



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 LOT1
Septembre 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 LOT1
Septembre 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., Carron,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*. Rapport présenté à Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 55 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	8
3.1 Les bases de données débits et niveau d'eau.....	8
3.2 Sélection des niveaux d'eau et débits affluents extrêmes	10
3.3 Analyse d'événements de crues conjoints par copules	11
3.3.1 MhAST : Une librairie MATLAB pour l'analyse d'événements conjoints basé sur la méthode copule	14
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 ..	19
4.3 Analyse des évènements extrêmes conjoints.....	21
5. Analyse de l'effet du rehaussement marin sur les inondations conjointes.....	29
5.1 Les scénarios de rehaussement marin.....	29
5.2 Analyse d'événements extrêmes conjoints dans le contexte de rehaussement marin ..	35
6. Conclusion	44
Références	46
Annexe A	48

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation des exutoires du LOT 1 du projet (carré noir) ainsi que les stations marégraphiques à proximité (en mauve). Source : Observatoire global du Saint-Laurent, https://ogsl.ca/conditions/?lg=fr .	9
Figure 2. Série temporelle de niveaux d'eau (pas de temps 1h) à la station de Port-Alfred de 1975 à 2019.	10
Figure 3. Scénario <i>AND</i> dans une analyse conjointe débit-niveau d'eau. Les cercles noirs représentent le débit et les niveaux d'eau extrêmes et la zone grise illustre le domaine de sélection des extrêmes retenus dans la distribution conjointe. Modifié de [3].	13
Figure 4. Séries temporelles des niveaux d'eaux à l'embouchure des rivières (pas de temps de 15 minutes pour Sainte-Anne, Jacques-Cartier et Etchemin; pas de temps horaire pour à Mars). Les maximums annuels sont identifiés par des cercles rouges	16
Figure 5. Séries temporelles des débits journaliers aux rivières du LOT1. Les maximums annuels sont identifiés par des cercles rouges.	17
Figure 6. Probabilité d'occurrence mensuelle des maximums annuels du niveau d'eau (bleu) et de débit (rouge) pour les exutoires du LOT1.	20
Figure 7. Coefficients de corrélation de Mann-Kendall (τ) et Spearman (ρ) entre les débits maximums annuels et les niveaux d'eau maximums dans un intervalle de ± 1 jour aux exutoires du LOT 1. La ligne pointillée représente la limite de confiance de 95 %.	20
Figure 8. Nuage de points montrant les débits maxima annuels (axe X) et les niveaux d'eau maximums (axe Y) correspondant dans un intervalle de ± 1 jour aux exutoires du LOT1. Les lignes continues représentent la régression linéaire ajustée aux données.	21
Figure 9. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire Sainte-Anne, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.	23
Figure 10. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire Jacques-Cartier, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.	24
Figure 11. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire Etchemin, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.	24
Figure 12. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire À Mars, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.	25
Figure 13. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{cond}WL$ à l'exutoire Sainte-Anne, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.	26
Figure 14. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{cond}WL$ à l'exutoire Jacques-Cartier, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.	27
Figure 15. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{cond}WL$ à l'exutoire Etchemin, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.	27
Figure 16. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{cond}WL$ à l'exutoire à Mars, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.	28

Figure 17. Les niveaux d'eau à la station Port-Alfred (axe Y) par rapport à la station Tadoussac (axe X) pour la période 1975-1990 ainsi que la régression linéaire (ligne rouge).	32
Figure 18. Taux de soulèvement et d'affaissement des terres (mm par an) à partir du modèle NAD83V70VG. Les emplacements approximatifs des exutoires de la rivière Saguenay et de la rivière à Mars sont indiqués par des cercles rouges. Modifié après [14].	34
Figure 19. Comparaison du niveau d'eau extrême dans le scénario rehaussement marin (rouge), par rapport au scénario de référence (bleu).	36
Figure 20. Les coefficients de corrélation de Kendall (τ) et Spearman (ρ) entre les variables de la série $WL_{50cm_{cond}Q}$. La ligne pointillée représente la limite de confiance de 95%.	37
Figure 21. Isolignes des crues conjointes pour $WL_{50cm_{cond}Q}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire Sainte-Anne. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$	39
Figure 22. Isolignes des crues conjointes pour $WL_{50cm_{cond}Q}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire Jacques-Cartier. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$	39
Figure 23. Isolignes des crues conjointes pour $WL_{50cm_{cond}Q}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire Etchemin. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$	40
Figure 24. Isolignes des crues conjointes pour $WL_{50cm_{cond}Q}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire à Mars. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$	40
Figure 25. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{cond}WL_{50cm}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire Sainte-Anne. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{cond}WL$	42
Figure 26. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{cond}WL_{50cm}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire Jacques-Cartier. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{cond}WL$	42
Figure 27. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{cond}WL_{50cm}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire Etchemin. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{cond}WL$	43
Figure 28. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{cond}WL_{50cm}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire à Mars. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{cond}WL$	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des exutoires visées pour le LOT1 et LOT2 du projet.....	6
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.	14
Tableau 3. Paramètres de la meilleure distribution ajustée à la série temporelle de niveaux d'eau et de débits maxima annuels aux embouchures des rivières du LOT1. Les valeurs entre parenthèses montrent l'intervalle de confiance à 95%.	17
Tableau 4. Niveaux d'eau extrêmes (m) pour différentes périodes de retour, avec leur intervalle de confiance à 95%, aux embouchures des rivières du LOT1.	18
Tableau 5. Débits extrêmes (m ³ /s) pour différentes périodes de retour, avec leur intervalle de confiance à 95 %, aux embouchures des rivières du LOT1.	18
Tableau 6. Paramètres de la distribution ajustée aux séries de $Q_{cond}WL$ et $WL_{cond}Q$	22
Tableau 7. Scénarios niveau-débit pour la série $WL_{cond}Q$, pour une probabilité au dépassement de 1%.	23
Tableau 8. Scénarios niveau-débit pour la série $Q_{cond}WL$, pour une probabilité au dépassement de 1%.	26
Tableau 9. Le rehaussement marin (en cm) projeté à Saint-Joseph-de-la-Rive pour différents RCP et horizons temporels [14].	30
Tableau 10. Le rehaussement marin (en cm) estimé à l'embouchure de la rivière Saguenay en différents RCP et horizons temporels [14].	33
Tableau 11. Paramètres de la distribution ajustée à la variable conditionné de la série ($WI50cm_{cond}Q$).....	38
Tableau 12. Scénarios niveau-débit basés sur la série $WL50cm_{cond}Q$ pour une probabilité au dépassement de 1% à l'exutoire Sainte-Anne, Jacques-Cartier, Etchemin, et À Mars*.	38
Tableau 13. Scénarios niveau-débit basés sur la série $Q_{cond}WL50cm$ pour une probabilité au dépassement de 1% à l'exutoire Sainte-Anne, Jacques-Cartier, Etchemin et À Mars*.	41

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
WL50cm_{cond}Q	La série de niveaux d'eau maximums pour le scénario rehaussement marin 50 cm dans un intervalle de ± 1 jour des débits maximums annuels
Q_{cond}WL50cm	La série de débits maximums annuels dans un intervalle de ± 1 jour des niveaux d'eau maximums pour le scénario de rehaussement marin de 50 cm

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 dans l'horizon actuel et futur, 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 est basée sur une analyse statistique du débit et des niveaux d'eau extrêmes et sur la corrélation entre ceux-ci. La sélection des paires extrêmes débit-niveau d'eau est basée sur les maxima annuels d'une variable (débit ou niveau d'eau) et la valeur maximale de la variable conditionnée (niveau d'eau/débit) dans un intervalle de ± 1 jour. Une analyse statistique bivariable par copules est utilisée pour décrire la structure de corrélation entre le niveau d'eau du fleuve et le débit affluent. La sélection de la meilleure fonction de copule parmi 25 fonctions testées est basée sur le critère BIC (*Bayesian Information Criterion*), pour lequel la complexité de la fonction et le nombre d'observations sont pris en compte. La fonction de copule sélectionnée est ensuite 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). Alors que la méthode de la copule est souvent utilisée dans les cas où il existe une corrélation significative entre les variables à l'étude, elle est également applicable pour les variables non corrélées, où une fonction de copule spécifique, appelée copule indépendante, est utilisée pour décrire la probabilité d'occurrence d'un événement de crue conjoint causé par deux variables non corrélées. Dans ces cas, la distribution cumulative de la copule indépendante est simplement définie comme le produit de la fonction de distribution cumulative des variables. La période de retour (isoligne) dérivée par la fonction de copule se compose de plusieurs paires débit-niveau d'eau avec une probabilité d'occurrence conjointe identique. Nous proposons 7 paires de débit (Q) – niveau d'eau (H) le long de la courbe isoligne conjointe afin d'exécuter le modèle hydraulique avec les conditions limites extrêmes. 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 pouvant survenir au même moment.

Considérant l'absence de corrélation entre les extrêmes pour toutes les rivières analysées jusqu'à maintenant, deux séries de scénarios débit-niveau d'eau, basé sur la copule indépendante et chacun portant sur l'occurrence de maximums annuels d'une variable et les maximums d'autre sur un intervalle de ± 1 jour, sont donc proposées pour les quatre rivières à l'étude. Des scénarios similaires sont également proposés en climat futur, en considérant un rehaussement marin de 50 cm dans le golfe du Saint-Laurent. Les résultats montrent que les corrélations demeurent non significatives autant pour le climat actuel que le futur. Ces scénarios peuvent être utilisés comme intrants dans le modèle hydraulique pour délimiter la zone inondable correspondant aux exutoires des rivières.

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. Un deuxième projet, fera une analyse plus en profondeur et inclura certains aspects qui seront négligés dans cette étude. Les résultats obtenus dans cette première étude pourront aussi servir de base de référence pour ce deuxième projet, dans lequel une méthodologie plus complexe sera développée.

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 première 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 affectée par l'ampleur du débit d'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 23 exutoires de rivières identifiées dans le projet INFO-Crue (voir le Tableau 1 pour la liste des rivières) et de fournir les données nécessaires afin que la DEH puisse 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 [1] » 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 [2]. 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 non extrême correspondant en moyenne à des marées hautes.

2- La condition limite amont est forcée par un débit non extrême (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 où le débit et le niveau d'eau extrêmes 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 extrême et le débit de la rivière n'est pas prise en compte. 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 peut

être le produit de conditions aux limites moins extrêmes, qui ne font pas partie des simulations suggérées dans la méthode FEMA.

Tableau 1. Liste des exutoires visées pour le LOT1 et LOT2 du projet.

Rivière	Échéancier	Exutoire du BV
Etchemin	LOT 1 Juin 2021	Fleuve aval
Jacques-Cartier		Fleuve aval
à Mars		Saguenay
Sainte-Anne		Fleuve aval
Petite Rivière Cascapédia	LOT 2 Décembre 2021	Baie-des-Chaleurs
du Gouffre		Estuaire moyen
Mitis		Estuaire maritime
Montmorency		Fleuve aval
Petit Saguenay		Saguenay
Au Renard		Golfe
Ristigouche		Baie-des-Chaleurs
Saint-Jean		Saguenay
York		Golfe
Chaudière		Fleuve aval
Chicoutimi		Saguenay
Ha! Ha!		Saguenay
Matane		Estuaire maritime
du Moulin		Saguenay
aux Outardes		Estuaire maritime
aux Sables		Saguenay
Saguenay		Estuaire limite maritime
Saint-Charles		Fleuve aval
du Sud		Estuaire moyen

Pour adresser ces lacunes, une analyse statistique bivariée basée sur la méthode de copule est proposée [2]. Alors que cette approche a souvent été utilisée pour l'analyse de l'effet conjoint des variables corrélées [3]–[6], la méthode est également applicable pour les systèmes non corrélés en utilisant un type spécifique de fonction de copule appelé « copule indépendante » et 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 (*Baysian Criteria Inference*). Pour les exutoires ayant une corrélation non-significative entre le niveau d'eau (H) et les débits extrêmes (Q), on utilise la copule indépendante pour déterminer les isolignes associées à un événement conjoint de T ans (analyse fréquentielle bivariée). Contrairement aux copules où 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 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. Cette méthodologie est donc une extension de celle proposée par [2] pour le cas des inondations conjointes aux exutoires ayant des niveaux d'eau et des débits non-corrélés, en utilisant la copule indépendante. Plus de détails sur la méthodologie utilisée se trouvent au chapitre 3.

Ce rapport présente les résultats pour les exutoires fluviaux du LOT1 du projet, soit **Sainte-Anne, Etchemin, Jacques-Cartier, et à Mars**. Les résultats pour les exutoires de la deuxième phase du projet feront l'objet d'un rapport subséquent.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1 Les bases de données débits et niveau d'eau

Tel que discuté à la section précédente, un événement de crue conjoint a deux composantes : 1) la composante fluviale, ou le débit affluent, et 2) la composante côtière, ou le niveau du cours d'eau en aval. Dans ce projet, l'analyse de la composante fluviale de la crue conjointe est basée sur les valeurs de débits journaliers simulés pour la période 1968-2019 (fournies par la DEH). Cette base de données a été utilisée pour faire l'analyse fréquentielle univariée des débits et également pour identifier les paires de Q-H extrêmes dans l'analyse statistique bivariée. Idéalement, nous utiliserions le débit observé à chacun des exutoires, mais il existe des lacunes importantes dans les observations. Pour la composante côtière, à l'exception de la rivière à Mars, les stations marégraphiques se situent relativement loin des exutoires visés, comme le montre la Figure 1, ce qui réduit leur représentativité quant à la dynamique des niveaux d'eau du fleuve à l'exutoire des rivières. Pour surmonter ce problème, nous avons étudié la possibilité d'utiliser le niveau d'eau simulé par des modèles océaniques à base-physique dans des études régionales ([3],[4]) et globales [9]. Cependant, ces différentes bases de données ne couvrent ni les trois exutoires (Sainte-Anne, Jacques-Cartier, et Etchemin) situés dans le tronçon fluvial du fleuve Saint-Laurent, ni les exutoires situés dans la rivière Saguenay. Même si cela avait été le cas, leur représentativité aurait été à déterminer pour les régions à l'étude.

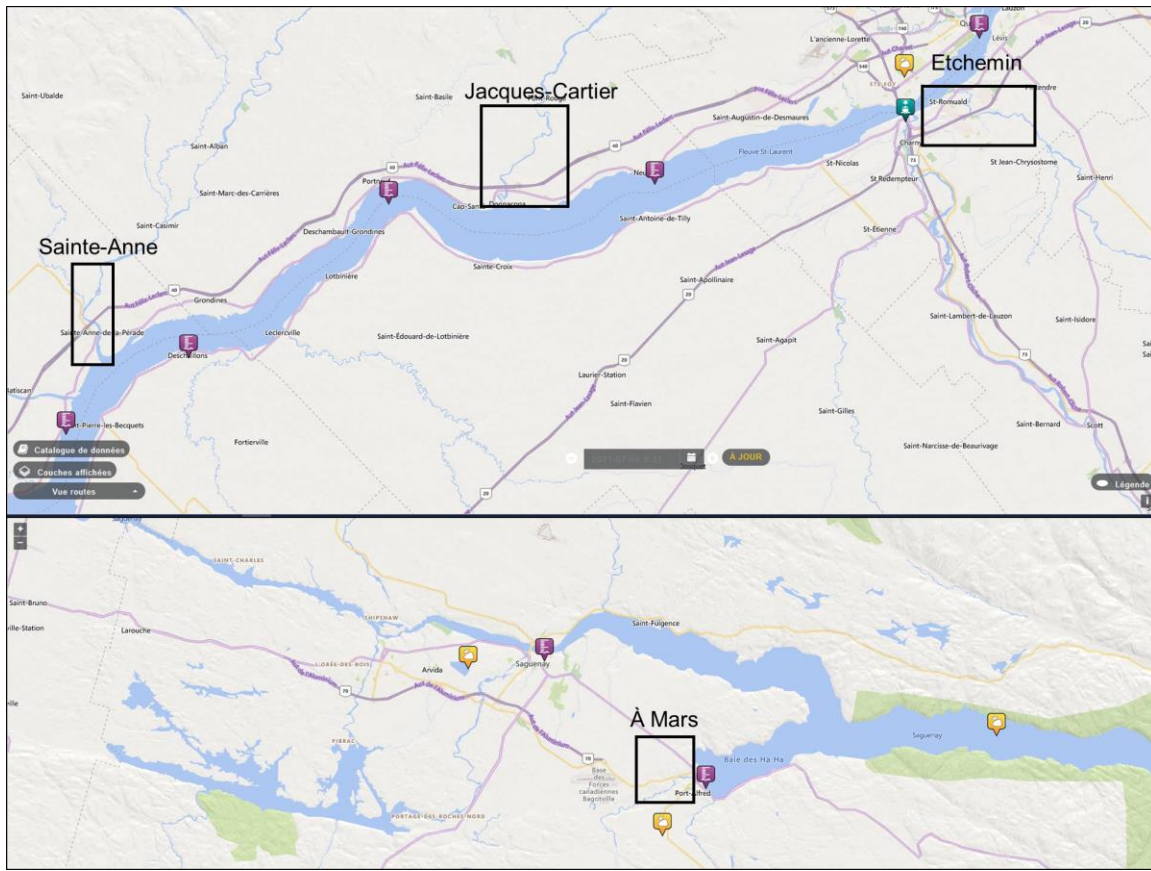


Figure 1. Localisation des exutoires du LOT 1 du projet (carré noir) ainsi que les stations marégraphiques à proximité (en mauve). Source : Observatoire global du Saint-Laurent, <https://ogsl.ca/conditions/?lg=fr>.

Par conséquent, pour les données de niveau d'eau aux exutoires des rivières Sainte-Anne, Jacques-Cartier et Etchemin, nous avons utilisé les résultats de simulations rétrospectives du fleuve Saint-Laurent provenant du modèle de Pêches et Océans Canada (MPO) [10]. Ces simulations sont 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 les observations du niveau d'eau en aval ainsi que la vitesse du vent (fournie à un intervalle de 3 heures par Environnement et Changement climatiques Canada) entre l'Île d'Orléans et Saint-Joseph-de-la-Rive, de même que le débit du Saint-Laurent, comme conditions frontières. Pour les fins de ce projet, le rehaussement marin est incorporé en imposant respectivement une augmentation de 50 cm et de 1 m du niveau d'eau en aval, dans deux simulations additionnelles (les autres conditions frontières sont inchangées). Plus de détails sur l'aspect technique du modèle peuvent être trouvés dans [10]. Pour la rivière à Mars, nous avons utilisé les données de niveau d'eau de la station marégraphique la plus proche, soit Port-Alfred (code 03460), pour

l'analyse des événements extrêmes conjoints. Les données horaires des niveaux d'eau totaux de cette station sont illustrées à la Figure 2. On peut voir que la série temporelle comporte plusieurs données manquantes (année 2000, 6 premiers mois de 2001, et de 2014 à juillet 2017). Ainsi, pour la rivière à Mars, l'analyse des débits et des niveaux d'eau maximums annuels sera de 1975 à 2019 et l'analyse des événements conjoints ne tiendra pas compte des jours où aucune observation du niveau d'eau n'est disponible.

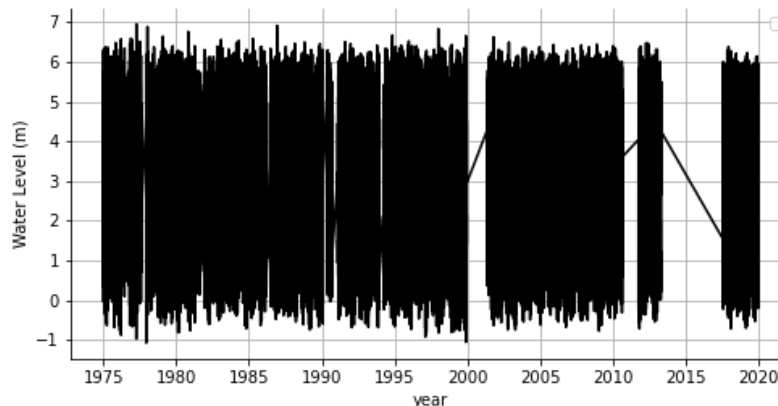


Figure 2. Série temporelle de niveaux d'eau (pas de temps 1h) à la station de Port-Alfred de 1975 à 2019.

3.2 Sélection des niveaux d'eau et débits affluents extrêmes

La première étape dans l'analyse des crues conjoints est la sélection de paires de niveaux d'eau et de débits d'affluent extrêmes. Une revue de la littérature révèle différentes méthodes pour la sélection des paires extrêmes, méthodes qui peuvent être classées en deux groupes : 1) le premier groupe utilise le bloc maxima, où les maximums annuels d'une variable de crue (débit ou niveau d'eau) et les maximums de l'autre variable dans un intervalle de ± 1 jour sont utilisés pour construire les paires d'extrêmes. Cette méthode, également appelée méthode conditionnelle, a été utilisée par [2], [11] pour l'analyse des crues conjoints sur les régions côtières des États-Unis. 2) La méthode de dépassement de seuil (*Threshold Excess*) [12] où un seuil (par exemple 95% percentile) est spécifié pour chaque variable, et les paires Q-H où il y a un dépassement simultané de ces seuils sont considérées comme les paires d'extrêmes. Un avantage de la première méthode est son application aux situations pour lesquelles une seule variable (débit ou niveau d'eau) est extrême, contrairement à la deuxième méthode qui requiert que les deux variables soient simultanément extrêmes [12]. L'intervalle de ± 1 jour s'assure que deux événements débit-niveau d'eau sont indépendants, en venant réduire le risque de sous-estimer la corrélation entre deux extrêmes en raison d'un faible décalage temporel [3]. Dans ce projet,

nous avons donc utilisé la première méthode, car les seuils prédéfinis pour le débit et niveau d'eau n'existent pas et peuvent être ambiguës à déterminer. De plus, l'intérêt est plutôt dans l'évaluation des crues conjointes causées par la présence d'extrêmes dans le niveau d'eau ou dans les débits (ou les deux). Ceci est particulièrement important dans les cas où les extrêmes ne sont pas synchronisés. Par exemple, dans le cas de la rivière à Mars, la crue de la rivière se produit suite à la fonte des neiges alors que le niveau d'eau maximal en aval se produit majoritairement en hiver.

3.3 Analyse d'événements de crues conjoints par copules

Une fois les paires d'extrêmes identifiées, la corrélation (dépendance) entre les deux variables, c'est-à-dire entre le maximum annuel de débit et le niveau d'eau maximum avec un intervalle de ± 1 jour, doit être déterminée. Pour cela, nous avons utilisé le coefficient de corrélation de Kendall (τ) et de Spearman (ρ) qui donne une mesure non paramétrique de la corrélation entre les extrêmes. Cela signifie qu'il n'y a pas d'hypothèse sur la forme de la distribution des variables extrêmes, tandis que pour la corrélation de Pearson, la distribution des deux variables extrêmes doit être normale. Les coefficients varient entre -1 et +1. Une corrélation positive signifie que les rangs des deux variables augmentent, tandis qu'une corrélation négative signifie que lorsqu'une variable augmente, l'autre variable diminue. Ces deux indices de corrélation ont également été utilisés dans d'autres études pour l'évaluation des événements conjoints [2], [4], [11].

La significativité de la corrélation entre deux extrêmes est déterminée par une valeur de probabilité (*p-value*). Une valeur inférieure à 0,05 indique que la corrélation est significative (95% confiance). Selon la significativité de la corrélation, les exutoires des rivières peuvent ensuite être divisés en deux groupes:

1. Pour ceux ayant une dépendance significative (*p-value* inférieure à 0,05), une analyse extrême bivariable basée sur la copule est proposée. Comme discuté dans [2], la copule est une fonction utilisée pour décrire la distribution jointe du débit et du niveau d'eau en prenant en compte les distributions de chacune des variables, tel que [2]:

$$F_{Q^*H^*}(Q, H) = C_{Q^*H^*}(F_{Q^*}(Q), F_{H^*}(H)) \quad 3.1$$

où Q et H sont les séries temporelles du débit et de niveau d'eau et Q^* et H^* sont respectivement les débits maximums annuels et les niveaux d'eau maximums dans un intervalle de ± 1 jour. $C_{Q^*H^*}$ est la fonction de copule et $F_{Q^*H^*}(Q, H)$ est la distribution jointe des débits et des niveaux d'eau extrêmes. Dans un système univarié, un événement avec la période de retour de T ans est défini comme l'inverse de sa probabilité de dépassement :

$$T = \frac{1}{P(X \geq x)} = \frac{1}{1-F(x)} \quad 3.2$$

où $P(X \geq x)$ est la probabilité de dépassement de la variable x et $F(x)$ est sa distribution cumulative. Dans un système bivarié comme les crues conjointes, l'analyse fréquentielle peut être déterminée par la probabilité de dépassement simultané de deux variables, ce qui est aussi appelé scénario *AND* [2]. Il existe aussi un scénario *OR*, où le dépassement de l'une des variables est suffisant pour créer un événement conjoint, mais ce scénario n'a pas été exploré dans le cadre de ce rapport. Le scénario *AND* est utilisé dans différentes études pour l'analyse des crues conjointes [4], [13]. La période de retour dans le cas d'un système bivarié suivant le scénario *AND* est définie comme [3], [4] :

$$T_{AND} = \frac{1}{P(X \geq x \text{ AND } Y \geq y)} = \frac{1}{1-F(x)-F(y)+C_{XY}(F_X(x), F_Y(y))} \quad 3.3$$

où $F(x)$ et $F(y)$ sont les fonctions de distribution pour les variables x et y et $C_{XY}(F_X(x), F_Y(y))$ est la fonction copule pour la distribution conjointe. De cette manière, on peut calculer, par exemple, la période de retour associée au dépassement d'un débit de crue de 10 ans et d'un niveau d'eau de 5 ans.

La Figure 3 montre un schéma du scénario *AND*. Les lignes pointillées bleues et vertes indiquent respectivement le niveau d'eau et le débit qui correspondent à un événement conjoint. Les points noirs sont les débits annuels maximaux de la rivière et le niveau d'eau maximal dans son intervalle d'un jour. Dans un scénario *AND* (Figure 3), les paires Q-H situées dans la zone B représentent le dépassement simultané du débit et du niveau d'eau de la rivière. Donc, par la définition du scénario *AND*, ils sont des événements conjoints.

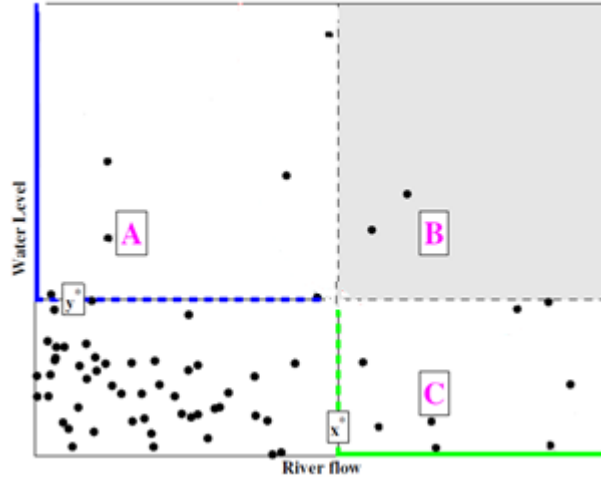


Figure 3. Scénario *AND* dans une analyse conjointe débit-niveau d'eau. Les cercles noirs représentent le débit et les niveaux d'eau extrêmes et la zone grise illustre le domaine de sélection des extrêmes retenus dans la distribution conjointe. Modifié de [3].

2. Dans le cas d'une corrélation non significative entre les débits maximum annuels et les niveaux d'eau maximums dans un intervalle de ± 1 jour (p -value supérieure à 0,05), on utilise plutôt la copule indépendante pour définir la fonction de la distribution conjointe des deux variables. Cette fonction devient donc la multiplication des fonctions de distribution des débits et des niveaux d'eau, c'est-à-dire que le terme $C_{XY}(F_X(x), F_Y(y))$ dans l'équation 3.3 devient tout simplement égal à $F_X(x) \cdot F_Y(y)$. Par conséquent, afin de fournir un nombre fini de scénarios Q-H à utiliser dans le modèle hydraulique, pour la copule indépendante, nous sélectionnons 7 scénarios couvrant une gamme de valeurs possibles pour chaque variable. Dans le cas où le débit et le niveau d'eau sont corrélés, la paire de Q-H avec le maximum de vraisemblance pourra être sélectionné [11]. Le Tableau 2 présente les Q-H proposés pour l'analyse d'un événement conjoint de 100 ans de période de retour. Un constat est qu'il y a deux séries de scénarios ($WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$), chacun basé sur les maxima annuels d'une variable et le maximum d'une autre variable dans un intervalle de ± 1 jour. Alors que dans $WL_{cond}Q$, le niveau d'eau est la variable conditionnée (ses extrêmes sont basés sur les maximums dans l'intervalle de ± 1 jour du débit maximum annuel), dans $Q_{cond}WL$, le débit est la variable conditionnée et le niveau d'eau est la variable principale de la crue conjointe. Comme discuté précédemment, la zone inondable utilisant ces simulations Q-H couvrira les recommandations faites par la méthode FEMA (l'ensemble de scénario 1 dans $Q_{cond}WL$ et le scénario 7 dans la série $WL_{cond}Q$), ainsi que les situations où l'inondation conjointe est produite par l'interaction de niveaux d'eau et de débits moins extrêmes, mais de récurrence conjointe égale (scénario 4 dans $Q_{cond}WL$ et $WL_{cond}Q$).

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.

	<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}	$\hat{H}$
WL_{condQ}	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_{condWL}	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.													

3.3.1 MhAST : Une librairie MATLAB pour l'analyse d'événements conjoints basé sur la méthode copule

L'analyse fréquentielle bivariee a été effectuée en utilisant une librairie libre-accès de MATLAB qui s'appelle *Multihazard Scenario Analysis Toolbox* (MhAST), développée à l'Université de Californie, Irvine (UCI). MhAST a été utilisé dans plusieurs études, notamment dans [2] et [11] pour l'analyse des crues conjointes des régions côtières des États-Unis.

Comme discuté dans la section précédente, la première étape dans l'analyse statistique bivariee par copules est la sélection des paires de débit-niveau d'eau extrêmes, qui dans cette étude sont des maxima annuels de la variable principale et des maximums de la variable conditionnée dans un intervalle de ± 1 jour. Une fois la série de débit-niveau d'eau extrêmes construite, la deuxième étape de l'analyse statistique bivariee est le calcul de la corrélation entre les deux variables. Nous utilisons le coefficient de corrélation de Mann-Kendall (τ) et de Spearman (ρ) pour déterminer s'il existe une dépendance entre les variables, à un niveau de signification de 5 %. Plus les valeurs de τ et ρ sont élevées, plus la chance de concomitance des deux extrêmes est élevée (occurrence simultanée d'un débit et d'un niveau d'eau élevés). L'étape suivante consiste à ajuster les distributions statistiques aux séries de débits et de niveaux d'eau. MhAST ajuste 17 types de distributions statistiques et sélectionne le meilleur ajustement à l'aide du critère d'information bayésien (*Bayesian Information Criterion- BIC-* en anglais) qui tient compte de la complexité du modèle et du nombre d'observations (veuillez consulter le guide du module MhAST pour la liste complète des distributions). Ensuite, une analyse fréquentielle univariee est effectuée sur les séries de débits et niveaux d'eau extrêmes et la fonction de copule qui représente la distribution

conjointe des deux variables est identifiée. MhAST ajuste 25 fonctions de copule et la meilleure fonction est sélectionnée sur la base de la métrique BIC décrite pour l'analyse univariée.

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.

Les Figure 4 et Figure 5 illustrent respectivement les séries temporelles de niveaux d'eaux et de débits, dans lesquelles les maximums annuels ont été indiqués par des cercles rouges. La meilleure distribution ajustée (parmi les 17 fonctions testées) aux maxima annuels du débit et du niveau d'eau est présentée dans le Tableau 3. Comme mentionné dans la section 3.3.1, la meilleure fonction ajustée est celle pour laquelle la valeur du critère d'information bayésien (BIC) est minimale. Le Tableau 3 présente également les paramètres ajustés ainsi que leur intervalle de confiance à 95 % déterminé à l'aide de la méthode du maximum de vraisemblance (*Maximum Likelihood* en anglais).

La distribution sélectionnée est ensuite utilisée pour calculer les débits et niveaux d'eau associés aux périodes de retour 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans, comme présenté dans les Tableau 4 et Tableau 5.

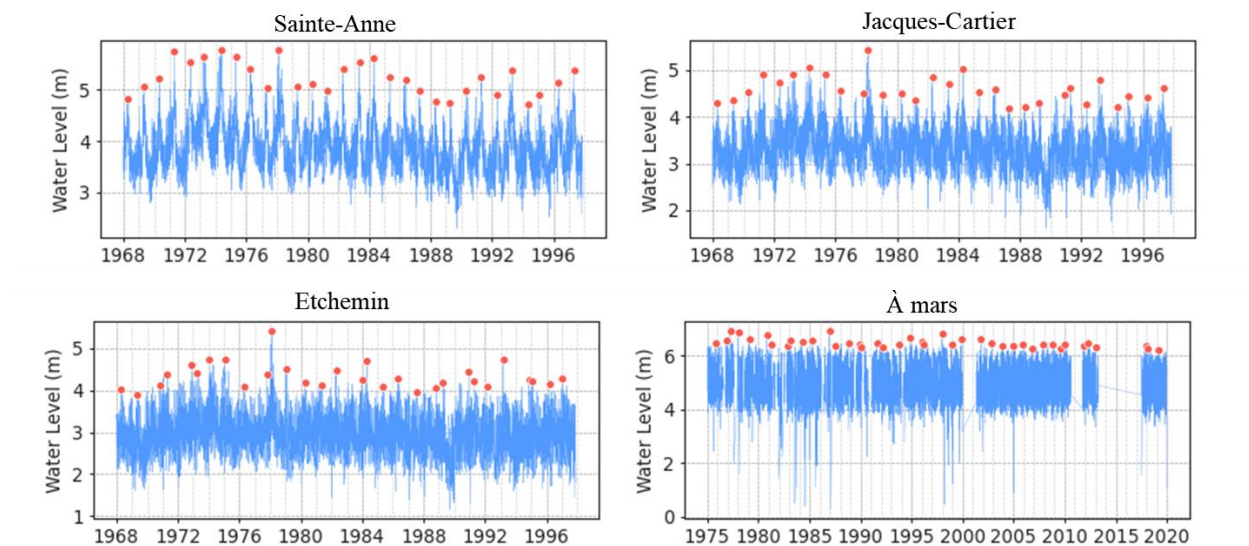


Figure 4. Séries temporelles des **niveaux d'eaux** à l'embouchure des rivières (pas de temps de 15 minutes pour Sainte-Anne, Jacques-Cartier et Etchemin; pas de temps horaire pour à Mars). Les maximums annuels sont identifiés par des cercles rouges

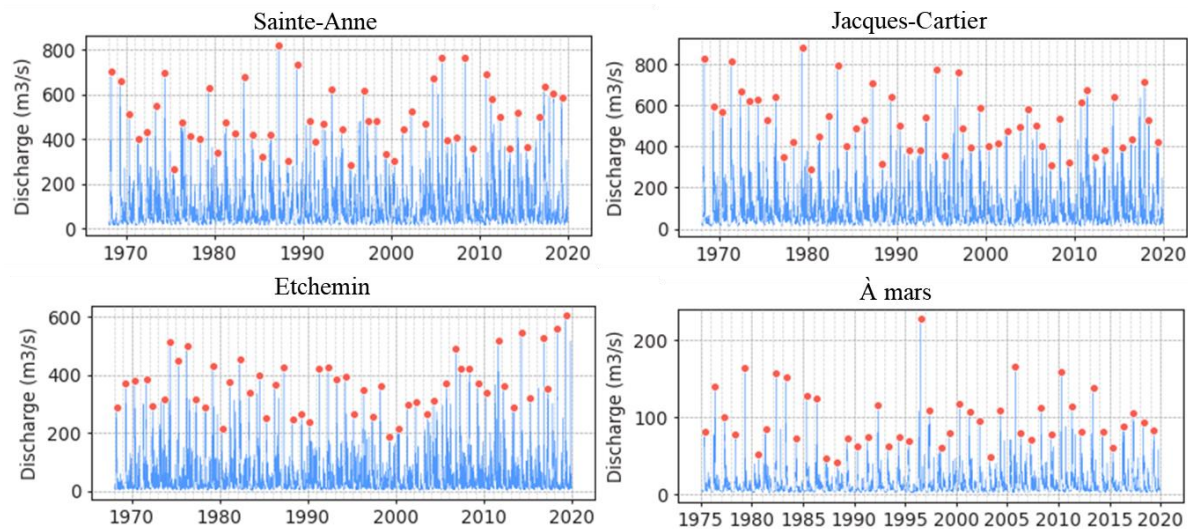


Figure 5. Séries temporelles des **débits journaliers** aux rivières du LOT1. Les maximums annuels sont identifiés par des cercles rouges.

Tableau 3. Paramètres de la meilleure distribution ajustée à la série temporelle de **niveaux d'eau et de débits maxima annuels** aux embouchures des rivières du LOT1. Les valeurs entre parenthèses montrent l'intervalle de confiance à 95%.

	Exutoire	Nom de la distribution	Paramètre 1	Paramètre 2	Paramètre 3
Niveaux d'eau maximums annuels	Sainte-Anne	Generalized Pareto	$\kappa = -1.06$ (-Inf, -1.06)	$\sigma = 1.39$ (-Inf, 1.39)	$\theta = 4.47$
	Jacques-Cartier	Inverse Gaussian	$\mu = 4.53$ (4.459, 4.609)	$\lambda = 1216.63$ (748.98, 1684.28)	-
	Etchemin	Generalized Extreme Value	$\kappa = 0.027$ (-0.190, 0.245)	$\sigma = 0.21$ (0.168, 0.267)	$\mu = 4.21$ (4.144, 4.276)
	à Mars	Generalized Pareto	$\kappa = -0.491$ (-0.793, -0.191)	$\sigma = 0.392$ (0.262, 0.585)	$\theta = 6.23$
Débits maximums annuels	Sainte-Anne	BirnbaumSaunders	$\beta = 482.53$ (445.94, 519.13)	$\gamma = 0.282$ (0.228, 0.336)	
	Jacques-Cartier	BirnbaumSaunders	$\beta = 507.6$ (468.63, 546.58)	$\gamma = 0.285$ (0.231, 0.340)	-
	Etchemin	Gamma	$a = 14.42$ (9.861, 21.088)	$b = 25.34$ (17.215, 37.308)	-
	à Mars	Inverse Gaussian	$\mu = 95.53$ (81.873, 109.194)	$\lambda = 598.29$ (598.288, 901.059)	-

Tableau 4. **Niveaux d'eau extrêmes** (m) pour différentes périodes de retour, avec leur intervalle de confiance à 95%, aux embouchures des rivières du LOT1.

	H_2	H_5	H_{10}	H_{20}	H_{50}	H_{100}	H_{350}
Sainte-Anne	5.12	5.54	5.67	5.73	5.76	5.77	5.78
Jacques-Cartier	4.52 (4.45,4.60)	4.76 (4.74,4.81)	4.89 (4.89,4.92)	5.0 (5.0,5.0)	5.12 (5.12,5.21)	5.21 (5.20,5.32)	5.35 (5.3,5.5)
Etchemin	4.29 (4.2,4.37)	4.53 (4.36,4.68)	4.70 (4.45,4.89)	4.86 (4.53,5.1)	5.07 (4.61,5.37)	5.24 (4.66,5.58)	5.54 (4.74,5.96)
à Mars	6.46 (6.37,6.61)	6.67 (6.47,7.04)	6.77 (6.51,7.32)	6.85 (6.53,7.56)	6.91 (6.546,7.84)	6.95 (6.55,8.02)	6.98 (6.55,8.29)

Tableau 5. **Débits extrêmes** (m³/s) pour différentes périodes de retour, avec leur intervalle de confiance à 95 %, aux embouchures des rivières du LOT1.

	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{50}	Q_{100}	Q_{350}
Sainte-Anne	482.5 (445.9,519.1)	611.4 (540.1,688.1)	691.3 (596.7,795.9)	764.2 (647.5,896.1)	854.4 (709.3,1021.7)	919.5 (753.4,1113.4)	1032.7 (829.1,1274.5)
Jacques-Cartier	507.6 (468.6,546.6)	644.8 (569.0,726.9)	729.9 (629.4,842.2)	807.8 (683.7,949.5)	904.8 (749.9,1084.1)	973.7 (797.1,1182.5)	1094.8 (878.2,1355.4)
Etchemin	357.0 (164.1,774.4)	442.9 (212.8,926.1)	492.9 (241.7,1012.7)	536.7 (267.3,1088.1)	589.0 (298.3,1177.2)	625.6 (320.1,1239.1)	687.3 (357.1,1342.8)
à Mars	88.4 (76.7,103.0)	122.9 (104.1,137.4)	145.7 (122.0,159.6)	167.3 (138.8,180.3)	195.0 (160.2,206.4)	212.6 (175.9,225.6)	252.2 (203.8,259.4)

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

À l'embouchure des rivières où il risque d'y avoir une concomitance d'événements extrêmes, comme c'est le cas pour les quatre rivières à l'étude dans le LOT1, il importe d'avoir une meilleure compréhension des risques d'événements multivariés, i.e. d'évaluer le potentiel de concomitance des débits et des niveaux d'eau extrêmes. Pour ce faire, la Figure 6 illustre les probabilités d'occurrence mensuelles des maxima annuels de ces deux phénomènes pour la période de 1968-2019 pour les exutoires Sainte-Anne, Jacques-Cartier, et Etchemin et pour la période 1975-2019 pour la rivière à Mars. On peut voir que, dans le cas de la rivière Sainte-Anne, il y a une forte probabilité que le maximum annuel ait lieu au printemps (avril-mai), autant pour les débits de la rivière Sainte-Anne elle-même que pour les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent. Au contraire, pour la rivière à Mars, le débit de la rivière atteint son maximum en mai, tandis que le niveau d'eau est plus enclin d'atteindre son maximum en janvier, en avril ou en novembre. En général, on constate que le potentiel de concomitance des deux extrêmes diminue de l'amont vers l'aval le long du fleuve Saint-Laurent.

Comme expliqué à la Section 3.3, le choix de la méthodologie à employer pour la prise en compte des événements conjoints est basé sur l'importance de la corrélation entre les extrêmes de niveau d'eau et de débit. Cela est déterminé à l'aide de l'indice non paramétrique de corrélation de Mann-Kendall (τ) et Spearman (ρ). Les résultats sont présentés à la Figure 7. Les valeurs τ et ρ varient, respectivement, entre 0,11 et 0,16 pour Sainte-Anne et entre -0,08 et -0,10 pour à Mars. La Figure 7 montre qu'aucun des exutoires ne présente une corrélation significative entre ces extrêmes, à un niveau de confiance de 95 % ($p\text{-value} \leq 0,05$). Ceci est confirmé visuellement à la Figure 8. Ces résultats signifient qu'il n'y a pas de corrélation entre les maximums de débit et les maximums de niveau d'eau, et ce même pour la rivière Sainte-Anne pour laquelle les maximums des deux variables tendent à se produire en avril-mai. Une comparaison des moments d'occurrence des débits et des niveaux d'eau maximums pour cette rivière montre qu'il y a environ deux semaines de différence entre l'occurrence des maxima annuels pour les deux variables.

Compte-tenu de l'absence d'une corrélation entre les niveaux d'eau et les débits extrêmes, l'analyse fréquentielle bivariée (conjointe) est effectuée à l'aide de la copule indépendante. Il est important de rappeler que, comme le niveau d'eau et le débit extrême sont indépendants, l'analyse fréquentielle bivariée doit être effectuée en utilisant à la fois le débit et le niveau d'eau comme la variable principale, tel que présenté dans le Tableau 2.

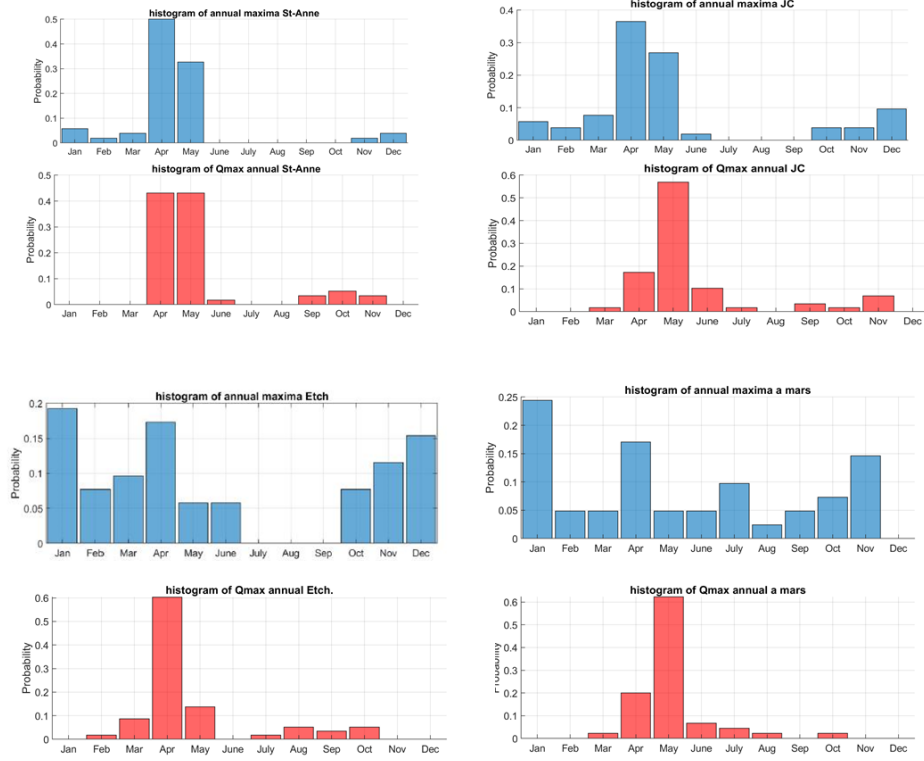


Figure 6. Probabilité d'occurrence mensuelle des maximums annuels du niveau d'eau (bleu) et de débit (rouge) pour les exutoires du LOT1.

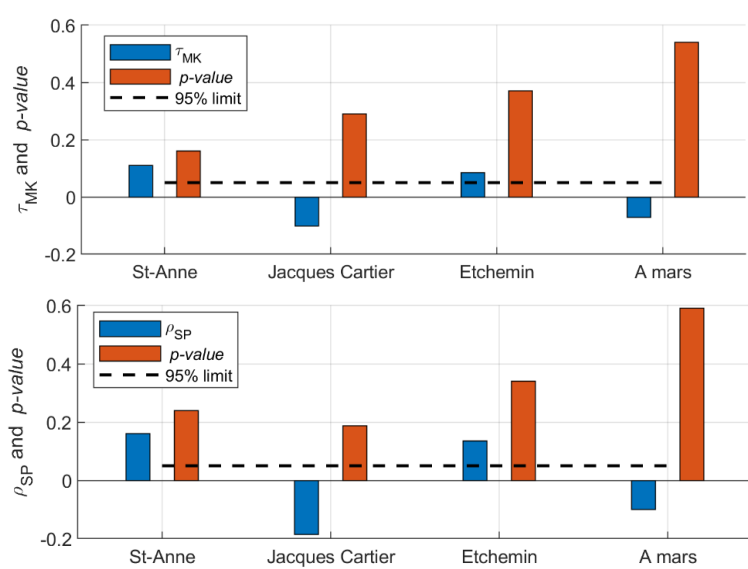


Figure 7. Coefficients de corrélation de Mann-Kendall (τ) et Spearman (ρ) entre les débits maximums annuels et les niveaux d'eau maximums dans un intervalle de ± 1 jour aux exutoires du LOT 1. La ligne pointillée représente la limite de confiance de 95 %.

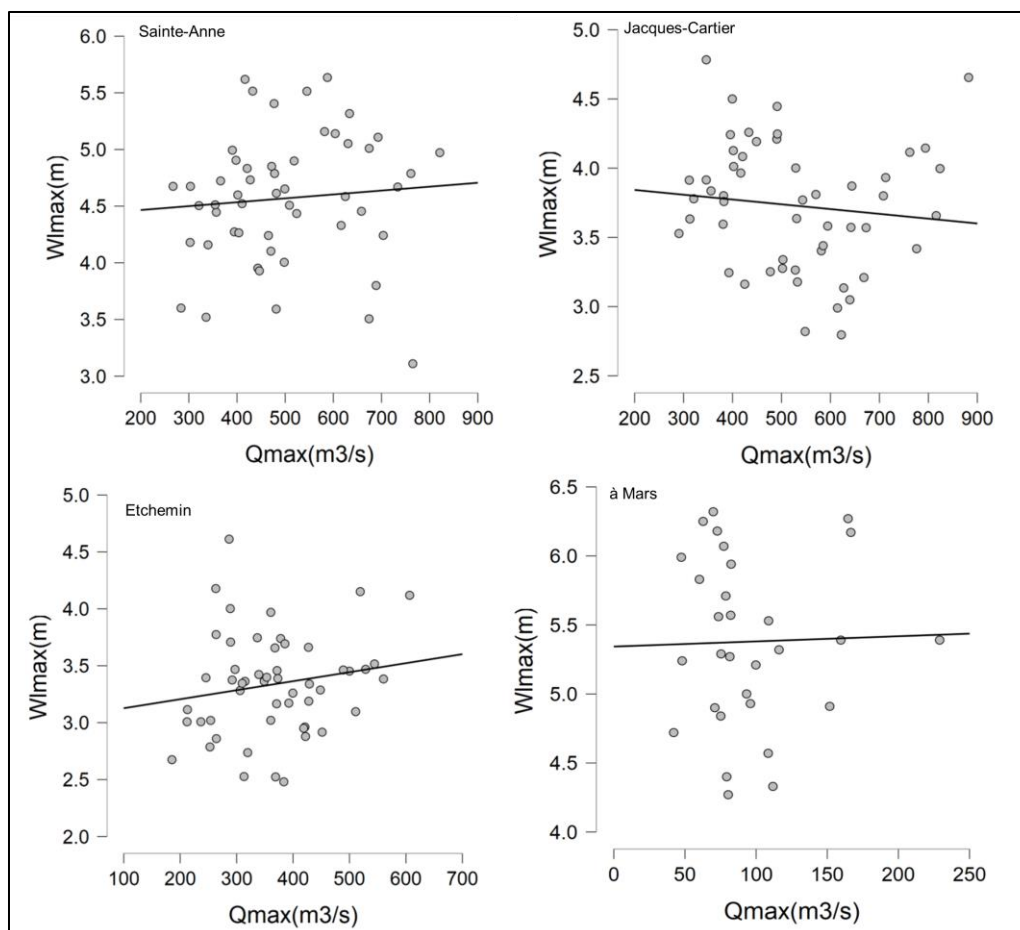


Figure 8. Nuage de points montrant les débits maxima annuels (axe X) et les niveaux d'eau maximums (axe Y) correspondant dans un intervalle de ± 1 jour aux exutoires du LOT1. Les lignes continues représentent la régression linéaire ajustée aux données.

4.3 Analyse des évènements extrêmes conjoints

Comme les paires de niveaux d'eau-débits aux exutoires du LOT1 ne sont pas corrélées, ces deux phénomènes peuvent être considérés comme statistiquement indépendants. **La probabilité de dépassement annuelle de l'évènement conjoint, par conséquent, peut être vue comme la multiplication des probabilités de dépassement annuelles de chaque phénomène pris individuellement.** Le Tableau 6 présente la fonction de la distribution ajustée ainsi que ses paramètres pour les variables conditionnées, $Q_{\text{cond}}WL$ et $WL_{\text{cond}}Q$, nécessaires pour bâtir les séries présentées dans le Tableau 2. Notez que les variables principales, Q et H , utilisent plutôt les résultats présentés au Tableau 3.

Tableau 6. Paramètres de la distribution ajustée aux séries de Q_{condWL} et WL_{condQ} .

	<i>Exutoire</i>	<i>Nom de la distribution</i>	<i>Paramètre 1</i>	<i>Paramètre 2</i>	<i>Paramètre 3</i>
WL_{condQ}	Sainte-Anne	Weibull	$a = 4.81$	$b = 9.24$	-
	Jacques-Cartier	Nakagami	$\mu = 16.81$	$\omega = 14.11$	-
	Etchemin	BirnbaumSaunders	$\beta = 3.31$	$\gamma = 0.133$	-
	à Mars	Generalized Pareto	$\kappa = -1.125$	$\sigma = 2.31$	$\theta = 4.27$
Q_{condWL}	Sainte-Anne	Rayleigh	$b = 247.34$	-	-
	Jacques-Cartier	Generalized Pareto	$\kappa = -0.671$	$\sigma = 289.8$	$\theta = 13.877$
	Etchemin	BirnbaumSaunders	$\beta = 36.97$	$\gamma = 1.53$	
	à Mars	Generalized Pareto	$\kappa = 0.386$	$\sigma = 6.952$	$\theta = 2.580$

Le Tableau 7 présente les valeurs des paires Q-H associées aux scénarios 1 à 7 lorsque le débit est la variable principale de la crue conjointe (WL_{condQ}). Ces paires Q-H sont également montrées dans l'espace de copules aux Figure 9 Figure 12. Dans ces figures, les cercles bleus représentent les paires extrêmes Q-H, le panneau de gauche et celui du bas présentent les courbes pour les extrêmes univariés associés au niveau d'eau et au débit dans la série WL_{condQ} . Les courbes vertes dans le panneau supérieur-droit montrent les Q-H associés aux crues conjointes de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans. On peut voir que les scénarios Q-H sélectionnés (cercles noirs) couvrent une large gamme de Q-H, où les scénarios 1, 2 et 3 associés aux situations « moins extrêmes » de débit et les scénarios 5, 6 et 7 fournissent les débits qui sont supérieurs à un débit de 20 ans.

On rappelle que, comme toutes les valeurs de Q-H sur une isoligne ont une probabilité d'occurrence identique, d'autres valeurs Q-H que celles du Tableau 7 peuvent également être sélectionnées. Dans ce projet, nous avons choisi les scénarios pouvant couvrir les valeurs Q-H recommandées par la méthode FEMA (scénario 1 dans Q_{condWL} et scénario 7 dans WL_{condQ}), ainsi que les crues conjointes de 100 ans causées par l'interaction des événements de 2, 5, 10, 20 et 50 ans pour les variables principales et conditionnées.

Tableau 7. Scénarios niveau-débit pour la série **WL_{cond}Q**, pour une probabilité au dépassement de 1%.

	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}	$\hat{H}$
Sainte-Anne	267.2	5.68	482.5	5.58	611.3	5.42	691.1	5.27	764	5.07	854.1	4.63	919.1	3.11
Jacques-Cartier	287.4	4.83	507.6	4.7	644.8	4.50	729.9	4.32	807.8	4.11	904.1	3.72	973.7	2.80
Etchemin	185.4	4.50	357.1	4.34	443.0	4.11	492.9	3.92	536.8	3.7	589.1	3.31	625.7	2.48
à Mars	42.1	6.31	88.5	6.29	123.1	6.25	146	6.17	167.7	5.98	195.5	5.38	216.1	4.27

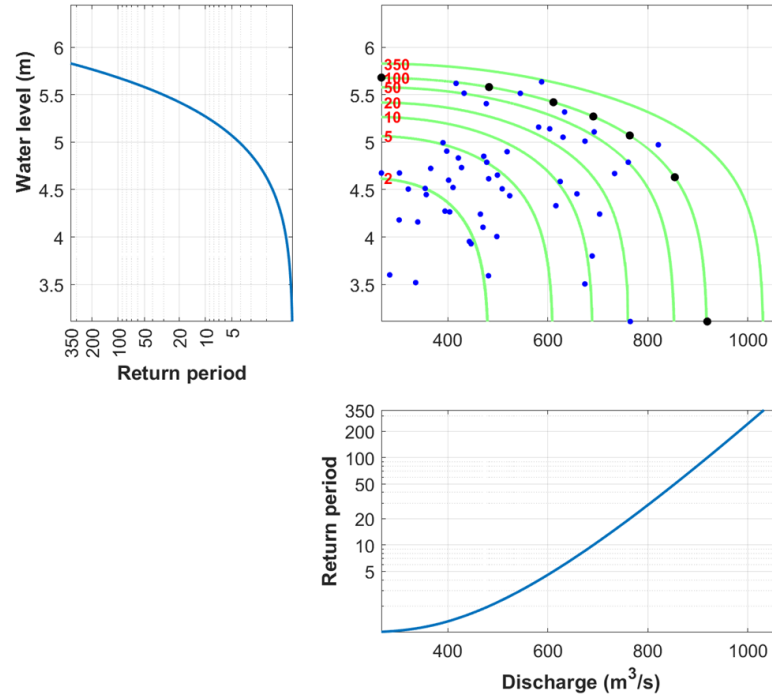


Figure 9. Isolignes des crues conjointes pour la série **WL_{cond}Q** à l'exutoire **Sainte-Anne**, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

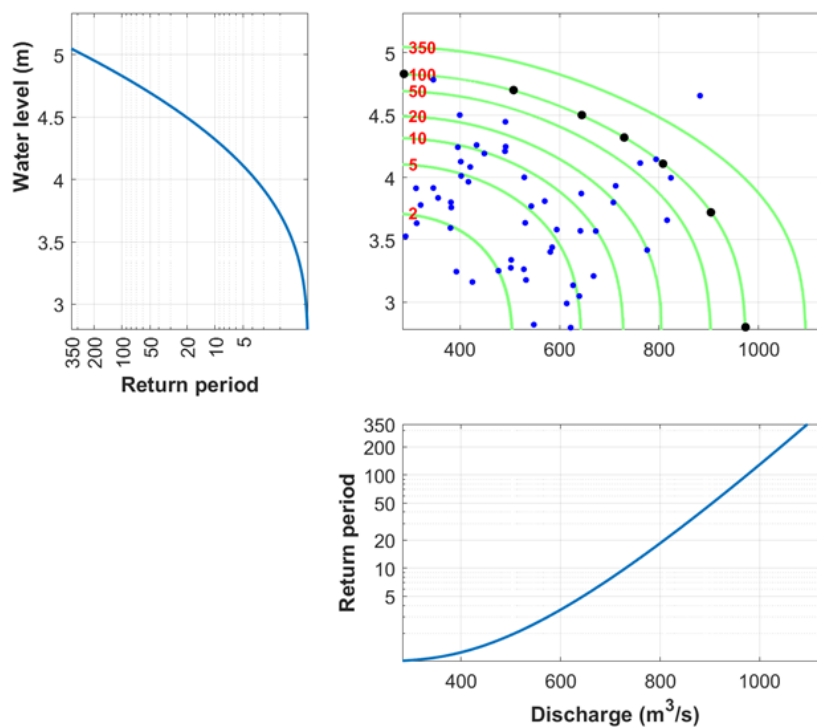


Figure 10. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire **Jacques-Cartier**, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

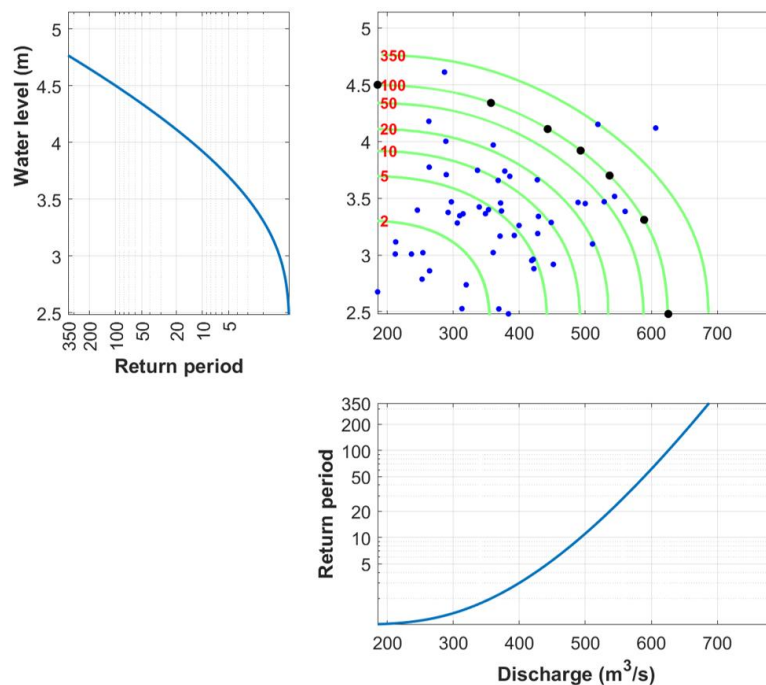


Figure 11. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire **Etchemin**, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

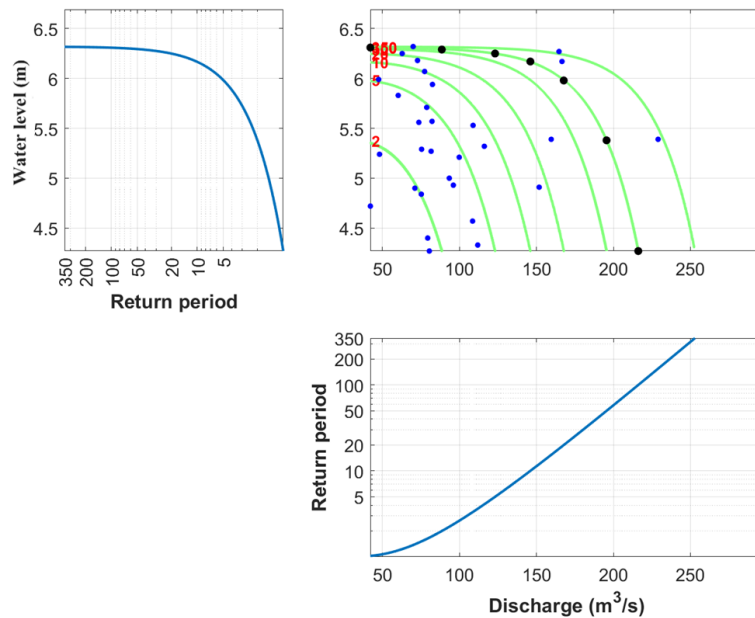


Figure 12. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ à l'exutoire **À Mars**, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

De la même manière, le Tableau 8 présente les scénarios Q-H pour la série $Q_{cond}WL$. Les scénarios Q-H sont également présentés aux Figure 13 Figure 15. Comme dans le cas de $WL_{cond}Q$, ici, tous les scénarios Q-H (cercles noirs) associés à une probabilité de 1% sont sur l'isoligne d'évènement conjoint de 100 ans. On constate que la forme de la distribution conjointe est différente entre les exutoires. Par exemple, dans le cas de Sainte-Anne, illustrée à la Figure 13, le niveau d'eau est représenté par une distribution Weibull et atteint un plateau pour les événements supérieurs à 20 ans. Ce modèle a également été traduit dans les isolignes conjointes, où les niveaux d'eau associés à 20, 50, 100 et 350 ans combinés avec des débits inférieurs à 5 ans sont très proches. La régulation du fleuve Saint-Laurent joue probablement un rôle dans cet effet de « plateau » des niveaux d'eau extrêmes.

Pour le cas de l'exutoire Etchemin et en particulier à Mars, les maxima annuels de niveau d'eau se produisent souvent quand les débits sont inférieurs à une période de retour de 5 ans (cercles bleus), comme cela avait également été montré à la Figure 6. Les isolignes conjointes pour ces exutoires sont donc fortement déformées et s'apparentent à des lignes plutôt qu'à des courbes. De plus, comme le niveau d'eau extrême continue d'augmenter dans le cas de Etchemin, les différences entre les 20, 50, 100 et 350 ans dans les courbes conjointes sont plus importantes

que dans le cas de Sainte-Anne. Il est possible que cela soit dû à la plus grande influence du milieu maritime, et donc à un impact atténué de la régulation, à cet emplacement dans le fleuve Saint-Laurent.

Tableau 8. Scénarios niveau-débit pour la série $Q_{\text{cond}}WL$, 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}	$\hat{H}$
Sainte-Anne	29.7	5.78	291.2	5.77	443.8	5.74	530.8	5.67	605.4	5.55	691.8	5.16	750.6	4.50
Jacques-Cartier	13.88	5.22	174.5	5.13	298.9	5.00	353.5	4.89	387.7	4.76	414.2	4.52	425.8	3.9
Etchemin	4.0	5.25	36.97	5.08	124.09	4.87	209.24	4.7	303.0 8	4.53	433.05	4.29	538.7 7	3.90
À Mars	4.1	6.94	8.10	6.91	18.09	6.84	28.36	6.77	41.79	6.67	66.05	6.46	91.03	6.23

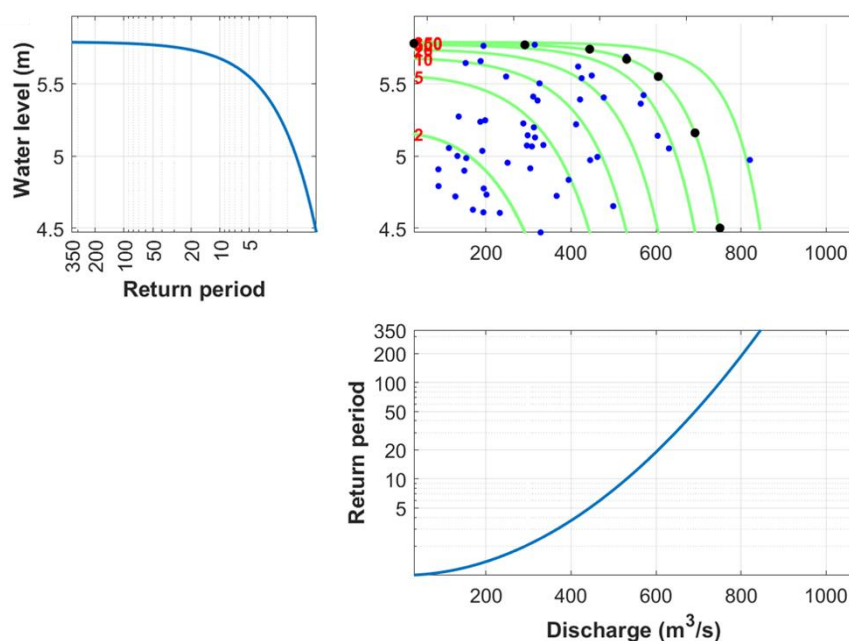


Figure 13. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{\text{cond}}WL$ à l'exutoire **Sainte-Anne**, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

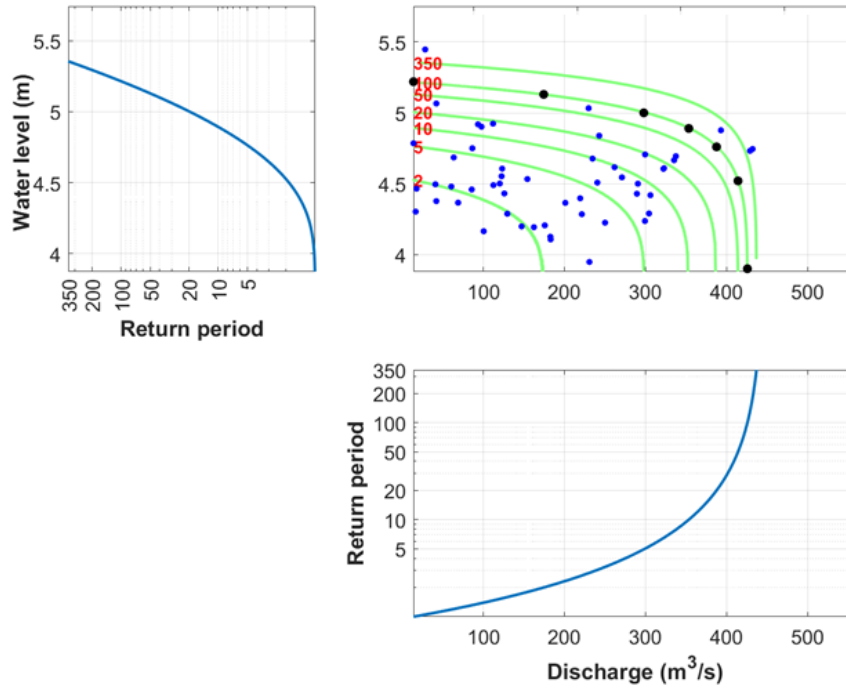


Figure 14. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{\text{cond}}^{\text{WL}}$ à l'exutoire **Jacques-Cartier**, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

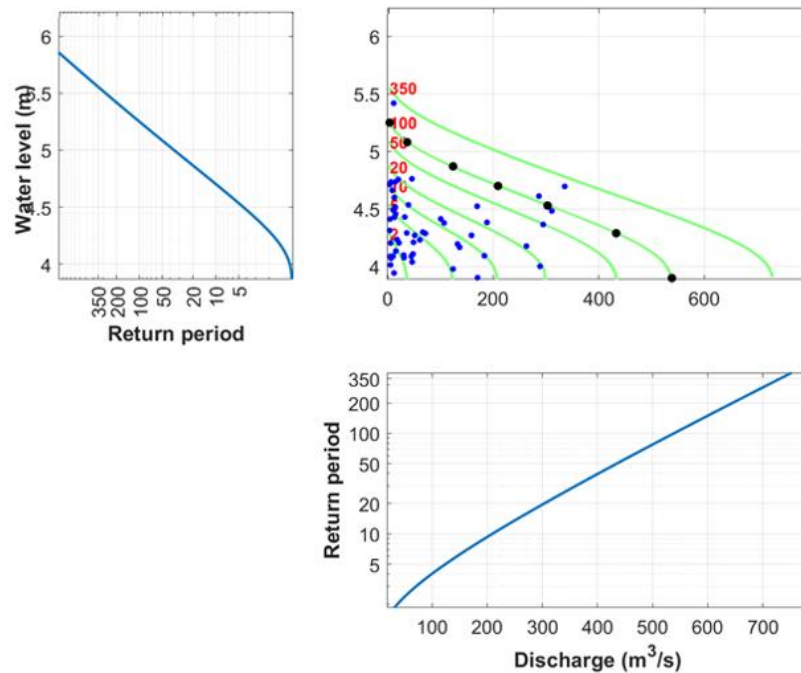


Figure 15. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{\text{cond}}^{\text{WL}}$ à l'exutoire **Etchemin**, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

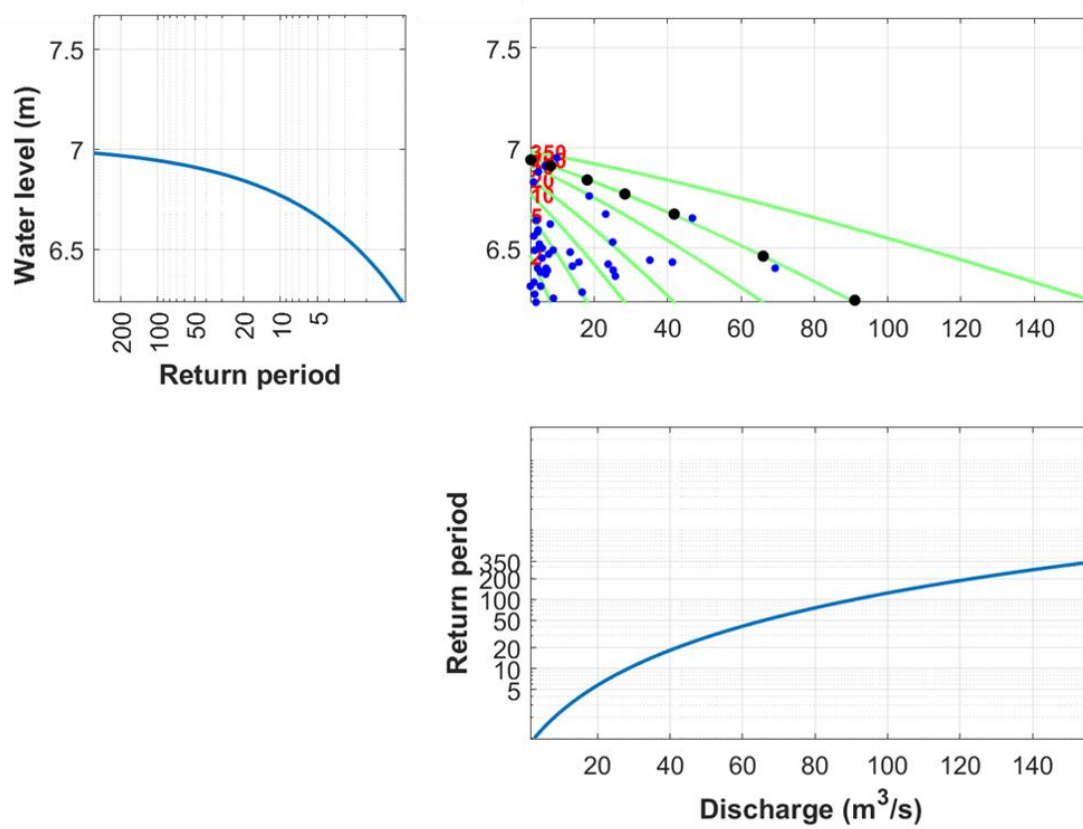


Figure 16. Isolignes des crues conjointes pour la série $Q_{cond}WL$ à l'exutoire à Mars, ainsi que les scénarios sélectionnés (noir) associés à l'événement conjoint de 100 ans.

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

5.1 Les 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 extrêmes en région côtière seront modifiés 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.

Puisque la base de données canadienne de rehaussement marin [14] ne couvre pas les exutoires concernés dans ce projet, nous avons utilisé deux simulations produites par le modèle de MPO [10] avec un rehaussement marin de 50 cm et 1 m imposé à Saint-Joseph-de-la-Rive, soit la condition limite en aval du modèle (Tableau 9). Cependant, il faut noter que le débit du fleuve Saint-Laurent, les débits des tributaires ainsi que les conditions météorologiques sont restés inchangés dans ces simulations. Ceci signifie que la comparaison des deux simulations (avec et sans rehaussement marin) montrera uniquement comment le rehaussement marin en aval du modèle pourrait affecter le niveau d'eau extrême des régions côtières en amont du fleuve Saint-Laurent. Pour fins de comparaison, les projections de rehaussement marin (changement par rapport aux conditions moyennes 1986-2005) à Saint-Joseph-de-la-Rive sont présentées au Tableau 9.

Tableau 9. Le rehaussement marin (en cm) projeté à Saint-Joseph-de-la-Rive pour différents RCP et horizons temporels [14].

<i>Date</i>	<i>RCP 2.6 (50^e percentile)</i>	<i>RCP 2.6 (5^e percentile)</i>	<i>RCP 2.6 (95^e percentile)</i>	<i>RCP 4.5 (50^e percentile)</i>	<i>RCP 4.5 (5^e percentile)</i>	<i>RCP 4.5 (95^e percentile)</i>	<i>RCP 8.5 (50^e percentile)</i>	<i>RCP 8.5 (5^e percentile)</i>	<i>RCP 8.5 (95^e percentile)</i>	<i>RCP 8.5 renforcé (50^e percentile)</i>
1/1/2006	1.47	-6.24	9.19	0.68	-3.81	5.16	0.28	-6.44	6.99	
1/1/2010	1.86	-5.1	8.82	2.14	-2.35	6.63	2.77	-2.33	7.86	
1/1/2020	2.73	-1.49	6.93	2.16	-5.98	10.27	2.73	-3.75	9.2	
1/1/2030	7.46	-0.01	14.9	6.05	-2	14.06	8.29	-2.95	19.49	
1/1/2040	9.65	-5.23	24.47	8.27	-2.86	19.35	10.21	-2.38	22.77	
1/1/2050	11.85	-4.35	28	12.53	-1.67	26.69	15.66	0.13	31.19	
1/1/2060	13.77	-3.8	31.26	14.6	-2.18	31.36	21.08	2.83	39.41	
1/1/2070	16.25	-6.19	38.62	17.61	-1.49	36.72	26.59	3.23	50.16	
1/1/2080	15.85	-7.05	38.66	21.46	-2.13	45.11	34.49	6.31	63.09	
1/1/2090	16.64	-12.17	45.35	24.74	-3.41	53	42.72	10.92	75.26	
1/1/2100	16.4	-13.99	46.67	26.11	-4.15	56.51	48.47	9.57	88.51	120.91

Le rehaussement de 50 cm utilisé correspond au 95^e percentile de rehaussement marin projeté avec le RCP8.5 pour l'horizon 2070. L'utilisation d'un quantile aussi élevé pourrait paraître comme une surestimation, mais il s'agit de la recommandation de James et al., 2021 [14] pour les régions côtières à faible tolérance au risque, ce qui cadre bien avec une application pour les zones inondables. Ainsi le rehaussement de 50 cm, qui correspond au 95^e percentile des projections du RCP8.5 en 2070, correspond au 50^e percentile quelques décennies plus tard. Des projections beaucoup plus pessimistes et dépassant 1 m (appelées « RCP8.5 renforcé » par James et al., 2021), ne sont pas non plus à écarter entièrement et proviennent notamment d'une incertitude liée à la fonte des pôles. D'ailleurs, bien qu'il n'existe pas encore d'adaptation régionale tel que créée par [14], les projections de CMIP6 pointent vers un rehaussement marin accentué par rapport à CMIP5 [15], [16] entre autres en raison d'une fonte plus rapide du Groenland. **Par conséquent, un rehaussement marin de 50 cm a été utilisé pour les fins de ce rapport** et représente un minimum nécessaire pour adéquatement représenter les niveaux d'eau à l'horizon 2070, mais des valeurs plus élevées pourraient également être utilisées et justifiées.

Pour la rivière à Mars, et pour les tributaires de la rivière Saguenay en général, aucune information sur les projections de rehaussement marin n'est présentement disponible. L'endroit le plus proche pour lequel les projections de rehaussement marin sont disponibles est l'embouchure de la rivière Saguenay (station Tadoussac : code 3425). Ces projections sont présentées au Tableau 10.

Afin d'estimer le rehaussement marin à la rivière à Mars, nous avons comparé les niveaux d'eau maximums journaliers aux stations Port-Alfred et Tadoussac pour la période 1975-1990, pendant laquelle la station Tadoussac était active (Figure 17). Les valeurs maximales journalières ne sont sélectionnées que pour les jours avec un cycle de mesure complet (24 valeurs), où les maximums journaliers sont identifiables. On peut voir qu'il existe une relation linéaire entre le niveau d'eau à ces deux endroits. Considérant une distance d'environ 90 km entre les deux sites, la pente hydraulique moyenne entre les deux serait donc très faible. Pour comparer la différence potentielle entre la valeur de rehaussement marin à ces deux points, il importe également de comparer leurs ajustements isostatiques. On peut voir à la Figure 18 que l'ajustement isostatique semble relativement similaire pour ces deux endroits, ce qui confirme qu'il est possible de supposer que les projections de rehaussement marin à l'embouchure de la rivière à Mars sont les mêmes qu'à l'embouchure de la rivière Saguenay.

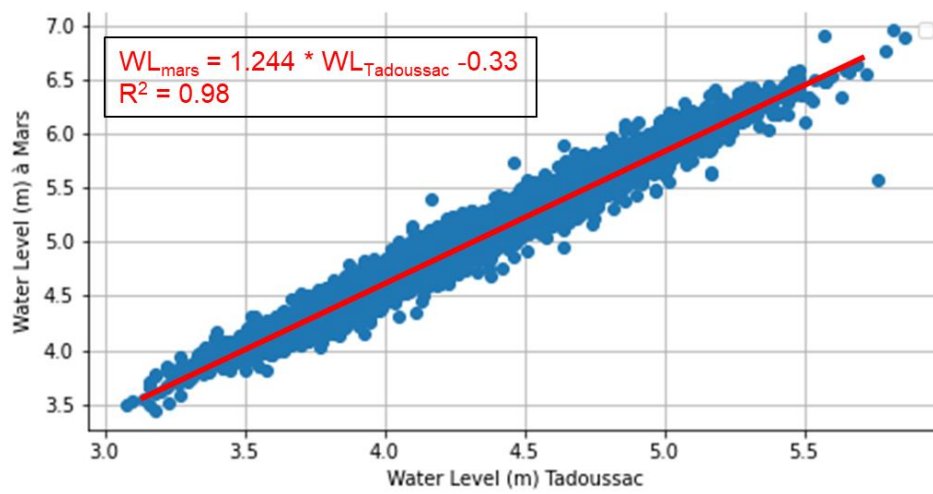


Figure 17. Les niveaux d'eau à la station Port-Alfred (axe Y) par rapport à la station Tadoussac (axe X) pour la période 1975-1990 ainsi que la régression linéaire (ligne rouge).

Tableau 10. Le rehaussement marin (en cm) estimé à l'embouchure de la rivière Saguenay en différents RCP et horizons temporels [14].

<i>Date</i>	<i>RCP 2.6 (50^e percentile)</i>	<i>RCP 2.6 (5^e percentile)</i>	<i>RCP 2.6 (95^e percentile)</i>	<i>RCP 4.5 (50^e percentile)</i>	<i>RCP 4.5 (5^e percentile)</i>	<i>RCP 4.5 (95^e percentile)</i>	<i>RCP 8.5 (50^e percentile)</i>	<i>RCP 8.5 (5^e percentile)</i>	<i>RCP 8.5 (95^e percentile)</i>	<i>RCP 8.5 renforcé (50^e percentile)</i>
1/1/2006	1.06	-5.83	7.96	0.21	-3.56	3.97	0.15	-6.18	6.48	
1/1/2010	1.67	-4.6	7.93	1.68	-3.08	6.41	2.18	-2.59	6.95	
1/1/2020	2.39	-1.51	6.24	1.41	-6.55	9.32	2.35	-3.97	8.63	
1/1/2030	6.53	-0.46	13.44	4.91	-2.84	12.58	6.74	-5.28	18.71	
1/1/2040	8.64	-5.58	22.75	7.12	-3.47	17.63	8.72	-3.93	21.29	
1/1/2050	10.33	-5.93	26.45	10.62	-3.67	24.79	13.81	-2.4	29.94	
1/1/2060	12.23	-5.18	29.47	13.01	-3.5	29.4	18.77	-0.28	37.77	
1/1/2070	13.99	-8.62	36.4	15.48	-3.99	34.83	24.47	0.75	48.2	
1/1/2080	13.53	-9.23	36.05	18.67	-5.24	42.45	32.12	3.36	61.03	
1/1/2090	14.21	-13.95	42.11	21.76	-6.62	50.01	39.48	6.87	72.43	
1/1/2100	12.9	-16.81	42.34	22.84	-7.91	53.48	44.83	5.82	84.46	117.28

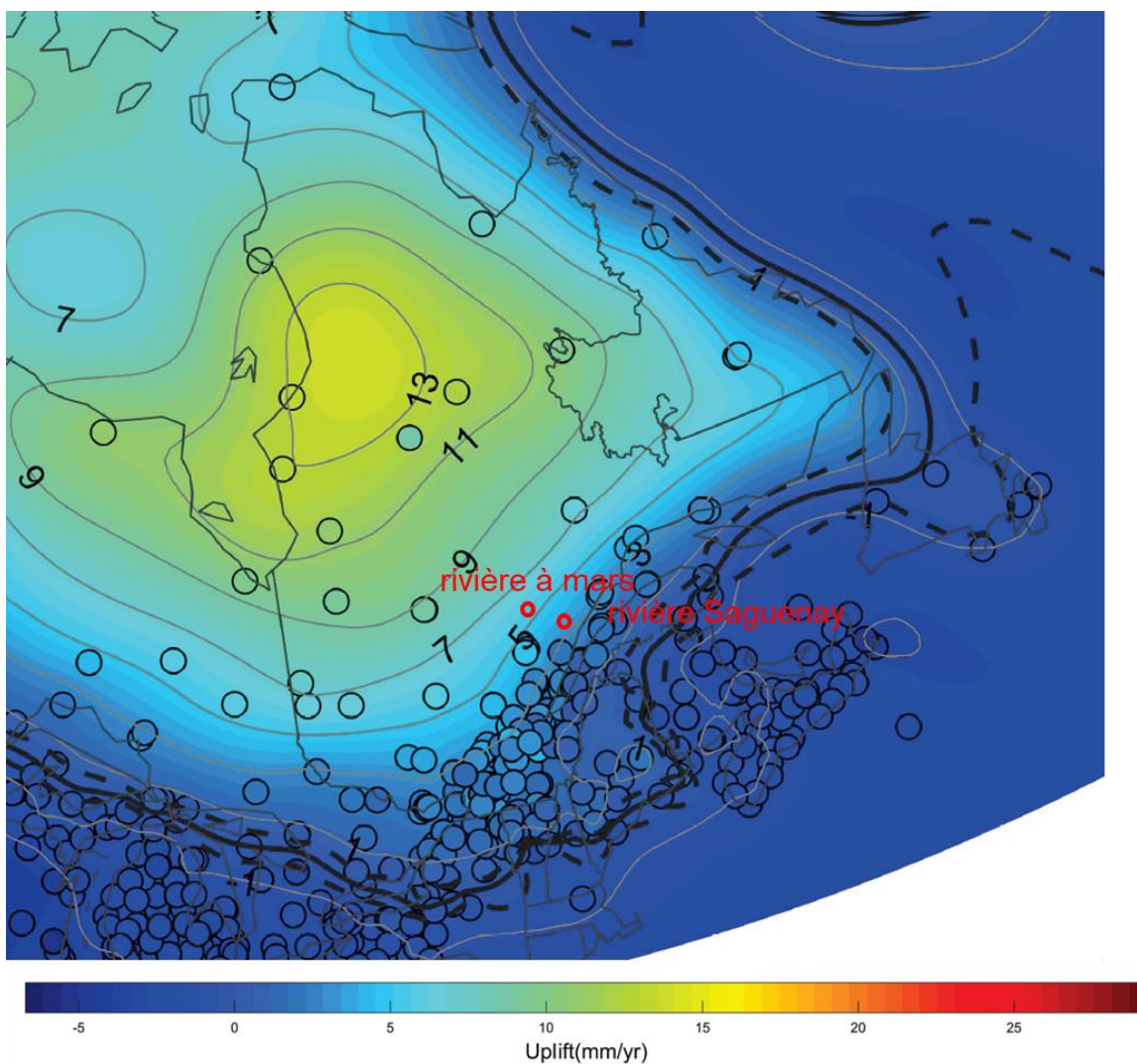


Figure 18. Taux de soulèvement et d'affaissement des terres (mm par an) à partir du modèle NAD83V70VG. Les emplacements approximatifs des exutoires de la rivière Saguenay et de la rivière à Mars sont indiqués par des cercles rouges. Modifié après [14].

5.2 Analyse d'événements extrêmes conjoints dans le contexte de rehaussement marin

Dans cette section, l'effet du rehaussement marin sur l'ampleur des niveaux d'eau extrêmes, ainsi que sur les crues conjointes, est présenté. Comme expliqué aux Sections 3.1 et 5.1, pour les exutoires dans le tronçon fluvial du Saint-Laurent, c'est-à-dire Sainte-Anne, Jacques-Cartier et Etchemin, nous utilisons les simulations du modèle de MPO, mais avec un rehaussement marin de 50 cm pour analyser les crues conjointes futures.

Pour la rivière à Mars, en absence d'un modèle permettant de mieux estimer l'impact d'un rehaussement marin le long de la rivière Saguenay, on émet l'hypothèse 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. Par conséquent, la série temporelle de niveaux d'eau futurs est estimée en ajoutant 48,2 cm (qui correspond au 95e percentile du scénario RCP 8.5 pour l'horizon 2070 à l'embouchure de la rivière Saguenay) à la série chronologique historique. Des hypothèses similaires ont été faites par [13] pour étudier l'effet du rehaussement marin sur les inondations conjointes pour les régions côtières de l'Europe.

À la Figure 19, le niveau d'eau extrême pour le scénario de référence (sans rehaussement marin) est comparé à ceux incluant le rehaussement marin. Les paramètres des distributions ajustées à ces séries temporelles sont présentés dans les Tableaux Tableau 3 et Tableau 11.

On peut voir que le rehaussement marin se traduit par des changements importants dans les périodes de retour. Par exemple, le niveau d'eau extrême de 100 ans devient un événement de ~3 ans avec un rehaussement marin de 50 cm pour les rivières Sainte-Anne et à Mars et ~5 et ~10 ans pour les rivières Jacques-Cartier et Etchemin, respectivement.

La différence de niveau d'eau entre le scénario de rehaussement marin de 50 cm et le scénario de référence, pour un événement de 350 ans, est de 41 cm pour Sainte-Anne, 48 cm pour Jacques-Cartier, et de 51,6 cm pour Etchemin. Cela démontre l'importance du modèle de MPO pour bien représenter l'effet de refoulement et l'impact de l'élévation du fleuve Saint-Laurent sur la progression du rehaussement marin. La différence est de 48 cm pour la rivière à Mars, soit exactement le rehaussement prescrit.

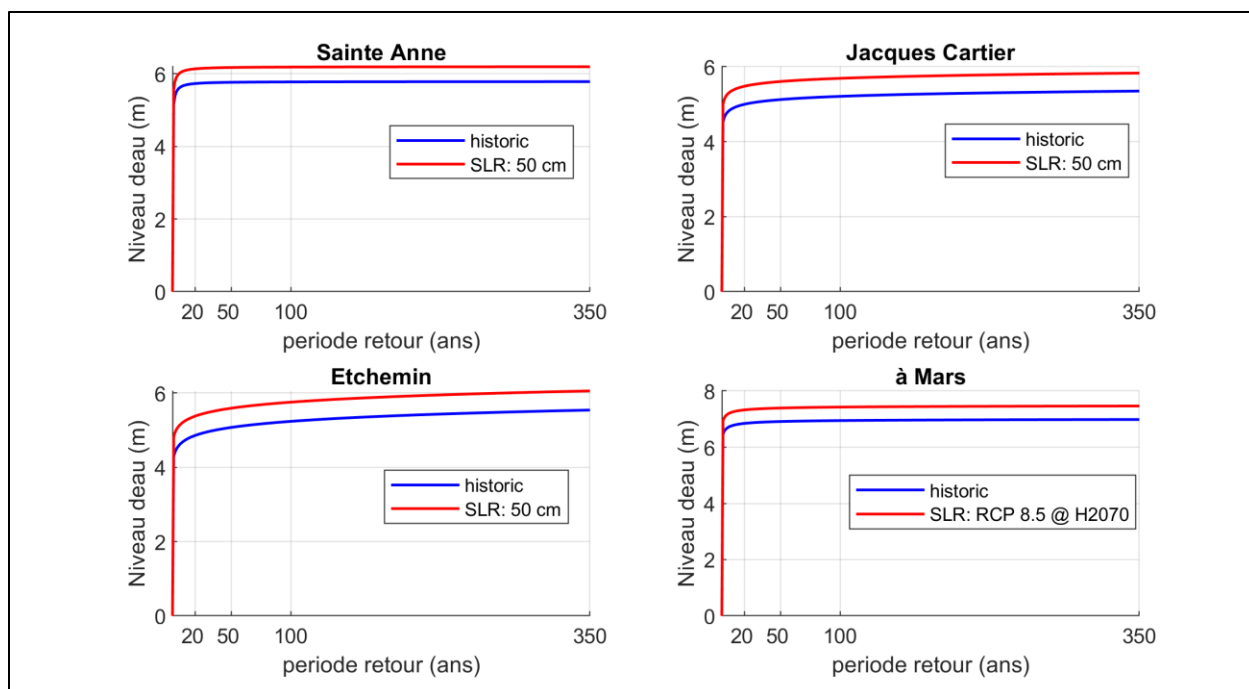


Figure 19. Comparaison du niveau d'eau extrême dans le scénario rehaussement marin (rouge), par rapport au scénario de référence (bleu).

Afin d'évaluer l'effet du rehaussement marin sur les crues conjointes, la corrélation de Mann-Kendall et Spearman entre les variables de la série $WL50cm_{cond}Q$ sont recalculées et présentées à la Figure 20. On note que la corrélation augmente par rapport au cas de référence (Figure 7), mais demeure toujours non significative ($p\text{-value} > 0,05$). Pour la rivière à Mars, comme la série temporelle du niveau d'eau futur n'est construite qu'en ajoutant le rehaussement marin à la série temporelle de niveaux d'eau historiques, la corrélation reste inchangée. Par conséquent, la méthodologie décrite et utilisée à la section précédente (copules indépendantes) est aussi proposée pour intégrer l'impact du rehaussement marin sur les inondations conjointes en climat futur.

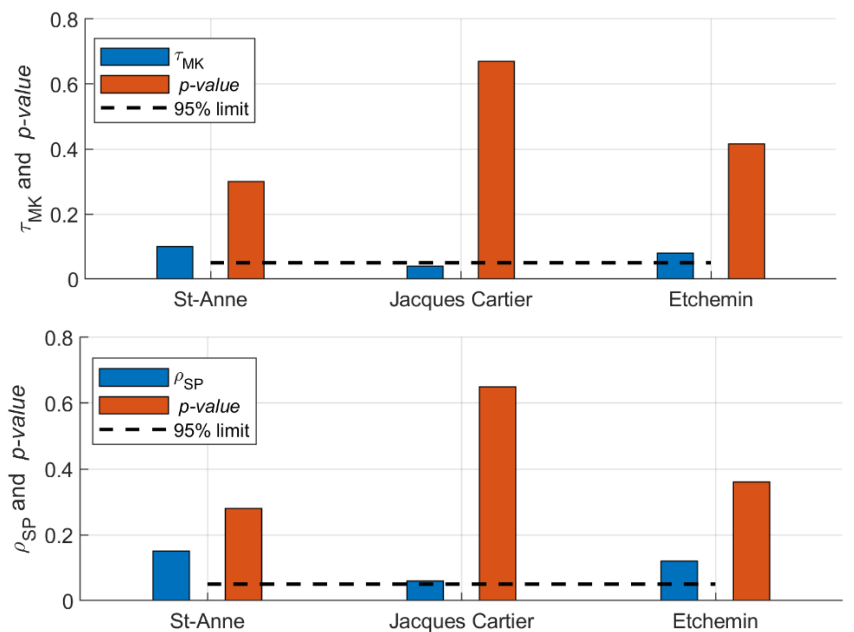


Figure 20. Les coefficients de corrélation de Kendall (τ) et Spearman (ρ) entre les variables de la série **WL50cm_{cond}Q**. La ligne pointillée représente la limite de confiance de 95%.

Le Tableau 11 présente les paramètres de distribution ajustés à la variable conditionnée pour la série WL50cm_{cond}Q (niveau d'eau) et le Tableau 12 présente les scénarios Q-H correspondants à WL50cm_{cond}Q. Afin de visualiser l'impact du rehaussement marin sur l'occurrence des crues conjoints, les scénarios présentés dans le Tableau 12 sont comparés à ceux du Tableau 7 où l'effet du rehaussement marin n'est pas présent (Figure 21Figure 24). On constate que le rehaussement marin rend le scénario 1 jusqu'à 10 fois plus fréquent en conditions futures.

Cette augmentation de la fréquence des événements conjoints est plus prononcée pour les scénarios 1 et 2 et devient progressivement moins importante pour les scénarios 5, 6 et 7. Cela s'explique par le fait que les crues conjoints, pour la série WL50cm_{cond}Q, deviennent de plus en plus dominées par les débits extrêmes, plutôt que par les niveaux d'eau. La rivière à Mars est celle qui illustre l'augmentation la plus forte du scénario 1, où le H₁₀₀ historique devient environ un H₄ en considérant le rehaussement marin.

Tableau 11. Paramètres de la distribution ajustée à la variable conditionnée de la série (WL50cm_{cond}Q).

Exutoire	Nom de la distribution	Paramètre 1	Paramètre 2	Paramètre 3
Sainte-Anne	Rician	s = 4.91	$\sigma = 0.557$	-
Jacques-Cartier	Nakagami	$\mu = 20.859$	$\omega = 17.84$	-
Etchemin	Inverse Gaussian	$\mu = 3.854$	$\lambda = 276.737$	-
À Mars	Generalized Pareto	$\kappa = -1.125$	$\sigma = 2.31$	$\theta = 4.75$

Tableau 12. Scénarios niveau-débit basés sur la série WL50cm_{cond}Q pour une probabilité au dépassement de 1% à l'exutoire Sainte-Anne, Jacques-Cartier, Etchemin, et À Mars*.

	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}	$\hat{H}$
Sainte-Anne	267.2	6.2	482.5 ₃	6.09	611.35	5.86	691.08	5.66	763.9 ₆	5.41	854.07	4.95	919.1 ₁	3.52
Jacques-Cartier	290.7	5.31	507.6 ₀	5.17	645.05	4.97	730.3	4.80	808.3	4.58	904.8	4.19	974.6	3.24
Etchemin	185.4	5.03	357.1	4.87	443.0	4.64	492.9	4.45	536.8	4.23	589.1	3.83	625.7	2.99
À Mars	42.1	6.79	88.5	6.78	123.1	6.73	146	6.65	167.7	6.47	195.5	5.86	216.1	4.75

* La série de niveaux d'eau pour la rivière à Mars correspond à un rehaussement marin de 48,2 cm (95 percentile du scénario RCP 8.5 pour l'horizon 2070)

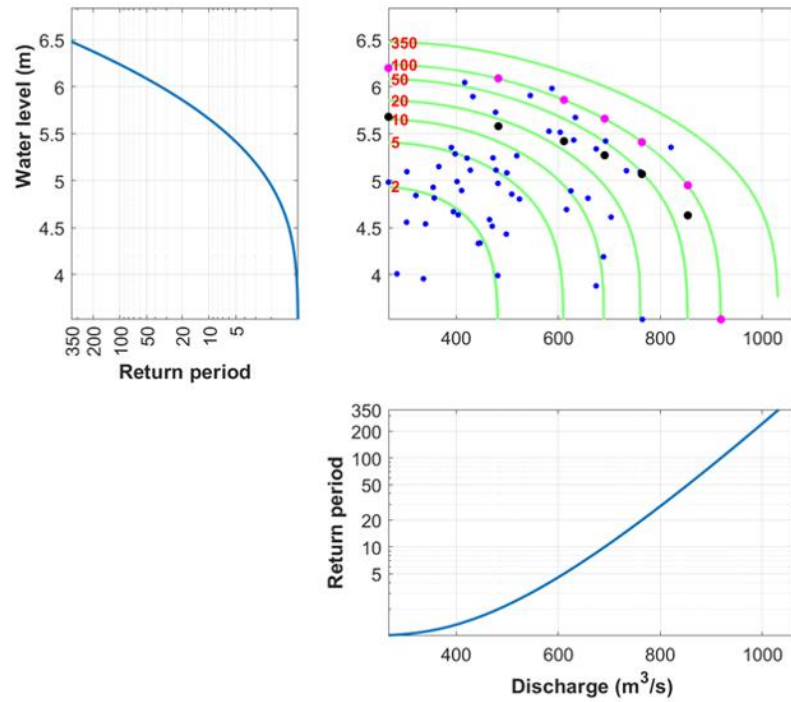


Figure 21. Isolignes des crues conjointes pour $WL_{50cm_{cond}Q}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire **Sainte-Anne**. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$.

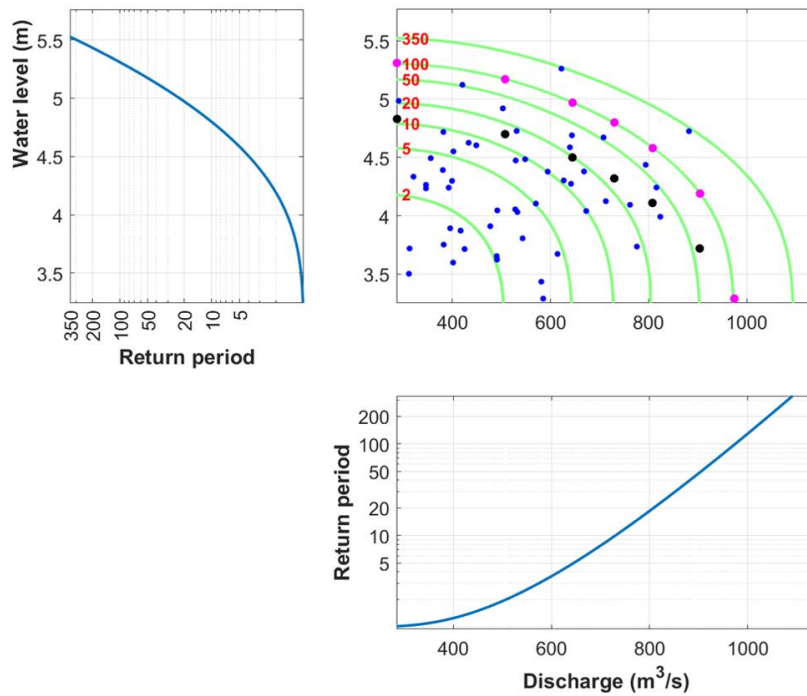


Figure 22. Isolignes des crues conjointes pour $WL_{50cm_{cond}Q}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire **Jacques-Cartier**. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$.

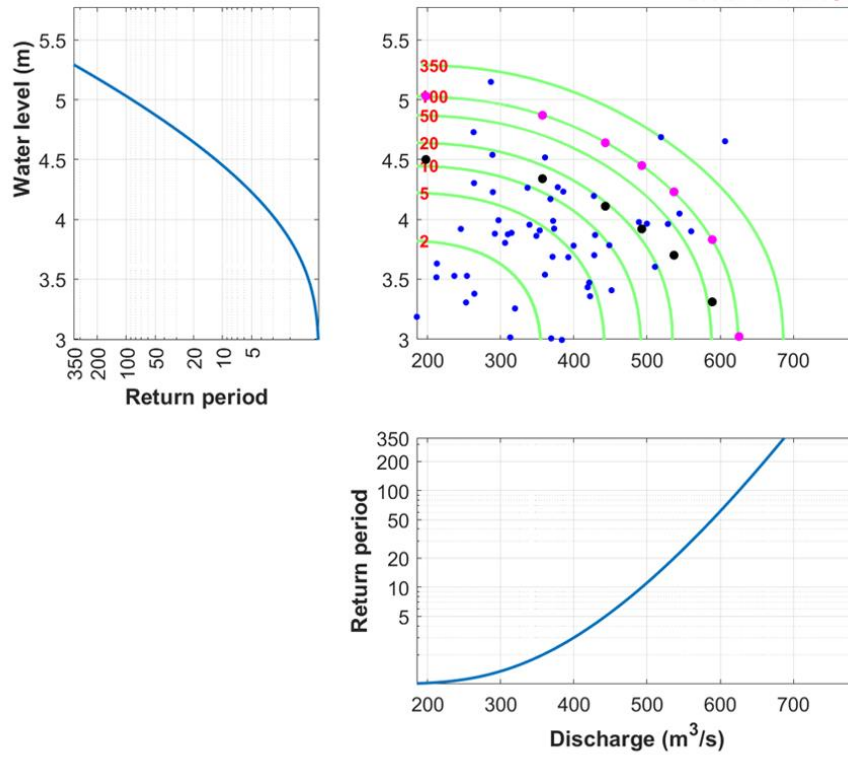


Figure 23. Isolignes des crues conjointes pour $WL_{50cm_{cond}Q}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire à **Etchemin**. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$.

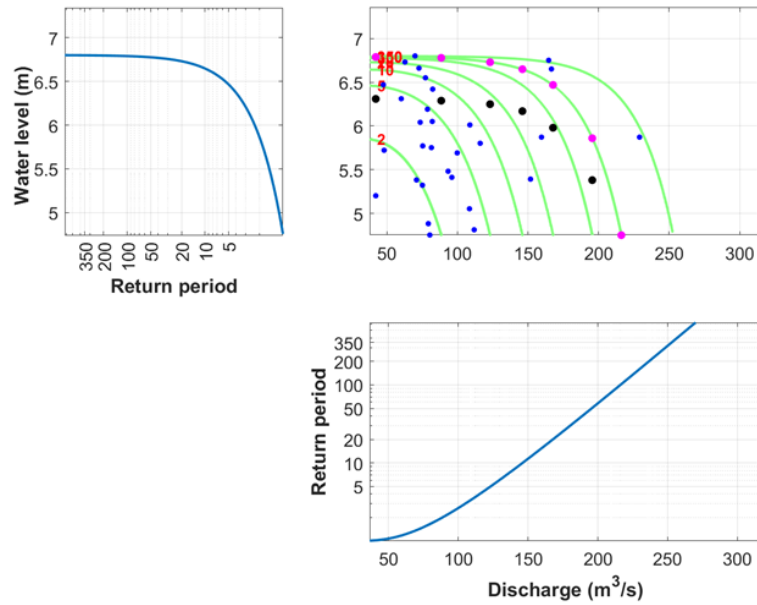


Figure 24. Isolignes des crues conjointes pour $WL_{50cm_{cond}Q}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire à **Mars**. Les points noirs montrent les scénarios pour $WL_{cond}Q$.

Les scénarios Q-H associés à la série $Q_{\text{cond}}\text{WL50cm}$ sont présentés dans le Tableau 13 et visualisés aux figures Figure 25 Figure 28. On peut voir que pour l'exutoire de la rivière Sainte-Anne, les différences de période de retour pour les scénarios Q-H avec et sans rehaussement marin diminuent entre les scénarios 1 à 7. Pour la rivière Jacques-Cartier, les scénarios Q-H de récurrence 100 ans en période historique se situent sur l'isoline de 5 à 10 ans en période future. Par conséquent, le rehaussement marin rend les extrêmes historiques de 100 ans de 10 à 20 fois plus fréquents. Pour Etchemin, les résultats indiquent plutôt un facteur d'augmentation de 5 à 10 pour les événements historiques de 100 ans de période de retour. Comme pour la série $Q_{\text{cond}}\text{WL50cm}$ précédemment, c'est la rivière à Mars qui démontre l'effet le plus prononcé du rehaussement marin sur les fréquences d'occurrences des crues conjointes.

Tableau 13. Scénarios niveau-débit basés sur la série $Q_{\text{cond}}\text{WL50cm}$ pour une probabilité au dépassement de **1%** à l'exutoire Sainte-Anne, Jacques-Cartier, Etchemin et À Mars*.

	<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}	$\hat{H}$
Sainte-Anne	29.74	6.18	291.2	6.17	443.8	6.13	530.8	6.07	605.4	5.94	691.8	5.55	750.6	4.89
Jacques-Cartier	13.88	5.69	181.1	5.61	313	5.48	390.2	5.37	456.8	5.24	534.2	5.00	586.9	4.42
Etchemin	3.96	5.76	37.97	5.60	124.6	5.38	208.7	5.22	301.2	5.06	431.2	4.82	533.4	4.44
À Mars	4.1	7.43	8.10	7.39	18.09	7.33	28.36	7.25	41.79	7.14	66.05	6.94	91.03	6.7

* La série de niveaux d'eau pour la rivière À Mars correspond à un rehaussement marin de 48,2 cm (95 percentile du scénario RCP 8.5 pour l'horizon 2070)

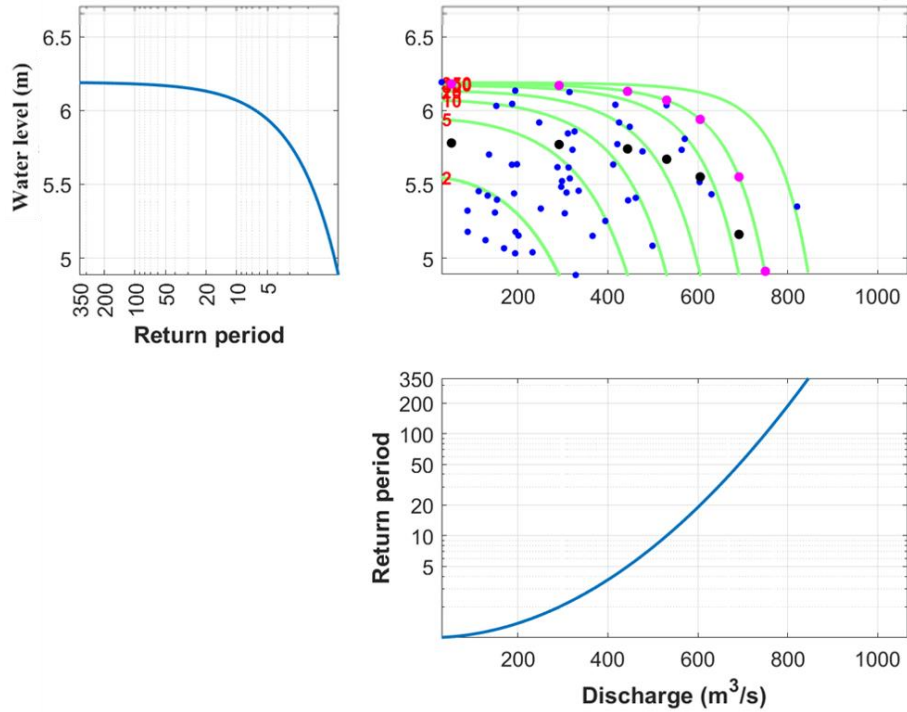


Figure 25. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{\text{cond}} \text{WL50cm}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire **Sainte-Anne**. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{\text{cond}} \text{WL}$.

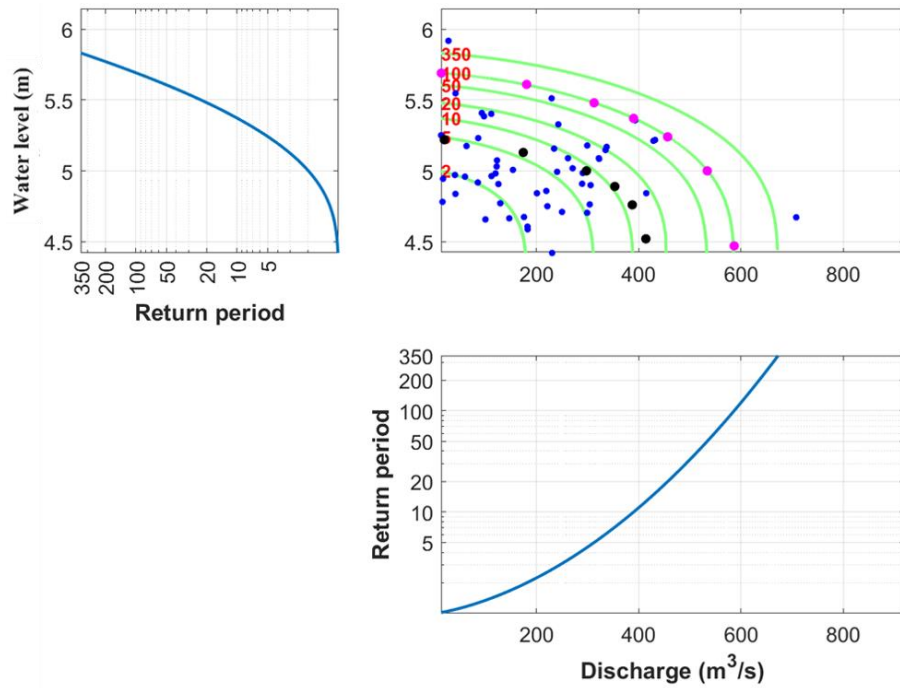


Figure 26. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{\text{cond}} \text{WL50cm}$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire **Jacques-Cartier**. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{\text{cond}} \text{WL}$.

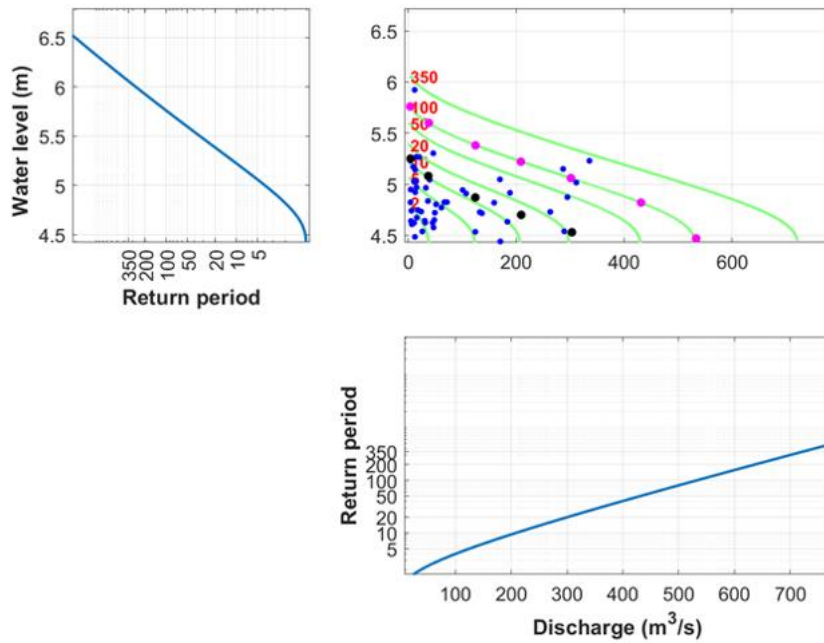


Figure 27. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{cond}WL50cm$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire **Etchemin**. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{cond}WL$.

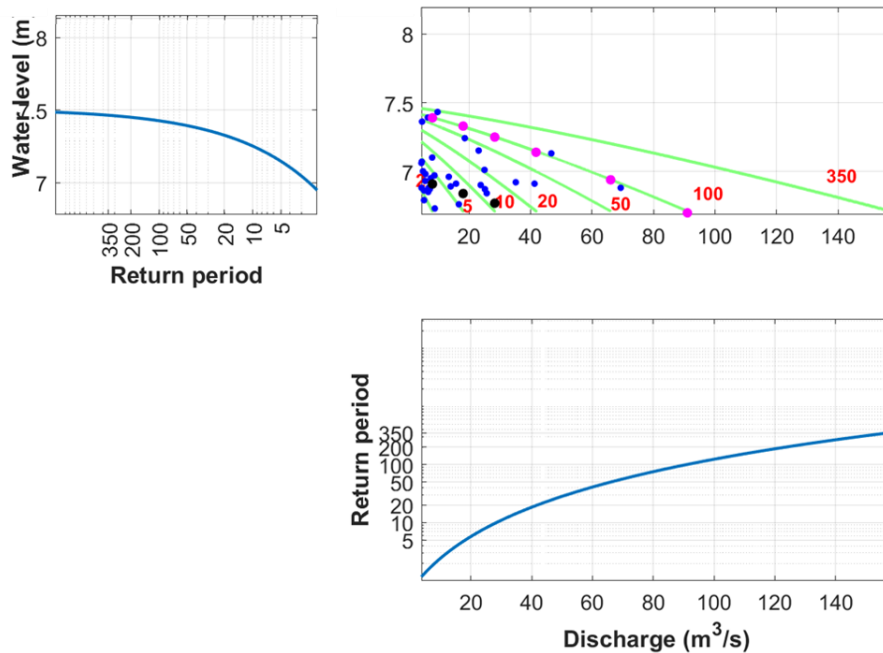


Figure 28. Isolignes des crues conjointes pour $Q_{cond}WL50cm$, ainsi que les scénarios sélectionnés (mauve) associés à l'événement conjoint de 100 ans à l'exutoire à **Mars**. Les points noirs montrent les scénarios pour $Q_{cond}WL$.

6.CONCLUSION

Dans ce projet, l'analyse statistique des crues conjointes (débit-niveau d'eau) aux exutoires des rivières Sainte-Anne, Jacques-Cartier, Etchemin et à Mars, dans le contexte de rehaussement marin, a été présentée. Puisqu'aucune corrélation significative n'a été détectée entre les débits maxima et le niveau d'eau maximum dans l'intervalle de ± 1 jour, une méthodologie reposant sur la copule indépendante et un scénario de type AND a été utilisée. Nous avons utilisé la copule indépendante pour calculer les isolignes des événements conjoints de 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans pour deux situations : lorsque le débit de la rivière est la variable principale de la crue conjointe et que le niveau d'eau est la variable conditionnelle ($WL_{\text{cond}}Q$), et lorsque le niveau d'eau est la variable principale de la crue conjointe et que le débit de la rivière est la variable conditionnée ($Q_{\text{cond}}WL$). Pour chacune de ces deux séries, les paramètres des distributions statistiques, ainsi que 7 paires de débit-niveau d'eau, créées en exemple pour un événement d'une période de retour de 100 ans, ont été fournies. Ces paires de débit-niveau couvrent une gamme de combinaisons possibles dont la période de retour conjointe est de 100 ans. Ces scénarios pourront être utilisés comme intrants dans le modèle hydraulique pour délimiter la zone inondable correspondant aux exutoires des rivières. La méthodologie développée est donc une version bonifiée de la méthode FEMA pour l'analyse des événements conjoints pour les exutoires où les extrêmes de débit et de niveau d'eau sont indépendants l'un de l'autre. À la lumière des résultats présentés, on peut conclure que :

1- Tous les exutoires des rivières du LOT 1 ont une corrélation non-significative (valeur de probabilité supérieure à 0,05) entre les paires d'extrêmes, définies comme le débit maximum annuel et le niveau d'eau maximum dans un intervalle de ± 1 jour en période historique (1968-2019 pour Sainte-Anne, Jacques-Cartier, Etchemin et 1975-2019 pour à Mars), ou vice-versa. Le coefficient de corrélation le plus élevé se trouve à la rivière Sainte-Anne, où le niveau d'eau et le débit maximums se produisent tous les deux au printemps, mais avec environ deux semaines de décalage.

2- Les simulations du modèle de MPO avec le rehaussement marin à la condition limite aval du modèle (Saint-Joseph-de-la-Rive) ne semblent pas modifier de façon significative le moment des pics de niveau d'eau, et, donc, les deux variables extrêmes demeurent indépendantes. Cette conclusion est cependant influencée par plusieurs simplifications qui ont été nécessaires pour pouvoir réaliser ces simulations. Par exemple, les simulations

de rehaussement marin ne tiennent pas compte des changements possibles dans les conditions météorologiques, ainsi que des changements dans les débits du fleuve Saint-Laurent ou 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.

3- Le rehaussement marin a un impact majeur sur les niveaux d'eau moyens et extrêmes futurs, ce qui influence donc la fréquence d'occurrence des crues conjointes. Les paires Q-H associées à un événement conjoint de 100 ans construit avec le niveau d'eau historique deviennent des événements de 5 à 10 ans si un rehaussement marin de 50 cm est considéré. Cela montre l'importance de considérer le rehaussement marin dans la cartographie des zones inondables des exutoires du projet.

4- L'analyse des crues conjointes à l'exutoire de la rivière à Mars est basée sur des observations à la station de Port-Alfred pour laquelle il manque plusieurs années de données. De plus, le manque d'information quant au niveau de rehaussement attendu dans la rivière Saguenay nous force à faire des hypothèses et introduit une incertitude additionnelle sur les résultats présentés pour cet endroit. Le développement d'un modèle hydraulique pour la rivière Saguenay, tel que le modèle de MPO utilisé dans ce projet, permettrait de valider et/ou d'améliorer les résultats présentés ici.

5- Suite à des discussions avec la DEH, et en absence de causes claires permettant d'expliquer les tendances observées dans certains jeux de données, les analyses fréquentielles ont été réalisées sur une base stationnaire. L'analyse des niveaux d'eau maxima annuels montre toutefois une tendance négative à la fois pour le fleuve Saint-Laurent et pour la rivière Saguenay. Tandis que les tendances pour la rivière Saguenay demeurent difficiles à expliquer avec les connaissances actuelles, la régulation du fleuve et la diminution des débits dans les dernières décennies pourraient expliquer en partie les tendances du fleuve Saint-Laurent. À ce stade-ci, les séries temporelles, pour l'horizon historique et futur, ont donc toutes été considérées comme étant stationnaire, ce qui a un impact sur les résultats présentés. Une analyse plus approfondie des tendances pourrait être réalisée dans des travaux futurs si nécessaires.

RÉFÉRENCES

- [1] FEMA, “Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping,” Federal Emergency Management Agency (FEMA), 35, 2020.
- [2] H. Moftakhari, 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. Moftakhari, G. Salvadori, A. AghaKouchak, B. F. Sanders, and R. A. Matthew, “Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 114, no. 37, pp. 9785–9790, Sep. 2017.
- [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,” *Earths Future*, vol. 9, no. 5, p. e2021EF002055, 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*, vol. 9, no. 5, Art. no. 5, 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,” *Sustainability*, vol. 10, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2018, doi: 10.3390/su10072232.
- [7] N. B. Bernier, “Annual and seasonal extreme sea levels in the Northwest Atlantic: Hindcasts over the last 40 years and projections for the next century,” 2006, Accessed: Apr. 29, 2021. [Online]. Available: <https://DalSpace.library.dal.ca/handle/10222/54801>
- [8] H. Zhang and J. Sheng, “Estimation of extreme sea levels over the eastern continental shelf of North America,” *J. Geophys. Res. Oceans*, vol. 118, no. 11, pp. 6253–6273, 2013, doi: 10.1002/2013JC009160.
- [9] S. Muis *et al.*, “A High-Resolution Global Dataset of Extreme Sea Levels, Tides, and Storm Surges, Including Future Projections,” *Front. Mar. Sci.*, vol. 7, 2020, doi: 10.3389/fmars.2020.00263.
- [10] D. Lefaivre, A. D’Astous, and P. Matte, “Hindcast of Water Level and Flow in the St. Lawrence River Over the 2005–2012 Period,” *Atmosphere-Ocean*, vol. 54, no. 3, pp. 264–277, May 2016, doi: 10.1080/07055900.2016.1168281.
- [11] M. Sadegh *et al.*, “Multihazard Scenarios for Analysis of Compound Extreme Events,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 45, no. 11, pp. 5470–5480, 2018, doi: 10.1029/2018GL077317.
- [12] F. Zheng, S. Westra, M. Leonard, and S. A. Sisson, “Modeling dependence between extreme rainfall and storm surge to estimate coastal flooding risk,” *Water Resour. Res.*, vol. 50, no. 3, pp. 2050–2071, 2014, doi: 10.1002/2013WR014616.
- [13] 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, p. eaaw5531, doi: 10.1126/sciadv.aaw5531.
- [14] 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,” Geological Survey of Canada, Canada, 8764, 2021. [Online]. Available: https://geoscan.nrcan.gc.ca/text/geoscan/fulltext/of_8764.pdf

- [15] 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, 2021, doi: 10.1029/2020GL092064.
- [16] 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, 2021, doi: 10.1029/2020GL091741.

Annexe A

Les résultats de l'analyse statistique associée à chaque exutoire de la rivière sont mis dans des dossiers avec les noms des exutoires. Chaque dossier contient les fichiers suivants :

1-XX_Hmax_annual.csv : Les niveaux d'eau maximums annuels avec la date et l'heure de l'occurrence. XX est le nom de l'exutoire : Sainte_Anne, Etchemin, Jacques_Cartier, à_Mars.

2- XX_Hmax_annual_50cm.csv : Les niveaux d'eau maximums annuels avec la date et l'heure d'occurrence des maximums pour le scénario rehaussement marin de 50 cm.

3- XX_Hmax_annual_100cm.csv : Les niveaux d'eaux maximums annuels avec la date et l'heure d'occurrence des maximums pour le scénario rehaussement marin de 1 m.

4- XX_Qmax_annual.csv : Les débits maximums annuels avec date et heure d'occurrence des maximums.

5-XX_Hmax_at_Qmax.csv : Les débits maximums annuels (en m^3/s) ainsi que les niveaux d'eau maximums dans l'intervalle de ± 1 jour (colonne $W_{\text{max}}(\text{m})$) pour le scénario référence (sans rehaussement marin).

6-XX_Hmax_at_Qmax_50cm.csv : Les débits maximums annuels ainsi que les niveaux d'eau maximums dans intervalle de ± 1 jour (colonne $W_{\text{max}}(\text{m})$) pour le scénario rehaussement marin de 50cm.

7- XX_Hmax_at_Qmax_100cm.csv : Les débits maximums annuels (en m^3/s) ainsi que les niveaux d'eau maximums dans l'intervalle de ± 1 jour (colonne $W_{\text{max}}(\text{m})$) pour le scénario rehaussement marin de 1 m.

8-XX_Qmax_at_Hmax.csv : Les niveaux d'eau maximums annuels (en m) ainsi que les débits maximums dans son intervalle de ± 1 jour (colonne $Q_{\text{max}}(\text{m}^3/\text{s})$) pour le scénario référence (sans rehaussement marin).

9-XX_Qmax_at_Hmax_50cm.csv : Les niveaux d'eau maximums annuels (en m) ainsi que les débits maximums dans son intervalle de ± 1 jour (colonne $Q_{\text{max}}(\text{m}^3/\text{s})$) pour le scénario rehaussement marin de 50 cm.

10-XX_Qmax_at_Hmax_100cm.csv : Les niveaux d'eau maximums annuels (en m) ainsi que les débits maximums dans son intervalle de ± 1 jour (colonne $Q_{\text{max}}(\text{m}^3/\text{s})$) pour le scénario rehaussement marin de 1 m.

11-RP_wl_50cm.csv : Analyse fréquentielle de niveau d'eau pour le scénario rehaussement marin de 50 cm.

12-RP_wl_100cm.csv : Analyse fréquentielle de niveau d'eau pour le scénario rehaussement marin de 1 m.



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

