle de MPO avec un rehaussement marin de 50 cm imposé à Saint-Joseph-de-la-Rive a été utilisé afin d'obtenir une estimation de l'impact du rehaussement marin aux exutoires situés dans le secteur fluvial du fleuve, c'est-à-dire les rivières Chaudière, Montmorency, Saint-Charles, du Gouffre et du Sud. Ce 50 cm de rehaussement correspond au 95 centile de rehaussement à cet endroit pour l'horizon 2070. Il faut toutefois noter que le débit du fleuve, les débits des tributaires ainsi que les conditions météorologiques demeurent inchangés dans cette simulation par rapport aux conditions historiques. Ceci signifie que la comparaison des deux simulations (avec et sans rehaussement marin) sert uniquement à mieux comprendre comment le rehaussement marin pourrait affecter les niveaux d'eau extrêmes pour les régions côtières se situant dans la portion fluviale du Saint-Laurent.

5.1.2 Rivière Saguenay

Pour les exutoires situés dans la rivière Saguenay, soient les rivières Petit Saguenay et Ha! Ha!, la projection de rehaussement marin correspond à la valeur estimée à l'embouchure de la rivière Saguenay par James et al. (2021). Comme discuté pour le cas de rivière à Mars dans le rapport du LOT 1, cette hypothèse est justifiable en raison d'une pente hydraulique très faible entre les stations de Port-Alfred (près de La Baie) et Tadoussac, ainsi que de l'ajustement isostatique relativement similaire pour ces deux endroits. Par conséquent, il est posé comme hypothèse que les projections de rehaussement marin à l'embouchure de la rivière Ha! Ha! et Petit Saguenay sont les mêmes qu'à l'embouchure de la rivière Saguenay (voir la discussion aux pages 31 à 34 du rapport du LOT 1).

5.1.3 Estuaire, golfe et Baie des Chaleurs

Pour les exutoires situés dans l'estuaire et le golfe du St-Laurent de même que dans la Baie des Chaleurs, l'estimation du rehaussement marin associé aux différents horizons temporels et aux scénarios d'émission de gaz à effet serre sont disponibles dans la base de données produite par Ressources naturelles Canada (James et al., 2021). La Figure 20 présente les projections correspondant au 95e centile du RCP8.5 à l'horizon 2070 pour les embouchures du projet. Le rehaussement marin associé à d'autres scénarios de gaz

à effet de serre (RCP) et d'autres horizons temporels se trouvent dans le dossier numérique fourni avec ce rapport. À la Figure 20, on peut voir que l'amplitude minimale du rehaussement marin se trouve à l'embouchure de la rivière aux Outardes (+42 cm) et que le maximum se situe près de la Petite rivière Cascapédia et de la rivière York (+64 cm). Cela s'explique principalement par les différences d'ajustement isostatique, puisque la rive nord du Saint-Laurent à cet endroit s'élève à un rythme de quelques millimètres par année tandis qu'au contraire, la Gaspésie et les provinces maritimes s'affaissent (voir Figure 18 du rapport LOT 1).

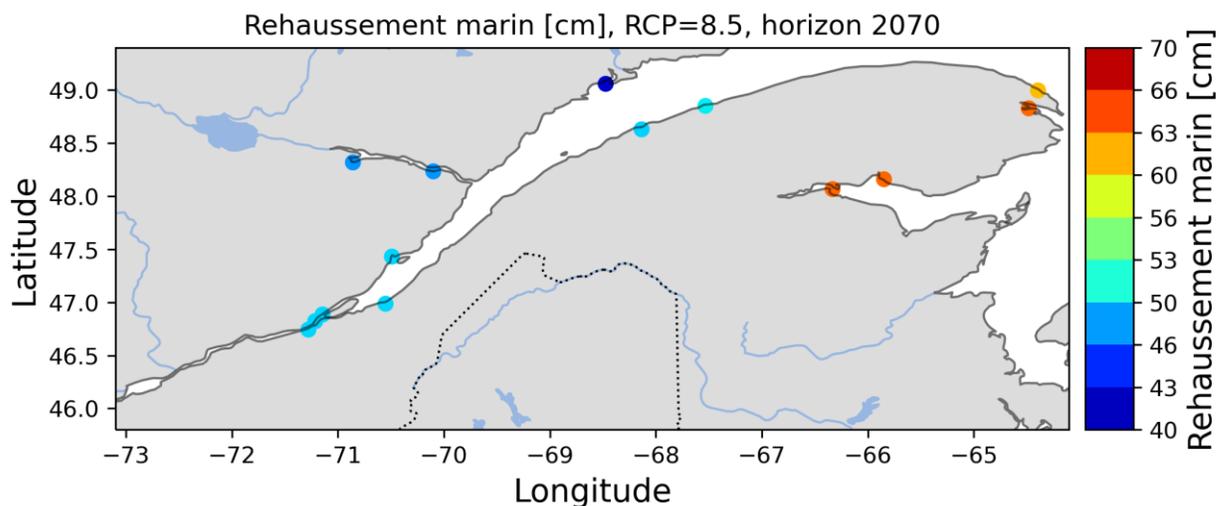


Figure 20. Rehaussement marin correspondant au 95e percentile du RCP 8.5 à l'horizon 2070 pour les embouchures du LOT2. Source de données (James et al., 2021).

5.2 Analyse des événements extrêmes conjoints dans un contexte de rehaussement marin

Dans cette section, l'effet du rehaussement marin sur l'ampleur des crues conjoints est présenté. Pour ce faire, comme dans le cas du LOT 1, une comparaison des paires Q-H associées à la période de retour conjointe de 100 ans en période historique (résultats du chapitre 4) pour la période future d'intérêt est effectuée. Ceci est important pour comprendre comment le rehaussement marin pourrait potentiellement influencer la fréquence des événements conjoints et illustrer l'importance de sa prise en compte dans la cartographie de zone inondable. Comme la méthodologie développée utilise des séries temporelles de niveau d'eau et de débit affluent pour les calculs des Q-H associés à un événement conjoint, la série temporelle de niveau d'eau pour l'horizon futur est estimée

simplement en y ajoutant la projection de rehaussement marin. Cette méthodologie a également été employée par Bevacqua et al. (2019) pour étudier l'effet du rehaussement marin sur les inondations conjointes pour les régions côtières d'Europe. De cette façon, on suppose que le rehaussement marin ne changera pas la forme de la distribution des extrêmes et que la fréquence et l'intensité des tempêtes demeureront constantes, ce qui signifie que seuls les changements du niveau moyen de la mer sont pris en compte. Pour les embouchures situées dans le secteur fluvial du fleuve, les séries temporelles de niveau d'eau proviennent des simulations du modèle de MPO avec un rehaussement marin de 50 cm à la frontière aval.

Il faut noter qu'en ajoutant simplement la projection de rehaussement marin à la série temporelle de niveaux d'eau historiques, la corrélation est inchangée. Cela signifie que la copule indépendante demeure valide pour l'intégration de l'impact du rehaussement marin sur les Q-H associés à l'événement conjoint. Pour les exutoires situés dans le secteur fluvial, toutefois, les τ de Kendall ont été recalculés, mais demeurent non significatifs.

Le Tableau 6 présente les paramètres de distribution ajustés à la variable conditionnée pour la série $WLRM_{condQ}$ (niveau d'eau) et le Tableau 6 présente les scénarios Q-H correspondants pour les cinq rivières prises en exemple dans ce rapport. Les résultats pour les autres exutoires sont disponibles dans le répertoire accompagnant de ce rapport. Afin de visualiser l'impact du rehaussement marin sur l'occurrence des crues conjointes, les Figure 21 et Figure 25 comparent les scénarios Q-H du Tableau 7 (cercles mauves) à ceux précédemment calculés au Tableau 4 (cercles noirs), pour lequel l'effet du rehaussement marin n'était pas présent.

Tableau 6. Paramètres de la distribution ajustés à la variable conditionnée de la série ($WLRM_{condQ}$) pour les embouchures sélectionnées du LOT2.

| Exutoire | Nom de la distribution | Paramètre 1 | Paramètre 2 | Paramètre 3 |
|--------------------------|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Chaudière | <i>Generalized Extreme Value</i> | $\kappa= 0.04$ | $\sigma=0.21$ | $\theta=4.70$ |
| au Renard | <i>Generalized Pareto</i> | $\kappa= -0.41$ | $\sigma=0.28$ | $\theta=1.93$ |
| Petit-Saguenay | <i>Generalized Pareto</i> | $\kappa= -0.49$ | $\sigma=0.22$ | $\theta=2.52$ |
| Mitis | <i>Generalized Extreme Value</i> | $\kappa= 0.04$ | $\sigma=0.11$ | $\theta=2.92$ |
| Petite-Cascapédia | <i>Weibull</i> | A=2.36 | B=9.19 | - |

Tableau 7. Scénarios niveau-débit basés sur la série WLRM_{cond}Q pour une probabilité au dépassement de 1% pour les embouchures sélectionnées du LOT2.

| | Scénario 1 | | Scénario 2 | | Scénario 3 | | Scénario 4 | | Scénario 5 | | Scénario 6 | | Scénario 7 | |
|--------------------------|-------------------|-----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-----------|
| | \hat{Q} | H_{100} | Q_2 | H_{50} | Q_5 | H_{20} | Q_{10} | H_{10} | Q_{20} | H_5 | Q_{50} | H_2 | Q_{100} | \hat{H} |
| Chaudière | 674.9 | 5.05 | 1399.7 | 4.84 | 1716.9 | 4.56 | 1900.2 | 4.35 | 2060.7 | 4.13 | 2251.6 | 3.79 | 2384.9 | 2.76 |
| au Renard | 7.72 | 1.96 | 20.59 | 1.89 | 28.03 | 1.8 | 32.53 | 1.72 | 36.58 | 1.62 | 41.5 | 1.46 | 45.0 | 1.14 |
| Petit-Saguena | 74.9 | 2.77 | 130.3 | 2.67 | 166.4 | 2.52 | 189.0 | 2.39 | 210.1 | 2.24 | 236.5 | 1.97 | 256.0 | 1.44 |
| Mitis | 141.9 | 2.89 | 241.3 | 2.82 | 303.4 | 2.72 | 341.9 | 2.62 | 377.5 | 2.49 | 421.9 | 2.21 | 454.4 | 1.46 |
| Petite-Cascapédia | 159.7 | 2.78 | 301.3 | 2.73 | 428.7 | 2.65 | 513.5 | 2.6 | 594.3 | 2.48 | 697.7 | 2.26 | 774.3 | 1.75 |

On constate que la plus forte augmentation des crues conjointes se produit au scénario 1, dans lequel le rehaussement marin rend la paire Q-H associée à un événement historique de 100 ans similaire à un événement futur d'à peine 10 ans de période de retour pour la rivière Chaudière, tandis qu'il devient environ 50 fois plus probable pour au Renard, Mitis et Petite-Cascapédia. Le facteur d'amplification devient progressivement moins important pour les scénarios 5, 6 et 7, lorsque les périodes de retour des niveaux d'eau diminuent. Les rivières au Renard et Petite-Cascapédia sont celles qui illustrent l'augmentation la plus forte avec le scénario 1, où le H_{100} historique devient environ un $\sim H_2$ en considérant le rehaussement marin.

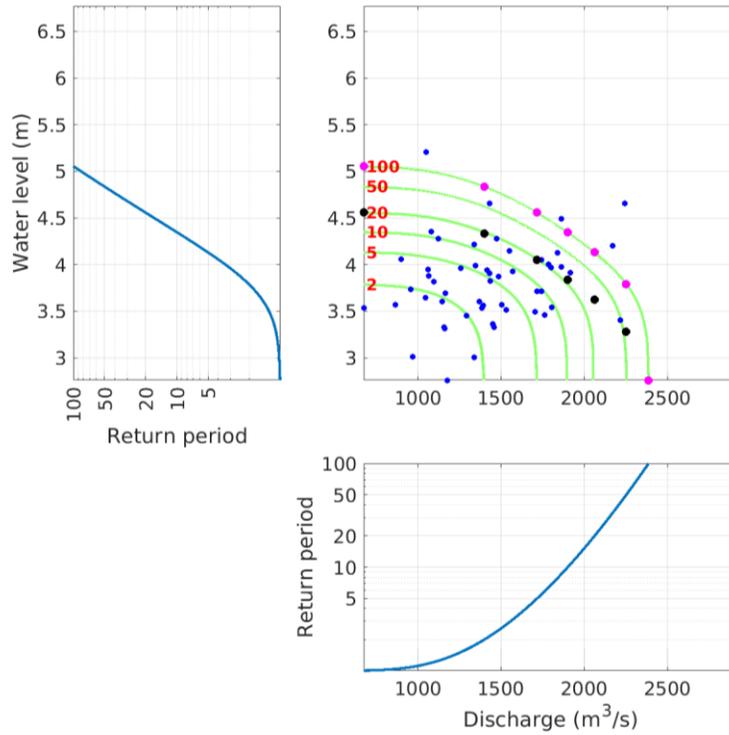


Figure 21. Isolignes des crues conjointes pour $WLRM_{cond}Q$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de **100 ans** à l'exutoire de la **rivière Chaudière (horizon temporel de 2070)**. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$ avec une période de retour de 100 ans en climat actuel.

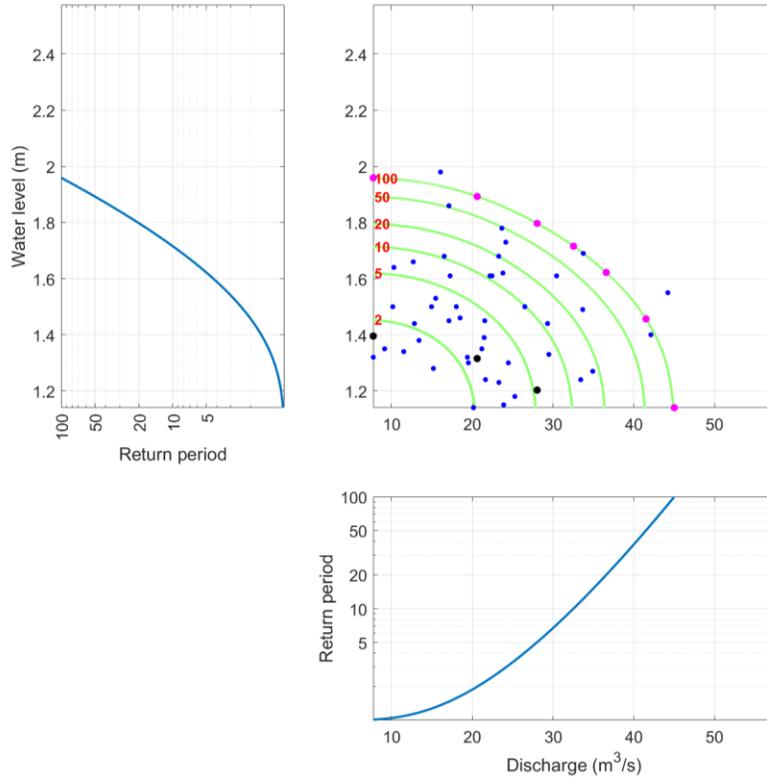


Figure 22. Semblable à Figure 21 mais pour la rivière au Renard.

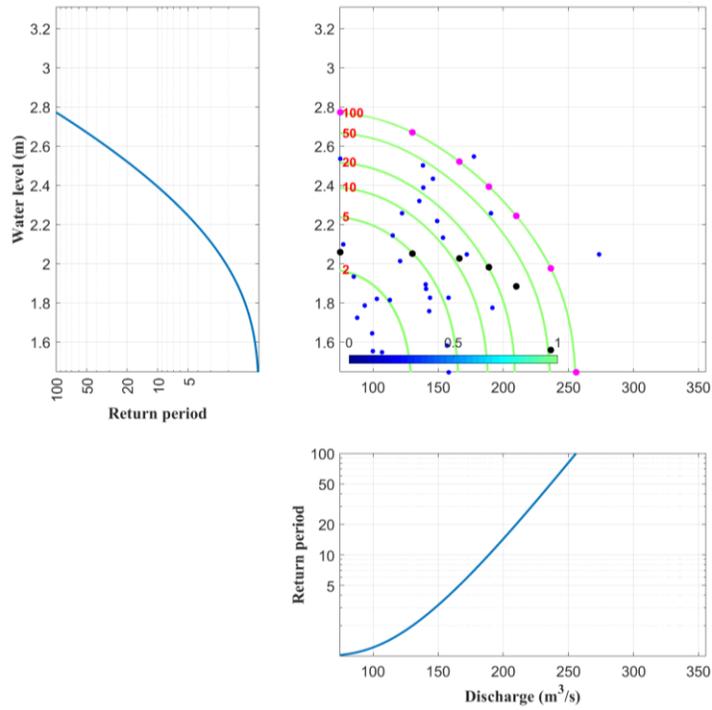


Figure 23. Semblable à Figure 21 mais pour la rivière Petit-Saguenay.

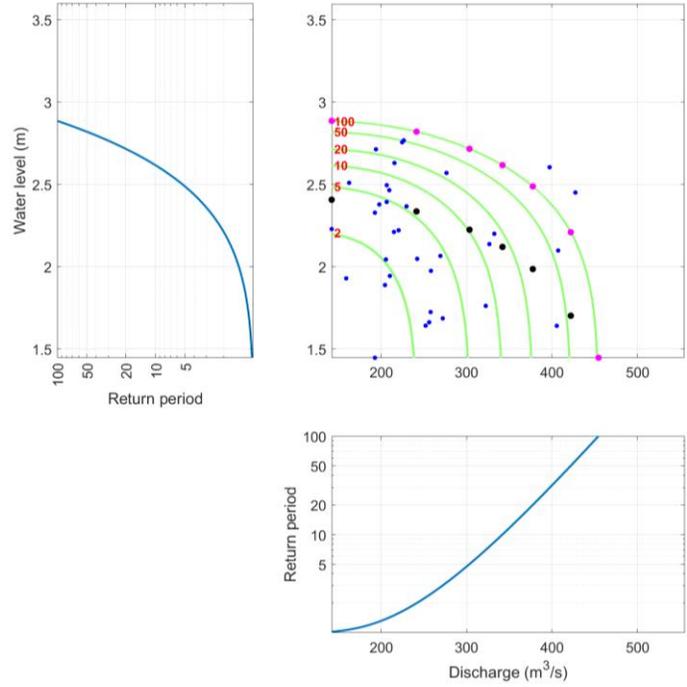


Figure 24. Semblable à Figure 21 mais pour la **rivière Mitis**.

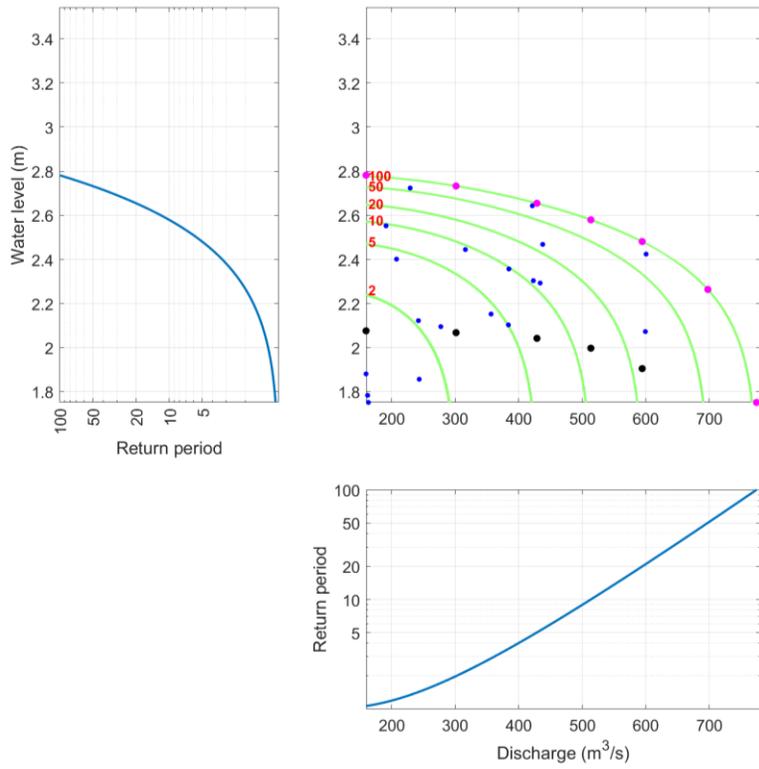


Figure 25. Semblable à Figure 21 mais pour la **Petite rivière Cascapédia**.

Les scénarios Q-H associés à la série $Q_{cond}WLRM$ sont présentés au Tableau 8 et visualisés aux Figure 26 et Figure 30. Comme dans le cas de $WLRM_{cond}Q$, l'impact du rehaussement marin diminue du scénario 1 à 7, lorsque l'importance des niveaux d'eau dans les paires Q-H diminuent. L'effet du rehaussement marin est plus prononcé dans ces 7 scénarios que dans les 7 scénarios précédents (comparaison des Figures 21 à 25 avec 26 à 30), ce qui est attendu puisqu'il s'agit des niveaux d'eau maximums annuels pour la période historique, auxquels le rehaussement marin a été ajouté.

Tableau 8. Scénarios niveau-débit basés sur la série $Q_{cond}WLRM$ pour une probabilité au dépassement de 1% pour les embouchures sélectionnées du LOT2.

| | <u>Scénario 1</u> | | <u>Scénario 2</u> | | <u>Scénario 3</u> | | <u>Scénario 4</u> | | <u>Scénario 5</u> | | <u>Scénario 6</u> | | <u>Scénario 7</u> | |
|--------------------------|-------------------|-----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|----------|-------------------|-------|-------------------|-------|-------------------|-----------|
| | \hat{Q} | H_{100} | Q_2 | H_{50} | Q_5 | H_{20} | Q_{10} | H_{10} | Q_{20} | H_5 | Q_{50} | H_2 | Q_{100} | \hat{H} |
| Chaudière | 21.0 | 5.72 | 161.9 | 5.56 | 499.6 | 5.34 | 821.2 | 5.17 | 1173.5 | 5.0 | 1667.6 | 4.78 | 2055.4 | 4.44 |
| au Renard | 0.23 | 2.52 | 0.9 | 2.48 | 2.37 | 2.42 | 4.2 | 2.35 | 7 | 2.26 | 13.11 | 2.1 | 20.7 | 1.9 |
| Petit-Saguenay | 2.7 | 2.93 | 11.0 | 2.91 | 22.4 | 2.87 | 31.2 | 2.83 | 40.3 | 2.77 | 52.6 | 2.65 | 62.1 | 2.52 |
| Mitis | 3.9 | 3.46 | 22.2 | 3.37 | 49.3 | 3.26 | 74.3 | 3.17 | 102.8 | 3.1 | 144.9 | 2.96 | 179.3 | 2.77 |
| Petite-Cascapédia | 6.36 | 3.3 | 20.1 | 3.25 | 52.2 | 3.16 | 94.2 | 3.1 | 162.1 | 3.0 | 320.1 | 2.88 | 527.3 | 2.61 |

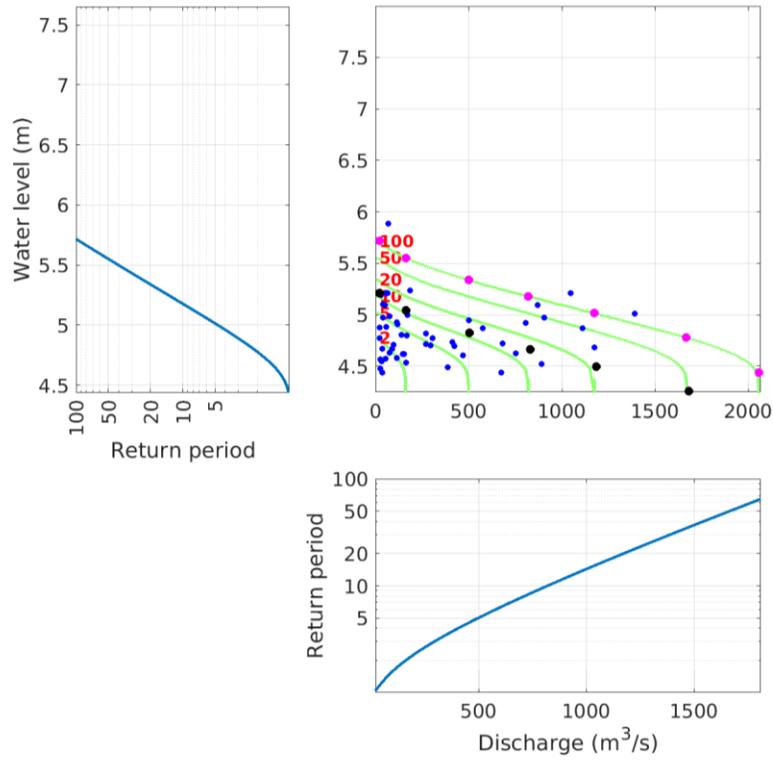


Figure 26. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{\text{cond}}\text{WLRM}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de **100 ans** à l'exutoire de la **rivière Chaudière (horizon temporel de 2070)**. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{\text{cond}}\text{WL}$ avec une période de retour de 100 ans en climat actuel.

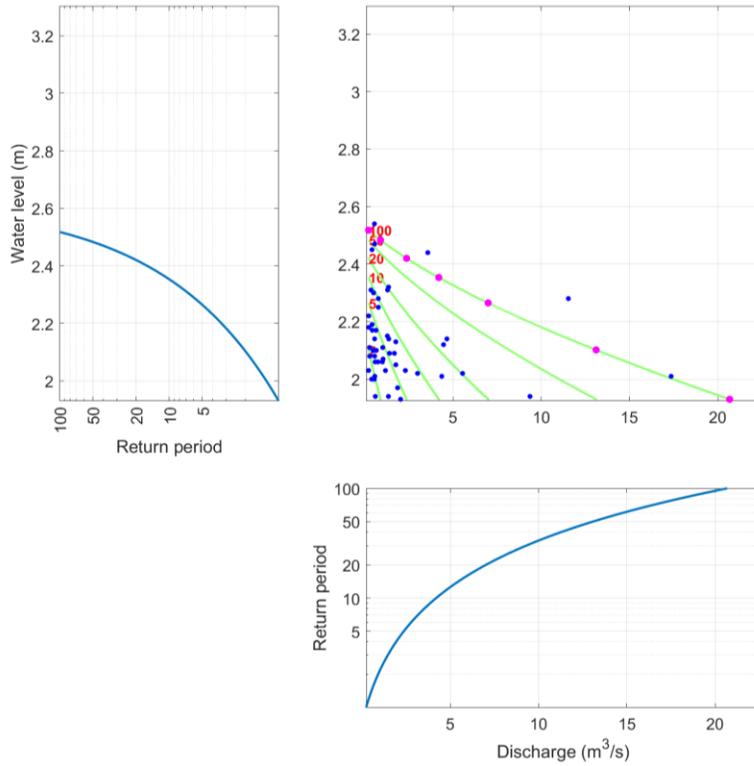


Figure 27. Semblable à Figure 26 mais pour la **rivière au Renard**.

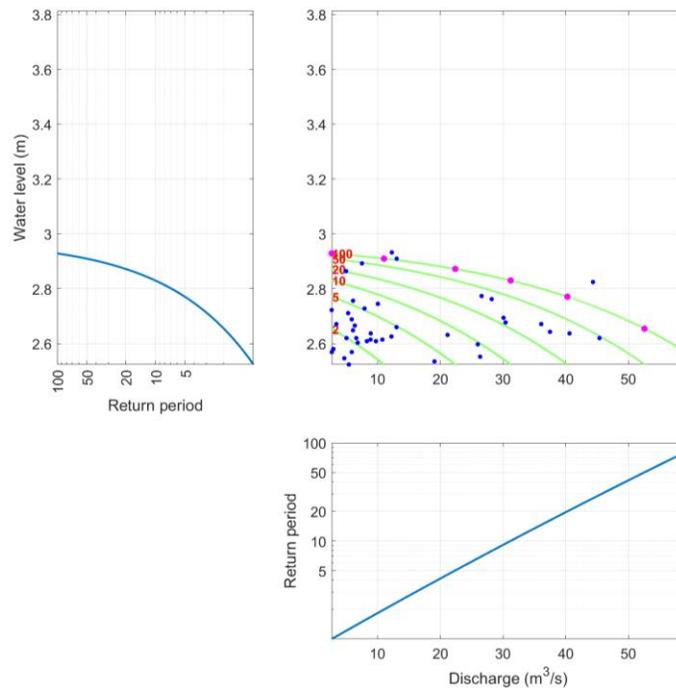


Figure 28. Semblable à Figure 26 mais pour la **rivière Petit Saguenay**.

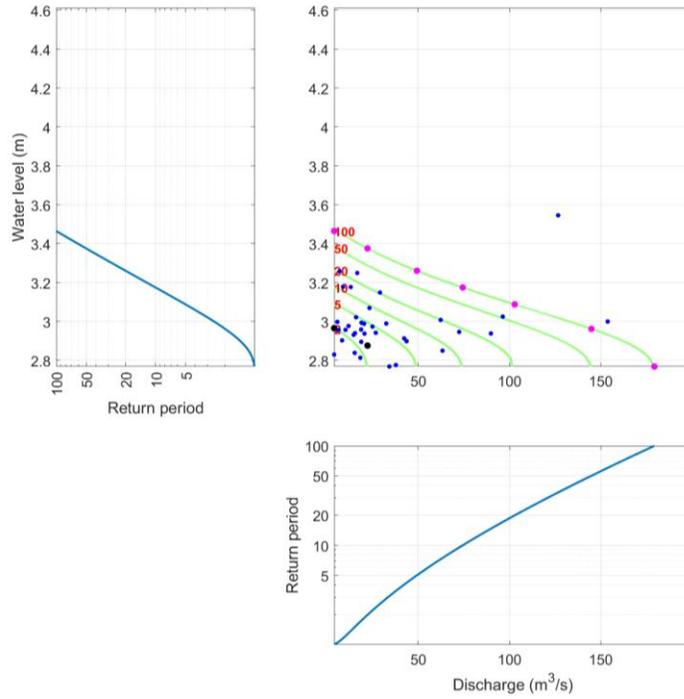


Figure 29. Semblable à Figure 26 mais pour la **rivière Mitis**.

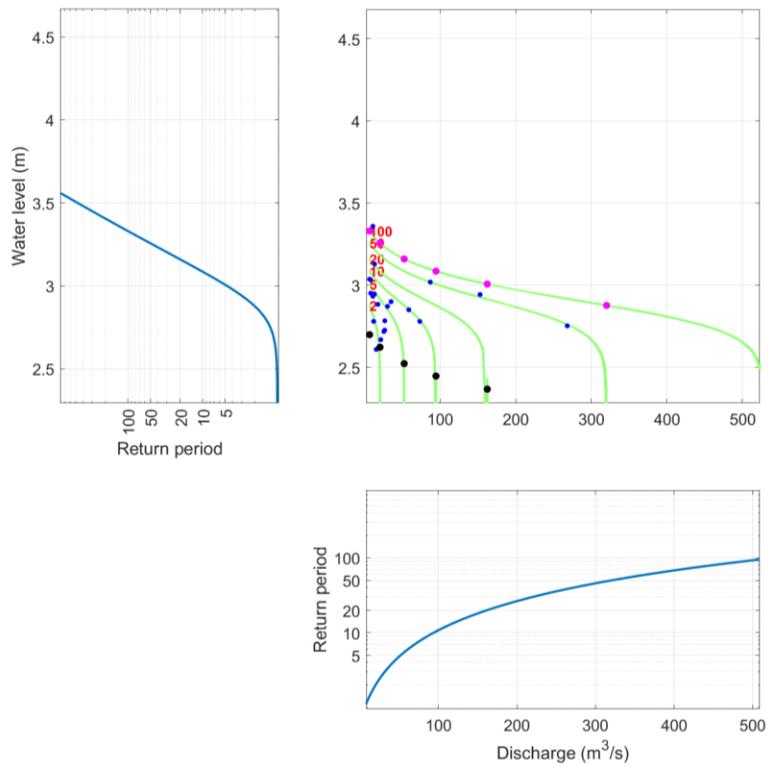


Figure 30. Semblable à Figure 26 mais pour la **Petite rivière Cascapédia**.

6. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS POUR LES TRAVAUX FUTURS

Le présent rapport est le deuxième livrable du projet d'analyse statistique des événements conjoints dans un contexte de rehaussement marin. La méthodologie développée dans la phase 1 du projet a été appliquée pour étudier les crues conjointes aux exutoires des rivières du LOT 2, soit les rivières **Chaudière, Saint-Charles, Montmorency, du Sud, du Gouffre, Ha! Ha!, Petit Saguenay, Mitis, Matane, aux Outardes, au Renard, York, Ristigouche et Petite-Cascapédia**. Comme pour les exutoires du LOT 1, la corrélation entre les paires d'extrêmes débit-niveau d'eau pour les exutoires du LOT 2 se sont avérées non-significatives pour l'ensemble des embouchures. Par conséquent, la copule indépendante a été choisie pour déterminer la période de retour des événements simultanés (scénario AND). La méthodologie proposée se veut une extension de l'approche utilisée aux États-Unis par la FEMA pour cartographier les zones inondables en milieu maritime. Cette extension se justifie par deux principaux arguments :

1- L'analyse statistique bivariée basée sur la copule (même indépendante) permet de mieux comprendre et d'explorer les interactions entre des événements moins extrêmes, mais survenant au même moment et dont la probabilité conjointe est la même que l'évènement extrême univarié.

2- L'impact du rehaussement marin sur ces crues conjointes moins extrêmes peut être plus explicitement étudié, dans le but de déterminer l'amplification de la fréquence des événements conjoints dans le futur par rapport à la période historique.

Cette analyse fréquentielle bivariée a été effectuée sur deux séries de paires débit-niveau d'eau conjoints, soient $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$, chacune basée sur les maxima annuels d'une variable et les maximums correspondants de l'autre variable dans un intervalle de ± 1 jour. Cette approche permet de couvrir les crues conjointes dominées par les débits ou par les niveaux d'eau qui surviennent souvent à des moments différents de l'année. De plus, les scénarios Q-H proposés incluent les combinaisons de débit et de niveau d'eau recommandées par la FEMA.

La comparaison entre les débits-niveaux d'eau associés aux crues conjointes de 100 ans en période actuelle et en considérant l'impact du rehaussement marin en 2070 a été réalisée. Les rivières situées en Gaspésie s'avèrent les plus sensibles, notamment en

raison d'un affaissement des sols à cet endroit dans les décennies à venir (ajustement isostatique négatif). Toutefois, le rehaussement marin amplifie de manière importante les niveaux d'eau extrêmes pour l'ensemble des exutoires étudiés, mettant en évidence la nécessité de prendre en compte ce phénomène dans l'évaluation des inondations pour les régions côtières.

6.1 Principales sources d'incertitude et recommandations pour des travaux futurs

Contrairement aux exutoires fournis pour le LOT 1 du projet, plusieurs hypothèses ont dû être posées afin de pouvoir fournir des résultats pour les rivières comprises dans le LOT 2, puisque les régions étudiées sont relativement pauvres en données d'observation de niveau d'eau. En particulier, nous notons les points suivants :

1. Il n'existe que trois marégraphes actifs à proximité des rivières d'intérêt pour le projet. Comme la méthodologie proposée nécessite des séries chronologiques de niveaux d'eau, celles-ci ont dû être estimées et reconstruites aux exutoires des rivières Mitis, Matane, aux Outardes, York, Petite-Cascapedia et Ristigouche. Ces reconstructions sont notamment sujettes à l'incertitude qui provient de la superposition de la marée harmonique tirée de TPXO à la surcote et la composante non harmonique extraite de la station la plus près. La comparaison de deux bases de données de marées estimées (TPXO et TideHarmonics) montre que le 50^e centile des différences est proche de zéro, mais qu'il existe des différences d'amplitude et de phase entre les deux. On note aussi que les deux bases de données fournissent une estimation de la marée et que l'utilisation d'autres bases de données, telles que celle maintenue par MPO, pourrait permettre de mieux circonscrire l'incertitude associée à cette estimation de la marée harmonique.
2. Pour l'exutoire de la rivière Petit Saguenay, l'estimation du niveau d'eau est une interpolation linéaire du niveau d'eau entre les stations de Port-Alfred et de Tadoussac. Cette transformation est justifiée du fait que la pente hydraulique du Saguenay est très faible, mais, même si les maximums journaliers ont été utilisés pour l'interpolation, la méthodologie pourrait omettre certains événements ou ne pas prendre en compte des effets non-linéaires.
3. Une autre source d'incertitude provient de l'absence de projection du rehaussement marin pour les exutoires situés dans la rivière Saguenay. Dans ce

- projet, le rehaussement marin estimé à l'embouchure de la rivière Saguenay a été utilisé tel quel pour les rivières Petit Saguenay et Ha! Ha!. Toutefois, cette hypothèse ne prend pas compte des différences d'ajustement isostatique le long du fjord, ni d'une possible atténuation du rehaussement marin par la pente hydraulique. Cette estimation peut donc être considérée comme "conservatrice".
4. Également en lien avec le rehaussement marin, comme discuté pour les exutoires dans le secteur fluvial du LOT 1, les simulations produites avec le modèle de MPO incluent l'effet du rehaussement marin à la condition limite aval du modèle (Saint-Joseph-de-la-Rive), mais ne tiennent pas compte des changements possibles dans les conditions météorologiques, ainsi que des changements dans les débits du fleuve Saint-Laurent ou de ses affluents. L'évaluation des crues conjointes futures dans le scénario de rehaussement marin devrait également être basée sur la projection du débit des rivières pour l'horizon temporel futur visé, ce qui n'a pas été fait dans cette étude.
 5. Finalement, la significativité de la corrélation dans les paires débit-niveau d'eau conjoint ($WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$) est déterminée en utilisant la corrélation de Kendall (τ) sur le jeu donné complet. Une approche similaire a été utilisée par Ghanbari et al. (2021) et Moftakhari et al. (2019). Toutefois, une étude récente (Ganguli & Merz, 2019) souligne que l'utilisation de l'échantillon complet peut sous-estimer la corrélation pour les extrêmes et suggère plutôt d'évaluer la corrélation avec une métrique mieux adaptée à la queue de la distribution, tel que *Capéraá-Fougères-Genest*. Ceci pourrait être étudié dans des travaux futurs afin de valider l'utilisation de copules indépendantes dans l'évaluation des crues conjointes.

Par conséquent, s'il s'avérait que la zone inondable de l'une ou plusieurs des rivières du LOT 2 soit particulièrement sensible aux niveaux d'eau, il serait souhaitable de pousser davantage l'analyse à ces exutoires afin d'estimer l'impact des différentes hypothèses appliquées ici.

RÉFÉRENCES

- [1] “Guidance for FEMA’s Risk Mapping, Assessment and Planning (Guidance Combined Coastal and Riverine Floodplain),” Dec. 2020. Accessed: Dec. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.fema.gov/media-collection/guidance-femas-risk-mapping-assessment-and-planning>.
- [2] H. Mofstakhari, J. E. Schubert, A. AghaKouchak, R. A. Matthew, and B. F. Sanders, “Linking statistical and hydrodynamic modeling for compound flood hazard assessment in tidal channels and estuaries,” *Adv. Water Resour.*, vol. 128, pp. 28–38, Jun. 2019, doi: 10.1016/J.ADVWATRES.2019.04.009.
- [3] H. R. Mofstakhari, G. Salvadori, A. AghaKouchak, B. F. Sanders, and R. A. Matthew, “Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 114, no. 37, pp. 9785–9790, Sep. 2017, doi: 10.1073/PNAS.1620325114/-/DCSUPPLEMENTAL.
- [4] M. Ghanbari, M. Arabi, S. C. Kao, J. Obeysekera, and W. Sweet, “Climate Change and Changes in Compound Coastal-Riverine Flooding Hazard Along the U.S. Coasts,” *Earth’s Futur.*, vol. 9, no. 5, p. e2021EF002055, May 2021, doi: 10.1029/2021EF002055.
- [5] P. Zhao, H. Lü, G. Fu, Y. Zhu, J. Su, and J. Wang, “Uncertainty of Hydrological Drought Characteristics with Copula Functions and Probability Distributions: A Case Study of Weihe River, China,” *Water 2017, Vol. 9, Page 334*, vol. 9, no. 5, p. 334, May 2017, doi: 10.3390/W9050334.
- [6] P. Ai, D. Yuan, and C. Xiong, “Copula-Based Joint Probability Analysis of Compound Floods from Rainstorm and Typhoon Surge: A Case Study of Jiangsu Coastal Areas, China,” *Sustain. 2018, Vol. 10, Page 2232*, vol. 10, no. 7, p. 2232, Jun. 2018, doi: 10.3390/SU10072232.
- [7] D. Lefavre, A. D’Astous, and P. Matte, “Hindcast of Water Level and Flow in the St. Lawrence River Over the 2005–2012 Period,” <https://doi.org/10.1080/07055900.2016.1168281>, vol. 54, no. 3, pp. 264–277, May 2016, doi: 10.1080/07055900.2016.1168281.
- [8] N. B. Bernier and K. R. Thompson, “Deterministic and ensemble storm surge prediction for Atlantic Canada with lead times of hours to ten days,” *Ocean Model.*, vol. 86, pp. 114–127, Feb. 2015, doi: 10.1016/J.OCEMOD.2014.12.002.
- [9] G. D. . Egbert and S. Y. . Erofeeva, “Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides,” *J. Atmos. Ocean Technol.*, vol. 19, no. 2, pp. 183–204, 2002, Accessed: Dec. 20, 2021. [Online]. Available: https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/19/2/1520-0426_2002_019_0183_eimobo_2_0_co_2.xml.
- [10] N. Beck, C. Genest, J. Jalbert, and M. Mailhot, “Predicting extreme surges from sparse data using a copula-based hierarchical Bayesian spatial model,” *Environmetrics*, vol. 31, no. 5, p. e2616, Aug. 2020, doi: 10.1002/ENV.2616.
- [11] M. Sadegh *et al.*, “Multihazard Scenarios for Analysis of Compound Extreme Events,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 45, no. 11, pp. 5470–5480, Jun. 2018, doi: 10.1029/2018GL077317.
- [12] T. S. James, C. Robin, J. A. Henton, and M. Craymer, “Relative sea-level projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG national crustal velocity model,” 2021. doi: 10.4095/327878.

- [13] T. H. J. Hermans, J. M. Gregory, M. D. Palmer, M. A. Ringer, C. A. Katsman, and A. B. A. Slangen, "Projecting Global Mean Sea-Level Change Using CMIP6 Models," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 48, no. 5, p. e2020GL092064, Mar. 2021, doi: 10.1029/2020GL092064.
- [14] A. J. Payne *et al.*, "Future Sea Level Change Under Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 and Phase 6 Scenarios From the Greenland and Antarctic Ice Sheets," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 48, no. 16, p. e2020GL091741, Aug. 2021, doi: 10.1029/2020GL091741.
- [15] E. Bevacqua *et al.*, "Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change," *Sci. Adv.*, vol. 5, no. 9, Sep. 2019, doi: 10.1126/SCIADV.AAW5531/SUPPL_FILE/AAW5531_SM.PDF.
- [16] P. Ganguli and B. Merz, "Extreme Coastal Water Levels Exacerbate Fluvial Flood Hazards in Northwestern Europe," *Sci. Reports 2019 91*, vol. 9, no. 1, pp. 1–14, Sep. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-49822-6.

Annexe A

Les résultats de l'analyse fréquentielle univariée et bivariée (pour 2, 100 et 350 ans) effectuée à chacun des exutoires sont formatés dans un fichier *.mat* suivant la nomenclature *période_serie_nom-de-l'exutoire.mat* où période = {historique, futur} et série = {WLcondQ, QcondWL}.

Une description détaillée de la structure :

```

---period -----> {historic, future}
---Univariate
  |--serie -----> {WLcondQ, QcondWL}
  |--Q -----> La distribution ajustée (débit)
  |--H -----> La distribution ajustée (niveau d'eau)
  |--Q_Paramci -----> L'intervalle de confiance (95%) de(s) paramètre(s) de la distribution ajustée
  |--H_Paramci -----> L'intervalle de confiance (95%) de(s) paramètre(s) de la distribution ajustée
  |--RPH_Values -----> une matrice 3*7 contenant le niveau d'eau de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans associés
aux 5e (1er ligne), 50e (2e ligne) et 95e (3e ligne) percentiles
  |--RPQ_Values -----> une matrice 3*7 contenant le débit de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans associés aux 5e
(1er ligne), 50e (2e ligne) et 95e (3e ligne) percentiles
  |--RPQ_Names -----> {Q2, Q5, Q10, Q20, Q50, Q100, Q350}
  |--RPH_Names -----> {H2, H5, H10, H20, H50, H100, H350}
---Bivariate
  |--CopulaType -----> {Dépendant, Indépendant}
  |--serie -----> {WLcondQ, QcondWL}
  |--DesVarValues
  |   |--RP2
  |   |   |--desvarnames -----> {Q*, H2, Q1.2, H1.7, Q1.4, H1.4, Q1.7, H1.2, Q2, H*}
  |   |   |--Copula_pars -----> Le(s) paramètre(s) de la fonction copule choisie
  |   |   |--selected_copula -----> Le nom de la fonction copule choisie
  |   |   |--QH_Design -----> Les paires de débit-niveau d'eau correspondant soit aux 5 scénarios
choisis (indépendant) ou à la combinaison la plus probable (dépendant)
  |   |--RP100
  |   |   |--desvarnames -----> {Q*, H100, Q2, H50, Q5, H20, Q10, H10, Q20, H5, Q50, H2, Q100, H*}
  |   |   |--Copula_pars -----> Le(s) paramètre(s) de la fonction copule choisie
  |   |   |--selected_copula -----> Le nom de la fonction copule choisie
  |   |   |--QH_Design -----> Les paires de débit-niveau d'eau correspondant soit aux 7 scénarios choisis
(indépendant) ou à la combinaison la plus probable (dépendant)
  |   |--RP350
  |   |   |--desvarnames -----> {Q*, H350, Q3.74, H93.54, Q9.35, H37.42, Q18.71, H18.71, Q37.42, H9.35, Q93.54, H3.74, Q350, H*}
  |   |   |--Copula_pars -----> Le(s) paramètre(s) de la fonction copule choisi
  |   |   |--selected_copula -----> Le nom de la fonction copule choisi
  |   |   |--QH_Design -----> Les paires de débit-niveau d'eau correspondant soit aux 7 scénarios choisis
(indépendant) ou à la combinaison la plus probable (dépendant)

```



550 SHERBROOKE OUEST, TOUR OUEST, 19^e ÉTAGE, MONTRÉAL, QC, CANADA, H3A 1B9 | TÉLÉPHONE 514 282.6464 | TÉLÉCOPIEUR 514 282.7131 | WWW.OURANOS.CA

