



**Analyse statistique des inondations
conjointes aux exutoires des rivières
visées par les travaux d'INFO-Crue dans
le contexte des changements
climatiques**

2^e Livrable du LOT3
Décembre 2022

Analyse statistique des inondations conjointes aux exutoires des rivières visées par les travaux d'INFO-Crue dans le contexte des changements climatiques

2^e Livrable du LOT3

Décembre 2022

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., (2022). *Analyse statistique des inondations conjointes aux exutoires des rivières visées par les travaux d'INFO-Crue dans le contexte des changements climatiques*. Rapport présenté à Direction principale des prévisions hydriques et de la cartographie du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. 2^e Livrable du LOT3, 31 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	i
Liste des tableaux.....	i
Liste des abréviations, sigles et acronymes.....	ii
Résumé.....	1
1. Introduction.....	2
2. Méthodologie	5
2.1 Bases de données de débits et niveaux d'eau	5
2.2 Scénarios de rehaussement marin.....	8
2.3 Analyse d'événements de crues conjointes par copules	8
2.3.1 Sélection de la meilleure fonction de copule	9
2.3.2 Estimation des paramètres de la fonction de copule	11
2.3.3 Analyse fréquentielle bivariée et sélection des paires débit-niveau d'eau associées aux récurrences	13
3. Résultats et discussions	14
3.1 Analyse des crues conjointes avec/sans la prise en compte de la dépendance	14
3.1.1 Différences de FM pour une corrélation similaire	17
3.1.2 Différences de FM pour des rivières voisines.....	19
3.2 Analyse de l'effet du rehaussement marin sur la récurrence des inondations conjointes	21
3.2.1 Secteur fluvial	21
3.2.2 Rivière du Moulin	24
4. Conclusions	26
Annexe A	28
Références	29

LISTE DES FIGURES

Figure 1. L'emplacement des exutoires du LOT3 du projet (cercles bleus), ainsi que des stations marégraphiques (étoiles rouges).	3
Figure 2. Relation entre le niveau d'eau maximum journalier aux stations Port-Alfred (axe X) et Chicoutimi (axe Y), ainsi que la régression linéaire (ligne rouge) et l'équation correspondante. Les deux observations de 2017-07-28 et 2019-12-19 ne sont pas prises en compte.	6
Figure 3. Diagrammes de Chi pour l'ensemble des paires de débit-niveau d'eau conjointes (a), ainsi que pour les queues supérieures (b) et inférieures (c) correspondant à la série $Q_{cond}WL$ pour la rivière Saint-Maurice. Les traits pointillés horizontaux délimitent la zone de l'hypothèse d'indépendance associée à un niveau de confiance de 95%.....	11
Figure 4. Isolignes de la crue conjointe pour une période de retour de 100 ans (lignes multicolores) de la série $WL_{cond}Q$. La couleur indique la probabilité de la paire Q-H. La ligne rouge illustre une copule indépendante équivalente qui croiserait le maximum de vraisemblance (cercle rouge). La période de retour de cette copule indépendante est indiquée en rouge. Le nom de l'exutoire et la fonction de copule sélectionnée sont indiqués dans le titre de chaque panneau.	15
Figure 5. Semblable à la Figure 4, mais pour la série $Q_{cond}WL$	16
Figure 6. Les nuages de pseudo-observations et les diagrammes de Kendall pour l'exutoire des rivières Richelieu et Batiscan correspondant à la série $Q_{cond}WL$	18
Figure 7. Diagrammes de Chi pour l'ensemble des paires débit-niveau d'eau conjoint correspondant à la série $Q_{cond}WL$ de la rivière Batiscan (a), ainsi que pour les queues supérieures (b) et inférieures (c). Les traits pointillés horizontaux délimitent la zone de l'hypothèse d'indépendance associée à un niveau de confiance de 95%.....	18
Figure 8. Les nuages de pseudo-observations et les diagrammes de Kendall pour l'exutoire des rivières Yamaska et Saint-François correspondant à la série $Q_{cond}WL$	20
Figure 9. Semblable à la Figure 8, mais pour les rivières Yamaska et Saint-François.....	20
Figure 10. Différence (en mètre) dans le niveau d'eau moyen annuel entre la période historique et future aux exutoires dans le tronçon fluvial.	22
Figure 11. Courbes de probabilité pour un événement de période de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour la série $WL_{cond}Q$ dans l'horizon futur, ainsi que les paires Q-H correspondant au maximum de vraisemblance (cercles roses). L'étoile noire indique le Q-H associé à la courbe de 100 ans dans l'horizon historique. Les cercles gris montrent le jeu de données conjoint.....	23
Figure 12. Semblable à la Figure 11 mais pour la série $Q_{cond}WL$	24
Figure 13. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ à l'exutoire de la rivière du Moulin, ainsi que les paires Q-H sélectionnées (mauve) associées à l'événement conjoint de 100 ans en incluant le rehaussement marin. Les points noirs montrent les paires Q-H choisie pour la récurrence conjointe de 100 ans en climat actuel.	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des exutoires adressés par le LOT3 du projet, ainsi que de la méthodologie utilisée pour estimer les niveaux d'eau aux différents exutoires	7
Tableau 2. Les 4 meilleures fonctions de copules selon la métrique BIC pour le cas de rivière Saint-Maurice (série WL_{condQ}).....	10

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

DPPHC	Direction principale des prévisions hydriques et de la cartographie
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 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

Ce document sert de deuxième livrable pour le 3^e LOT du projet *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*. Comme pour les LOTS 1 et 2, la librairie MhAST (*Multi-hazard Assessment and Scenario Toolbox*) (Sadegh et al., 2018) est utilisée pour l'analyse des crues conjointes et le calcul des paires de débit-niveau d'eau (Q-H) associées aux récurrences de 2, 100 et 350 ans. Le travail est effectué pour onze exutoires situées dans le tronçon fluvial du fleuve Saint-Laurent, soit **Maskinongé, Nicolet, Saint Maurice, Batiscan, du Loup, Saint-François, Yamaska, Bécancour, Richelieu, Assomption et Châteauguay**. La rivière **du Moulin**, qui se jette dans le Saguenay, est également analysée. Contrairement aux exutoires étudiés précédemment, la corrélation est statistiquement significative entre le débit et le niveau d'eau des séries conjointes $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ pour les exutoires situés dans le secteur fluvial, ce qui nécessite l'ajustement d'une fonction de copule pour le calcul des récurrences conjointes. Pour la rivière du Moulin, par contre, la méthodologie correspond à celle appliqué aux exutoires des LOTS 1 et 2, qui consiste à sélectionner sept couples de débits-niveau d'eau sur l'isoligne de la copule indépendante.

La comparaison des isolignes des crues conjointes avec et sans la prise en compte de la dépendance entre le débit et le niveau d'eau montre que l'impact de la sous-estimation potentielle provenant de l'hypothèse d'indépendance n'est pas identique entre les rivières et est plus important lorsque la dépendance se trouve dans la queue supérieure de la distribution conjointe (copule extrême). De plus, l'analyse effectuée démontre que l'impact du rehaussement marin est le plus fort pour la rivière Batiscan (l'événement de 100 ans historique devient un événement de 20 ans) et diminue graduellement le long du fleuve, pour éventuellement devenir nul pour les rivières Richelieu et Assomption.

Le répertoire accompagnant ce rapport contient les débits et les niveaux d'eau associés aux crues conjointes de 2, 100 et 350 ans aux exutoires nommés ci-dessus, en période historique (1968-2020) et en période future (2070-2100).

1. 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, ce qui aura pour conséquence de rendre plus fréquents des niveaux d'eau considérés extrêmes aujourd'hui.

L'objectif de cette partie du projet est d'analyser les crues conjointes de 12 exutoires de rivières identifiées dans le projet INFO-Crue (voir la Figure 1) et de fournir les données nécessaires afin de cartographier les zones inondables à 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 en amont est forcée par le débit de crue de T ans, et la condition limite en aval est forcée par une valeur de niveau d'eau correspondant au niveau moyen des marées hautes.

2- La condition limite en amont est forcée par un débit moyen journalier et la condition limite en 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.

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. 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 avec une période de retour de T ans pourrait être le produit de conditions qui ne font pas partie des scénarios considérés par la méthode FEMA.

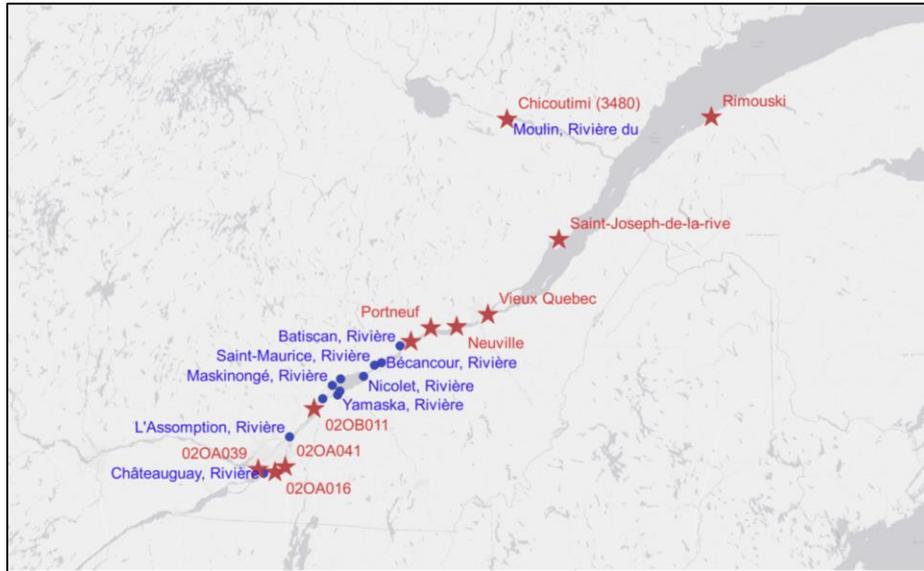


Figure 1. L'emplacement des exutoires du LOT3 du projet (cercles bleus), ainsi que des stations marégraphiques (étoiles rouges).

Pour adresser ces lacunes, une deuxième méthode basée sur une analyse extrême bivariable peut être utilisée pour déterminer la période de retour d'un événement de crue conjointe pour lequel le débit et le niveau d'eau sont corrélés (Moftakhari et al., 2019). Alors que cette approche a souvent été utilisée pour l'analyse d'événements pour lesquels les variables d'intérêt 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 des fonctions de distribution des deux variables. La fonction de copule représentant le mieux le comportement conjoint est identifiée en utilisant des métriques numériques ainsi que les méthodes visuelles présentées dans le premier rapport du LOT3 (diagrammes de Kendall, Chi, et nuage de pseudo-observations). Pour chacune des rivières, la copule sélectionnée est ensuite utilisée pour le calcul des récurrences conjointes de 2, 100 et 350 ans pour les paires Q-

H nécessaires au modèle hydraulique. Une analyse similaire a aussi été effectuée en contexte de changement climatique en utilisant un rehaussement du niveau de la mer correspondant au 50^e percentile du scénario RCP 8.5 en fin de siècle. Finalement, les couples de débit-niveau d'eau correspondants à la récurrence conjointe de 100 ans avec et sans rehaussement marin ont été comparés afin de quantifier l'effet potentiel du rehaussement marin sur la fréquence des crues conjointes.

Une analyse similaire est effectuée pour la rivière du Moulin, qui est la seule rivière du LOT3 dont l'embouchure ne se situe pas dans le fleuve Saint-Laurent. Il s'agit toutefois d'un cas plus simple de copule indépendante qui suit la méthodologie développée et décrite dans les rapports précédents (i.e. sept scénarios Q-H).

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Bases de données de débits et niveaux d'eau

Tel que détaillé dans le rapport des LOT1 et LOT2, l'analyse fréquentielle bivariée effectuée dans ce projet utilise les débits et les niveaux d'eau extrêmes dérivées de leurs séries temporelles respectives. Les débits journaliers proviennent du Portrait hydrologique produit par la DPPHC (<https://cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/>) et ont été fournis pour l'ensemble des tronçons d'intérêt pour la période 1968-2020. Ils ont été utilisés pour calculer les débits de récurrence 2 à 350 ans, ainsi que pour identifier les paires de Q-H dans l'analyse statistique bivariée. Toutefois, les données de niveau d'eau proviennent de différentes sources, tel qu'identifié au Tableau 1.

Pour les exutoires situés dans le tronçon fluvial du fleuve (voir la Figure 1), à savoir les rivières Batiscan, Bécancour, Saint-Maurice, Nicolet, du Loup, Maskinongé, Saint-François, Yamaska, Richelieu et Assomption, 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 fournissent le niveau d'eau à l'embouchure des exutoires à un pas de temps horaire pour la période 1968-2020 et couvrent la région entre le lac Saint-Louis (Montréal) et Saint-Joseph-de-la-Rive (100 km à l'est de Québec). Il faut noter que les niveaux d'eau simulés sont en système référentiel vertical de SRIGL85, mais qu'ils 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.

Pour la rivière Châteauguay, les niveaux d'eau à la station Pointe-Claire (voir la Figure 1), située sur la rive nord du lac Saint Louis, ont été utilisés pour la création des jeux de données conjoints $WL_{\text{cond}}Q$ et $Q_{\text{cond}}WL$. Ces données se trouvaient déjà en système référentiel CGVD28.

Pour la rivière du Moulin, la station marégraphique la plus proche est celle de Chicoutimi (voir la Figure 1 pour l'emplacement), située à environ 1,6 km en amont de cet exutoire. Toutefois, cette station ne contient pas une grande quantité de données avant 2016. Par

conséquent, il a plutôt été décidé d'utiliser le niveau d'eau observé à la station Port-Alfred (située à La Baie, environ 40 km en aval) pour estimer les niveaux d'eau à la station Chicoutimi. Les données de cette station ont précédemment été utilisées pour analyser les exutoires des rivières à Mars et Ha! Ha!. Le nuage de points à la Figure 2 illustre les niveaux d'eau journaliers maximums mesurés aux stations de Port-Alfred (axe X) et de Chicoutimi (axe Y) pour leur période commune. La station Port-Alfred est en opération depuis 1975, mais possède des données manquantes pour l'année 2000, de janvier à juin 2001 et de 2014 à juillet 2017. La Figure 2 montre qu'il existe une forte ($R^2 = 0.92$, $p\text{-value} \rightarrow 0$) relation linéaire entre les niveaux d'eau des deux stations, à l'exception de deux événements les 28 juillet 2017 et 19 décembre 2019. En absence d'une justification physique pour ces valeurs, elles n'ont pas été considérées dans la régression linéaire utilisée pour reconstruire les niveaux d'eau manquants à la station Chicoutimi.

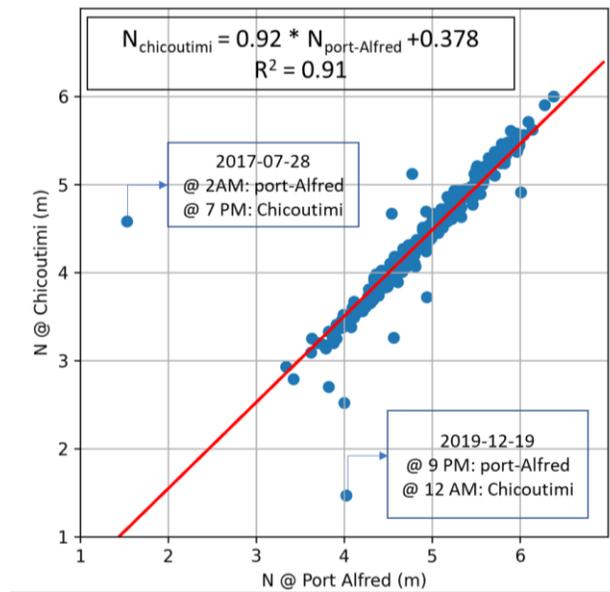


Figure 2. Relation entre le niveau d'eau maximum journalier aux stations Port-Alfred (axe X) et Chicoutimi (axe Y), ainsi que la régression linéaire (ligne rouge) et l'équation correspondante. Les deux observations de 2017-07-28 et 2019-12-19 ne sont pas prises en compte.

Tableau 1. Liste des exutoires adressés par le LOT3 du projet, ainsi que de la source des données utilisées pour estimer les niveaux d'eau aux embouchures.

<i>Rivière</i>	<i>Échéancier</i>	<i>Embouchure</i>	<i>Source de données niveau d'eau</i>
Maskinongé	Juin 2022	Fleuve amont	Simulation par le modèle MPO
Nicolet		Lac Saint-Pierre	Simulation par le modèle MPO
Saint-Maurice	Décembre 2022	Fleuve aval	Simulation par le modèle MPO
Batiscan		Fleuve aval	Simulation par le modèle MPO
du Loup		Lac Saint-Pierre	Simulation par le modèle MPO
Saint-François		Fleuve amont	Simulation par le modèle MPO
Yamaska		Fleuve amont	Simulation par le modèle MPO
Bécancour		Fleuve aval	Simulation par le modèle MPO
Richelieu		Fleuve amont	Simulation par le modèle MPO
Assomption		Embouchure rivière des Prairies	Simulation par le modèle MPO
Chateauguay		Fleuve amont	Station hydrométrique
du Moulin		Rivière Saguenay	Station marégraphique

2.2 Scénarios de rehaussement marin

Tel que discuté dans les rapports précédents, un rehaussement marin relatif (changement par rapport à la surface de la terre) correspondant au 50^e percentile projeté pour l'horizon 2100 par un ensemble de simulations CMIP5 forcées par le scénario d'émission RCP8.5 est utilisé (voir le Tableau 9 du rapport LOT1) (James et al., 2021). Ces projections de rehaussement relatif sont calculées en combinant la variation globale du niveau de la mer (l'ensemble de simulations CMIP5) et le mouvement vertical de la surface de la terre (ajustement isostatique), par rapport aux conditions de la période 1986-2005 (James et al., 2021). L'impact du rehaussement marin pour les exutoires situés le long du tronçon fluvial du Saint-Laurent est estimé à l'aide d'une simulation du modèle de MPO, où une hausse de 50 cm est utilisée comme condition limite du modèle à Saint-Joseph-de-la-Rive afin de reconstruire la série temporelle de niveaux d'eau aux exutoires. Pour la rivière Châteauguay, l'analyse effectuée par l'équipe de MPO démontre qu'un rehaussement marin de 50 cm à Joseph-de-la-Rive n'atteint pas le lac Saint-Louis, où se jette la rivière Châteauguay. Par conséquent, les récurrences de 2, 100 et 350 ans ne sont calculés que pour la période historique pour cet exutoire.

Finalement, pour la rivière du Moulin, en raison d'un manque d'information, la projection de rehaussement marin correspond à la valeur estimée à l'embouchure de la rivière Saguenay par James et al. (2021). Cette hypothèse est conservatrice, car la pente hydraulique du Saguenay est ignorée, de même que l'ajustement isostatique qui est plus élevé à Chicoutimi qu'à Tadoussac (voir la Figure 18 rapport LOT1 et la discussion aux pages 31 à 34).

2.3 Analyse d'événements de crues conjointes par copules

Deux séries conjointes, chacune basée sur les maxima annuels d'une variable et le maximum de l'autre dans un intervalle de ± 1 jour, sont utilisées en entrée pour l'analyse des crues conjointes. Cette méthode, aussi appelée « échantillonnage conditionnel », est appliquée dans plusieurs études similaires visant l'analyse des crues conjointes (Couasnon et al., 2020; Ganguli & Merz, 2019; Ghanbari et al., 2021; Lucey & Gallien, 2022; H. Moftakhari et al., 2019; Sadegh et al., 2018; Wahl et al., 2015; Ward et al., 2018).

Deux séries conjointes, soient $WL_{\text{cond}Q}$ et $Q_{\text{cond}WL}$, sont ainsi construites et la dépendance entre les deux variables est évaluée en utilisant le coefficient de corrélation de Kendall (τ). 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 la *valeur-p* < 0.05) ou indépendante (si la *valeur-p* > 0.05).

Dans le cas d'une copule indépendante, 7 paires de Q-H sont sélectionnées afin de couvrir une gamme de scénarios possibles (voir le rapport des LOT1 et LOT2 pour les détails d'application). Dans le cas d'une copule dépendante, la méthodologie consiste en trois étapes:

- 1- Sélection de la meilleure fonction de copule
- 2- Estimation des paramètres de la fonction de copule
- 3- Analyse fréquentielle bivariée

Ces étapes sont expliquées en détails dans les sections suivantes, ainsi que dans le premier livrable du LOT3 produit précédemment.

2.3.1 Sélection de la meilleure fonction de copule

La meilleure fonction de copule est sélectionnée à l'aide de méthodes visuelles et de métriques numériques (BIC, AIC ou la métrique de Cramér-Von-Mises). Tel que discuté dans le premier livrable du LOT3¹, il existe des cas où les métriques numériques ne sont pas en mesure de distinguer la meilleure fonction de copule ou de rejeter certaines fonctions inadéquates. Par exemple, le Tableau 2 présente les quatre fonctions de copule ayant retournées les plus petites valeurs du BIC à l'exutoire Saint-Maurice (série $WL_{\text{cond}Q}$). La différence est de 5.13 et de 5.33 entre les BIC des copules de Frank/Nelsen et les BIC de la copule gaussienne et de Galambos, respectivement. Selon le guide de Raftery (1995), une telle différence est considérée comme une « évidence positive », mais faible, que ces modèles sont différents. Or, ces fonctions de copule représentent la dépendance entre les variables conjointes de façon bien différente:

- Frank et Nelsen sont des copules symétriques, sans dépendance aux extrêmes.

¹ Bizhanimanzar, M., Rondeau-Genesse, G., Caron, L.-P., (2022). *Guide d'utilisation des méthodes visuelles pour l'analyse des crues conjointes par copule*. Rapport présenté à Direction de l'expertise hydrique du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 21 p. + annexe.

- Galambos appartient à la famille des copules extrêmes et vise la modélisation des dépendances dans la queue supérieure.
- La copule Gaussienne a une forme radiale symétrique, sans dépendance dans les queues supérieure/inférieure.

Il faut donc avoir recours à des tests supplémentaires afin de sélectionner la fonction de copule appropriée.

Tableau 2. Les 4 meilleures fonctions de copules selon la métrique BIC pour le cas de la rivière Saint-Maurice (série WL_{condQ}).

<i>Rang</i>	<i>Nom de la fonction de copule</i>	<i>BIC</i>
1	Frank	-447.19
2	Nelsen	-447.19
3	Galambos	-442.06
4	Gaussian	-441.9

Le diagramme de Chi pour cet exutoire (Figure 3) permet de déterminer qu'il existe une dépendance assez forte dans la queue supérieure, car les points dans la Figure 3b, sont tous situés au-dessus de la zone délimitant l'hypothèse d'indépendance (traits pointillés horizontaux). Ce résultat suggère que la copule de Galambos serait donc la plus appropriée dans le cas de cet exutoire, et démontre que les méthodes visuelles peuvent être considérées comme complémentaires aux métriques d'ajustement telles que le BIC utilisé pour mesurer l'adéquation de la copule sélectionnée (Sadegh et al., 2018).

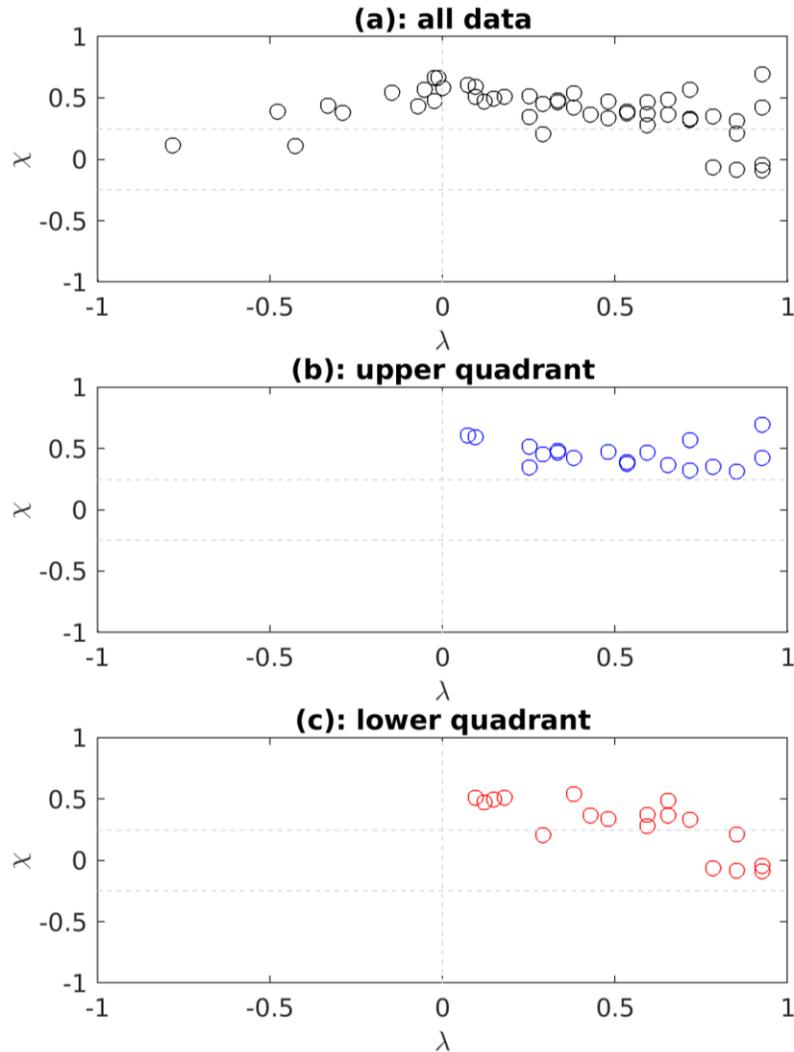


Figure 3. Diagrammes de Chi pour l'ensemble des paires de débit-niveau d'eau conjointes (a), ainsi que pour les queues supérieures (b) et inférieures (c) correspondant à la série Q_{condWL} pour la rivière Saint-Maurice. Les traits pointillés horizontaux délimitent la zone de l'hypothèse d'indépendance associée à un niveau de confiance de 95%.

2.3.2 Estimation des paramètres de la fonction de copule

Selon une revue de la littérature récente effectuée par Tootoonchi et al. (2022), les approches utilisées pour la paramétrisation des fonctions de copule se divisent en trois catégories, soit : paramétriques, non paramétriques et semi-paramétriques.

Dans l'approche paramétrique, la fonction de vraisemblance contient à la fois les paramètres des distributions marginales et ceux de la fonction de copule, et le tout est maximisé conjointement. Une autre méthode, toujours dans la catégorie des approches

paramétriques, s'appelle *Inference Function for Marginals (IFM)*, où les paramètres des distributions marginales sont d'abord déterminées, puis substituées dans la fonction de vraisemblance et maximisées pour dériver les paramètres de la copule (Tootoonchi et al., 2022). Un inconvénient important des approches paramétriques est qu'une bonne estimation des paramètres de la fonction de copule dépend d'hypothèses adéquates sur les distributions marginales. C'est pourquoi de nombreuses études déconseillent ce genre d'approche (Genest & Favre, 2007).

Dans l'approche non paramétrique, les paramètres de la copule sont dérivés sur la base de leurs relations théoriques avec les métriques de dépendance de Kendall ou de Spearman (Genest & Favre, 2007). Cette approche, alors, est moins appropriée pour les fonctions de copule complexes où la dérivation de la relation entre le T de Kendall et les paramètres de la copule n'est pas possible. Cet enjeu survient, par exemple, pour les fonctions de copule de type t ou BB1.

L'approche semi-paramétrique est celle utilisée dans la librairie MhAST. Dans ce type d'approche, les paramètres de la fonction de copule sont indépendants des distributions marginales et sont déterminés en maximisant la forme logarithmique (pour la simplicité et la stabilité numérique) de la fonction de vraisemblance. MhAST propose deux méthodes pour l'estimation des paramètres de copule : 1) l'optimisation locale et 2) l'approche *Markov-Chain Monte-Carlo* (MCMC) qui est basée sur la théorie de l'inférence bayésienne. Dans l'approche d'optimisation locale, un algorithme d'optimisation est utilisé pour trouver le paramètre optimal à partir de 30 valeurs initiales différentes, pour diminuer le risque de trouver un optimum local. Dans l'approche MCMC, différentes valeurs initiales pour les paramètres sont utilisées à chaque itération (pour 1000 itérations au total), ce qui garantit de trouver un optimum global. En outre, l'approche MCMC fournit la distribution *a posteriori* des paramètres, ce qui permet d'évaluer l'incertitude paramétrique de la copule. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est plus coûteuse en temps de calcul que la méthode d'optimisation locale. L'approche MCMC est celle utilisée dans ce projet pour l'estimation des paramètres des fonctions de copule.

2.3.3 Analyse fréquentielle bivariée et sélection des paires débit-niveau d'eau associées aux récurrences

La fonction de copule est utilisée pour le calcul des paires débit-niveau d'eau associées aux récurrences conjointes de 2 à 350 ans. Contrairement au cas univarié, l'analyse fréquentielle bivariée peut être définie sous deux formes différentes, connues sous le nom de scénarios *AND* et *OR* dans la littérature scientifique (Ghanbari et al., 2021; Lucey & Gallien, 2022; H. Moftakhari et al., 2019; Salvadori et al., 2018). Dans le scénario d'aléa *AND*, utilisé dans ce projet, on s'intéresse à la probabilité de dépassement simultané du niveau d'eau et du débit de la rivière. La période de retour est définie par Lucey & Gallien (2022) comme :

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

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 de distribution conjointe (copule).

Il est important de noter que le calcul de $F(x), F(y)$ et C_{XY} est basé sur des échantillons aléatoires conjoints générés afin de s'assurer que le calcul du couple de débit-niveau d'eau (Q-H) soit réalisé avec le maximum de vraisemblance. À cette fin, 2000 échantillons aléatoires conjoints ont été produits (valeur entre 0 et 1), puis les probabilités de dépassement pour les distributions marginales de $F(x)$ et $F(y)$, ainsi que le C_{XY} , ont été calculées. Par la suite, la fonction de probabilité de distribution de la fonction copule a été utilisée pour calculer les valeurs de probabilité des couples conjoints aléatoires. Le couple de débit-niveau d'eau avec le maximum de probabilité représente la paire débit-niveau d'eau associée à une période de retour conjointe.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1 Analyse des crues conjointes avec/sans la prise en compte de la dépendance

Afin de mieux comprendre l'impact de l'hypothèse de dépendance entre les variables conjointes, une comparaison a été effectuée entre la période de retour de l'isoligne calculée sous les hypothèses d'indépendance et de dépendance. Dans ce rapport, cette comparaison est faite pour le cas d'une crue conjointe de 100 ans. Le ratio entre ces deux périodes de retour (sans/avec la prise en compte de la dépendance), ci-après nommé "Facteur de Multiplication (FM)", illustre à quel point l'hypothèse d'indépendance sous-estimerait la fréquence de la crue. Plus la dépendance est forte, plus une grande valeur de FM est attendue et plus l'évidence est forte pour rejeter l'hypothèse d'indépendance. Le FM dépend également du type de copule (dépendance dans la queue de la distribution ou non) et est généralement plus élevé dans le cas des copules de type extrême.

La Figure 4 présente une comparaison entre la période de retour calculée de manière dépendante et indépendante pour la série $WL_{\text{cond}Q}$. Les lignes multicolores illustrent la probabilité des paires débit-niveau d'eau correspondant à une crue conjointe dépendante de 100 ans, tandis que les courbes rouge représentent plutôt l'isoligne de copules indépendantes dont la période de retour croiserait le maximum de vraisemblance dépendant (cercle rouge). La période de retour indépendante est indiquée à côté de chaque panneau.

Le FM maximal se trouve à la rivière Saint-Maurice (~43), tandis que la rivière Batiscan détient le FM minimal (~3) parmi les exutoires dépendants du secteur fluvial. Cinq rivières sur douze (Bécancour, Saint-Maurice, Nicolet, Yamaska et Richelieu) ont des copules de type extrême qui démontrent une forte dépendance dans la queue supérieure de la distribution conjointe, ce qui se traduit par des FM de 9 et plus. Rappelons qu'une forte dépendance dans la queue supérieure signifie une plus haute probabilité de concomitance entre les deux extrêmes.

La Figure 4 démontre également que pour une fonction de copule donnée, plus la corrélation de Kendall (T) est forte, plus la valeur du FM sera élevée. Par exemple, le FM pour l'exutoire de la rivière Saint-Maurice ($T = 0,52$) est de 43, mais est de 15 et de 9 pour les rivières Nicolet ($T = 0,24$) et Yamaska ($T = 0,18$), respectivement.

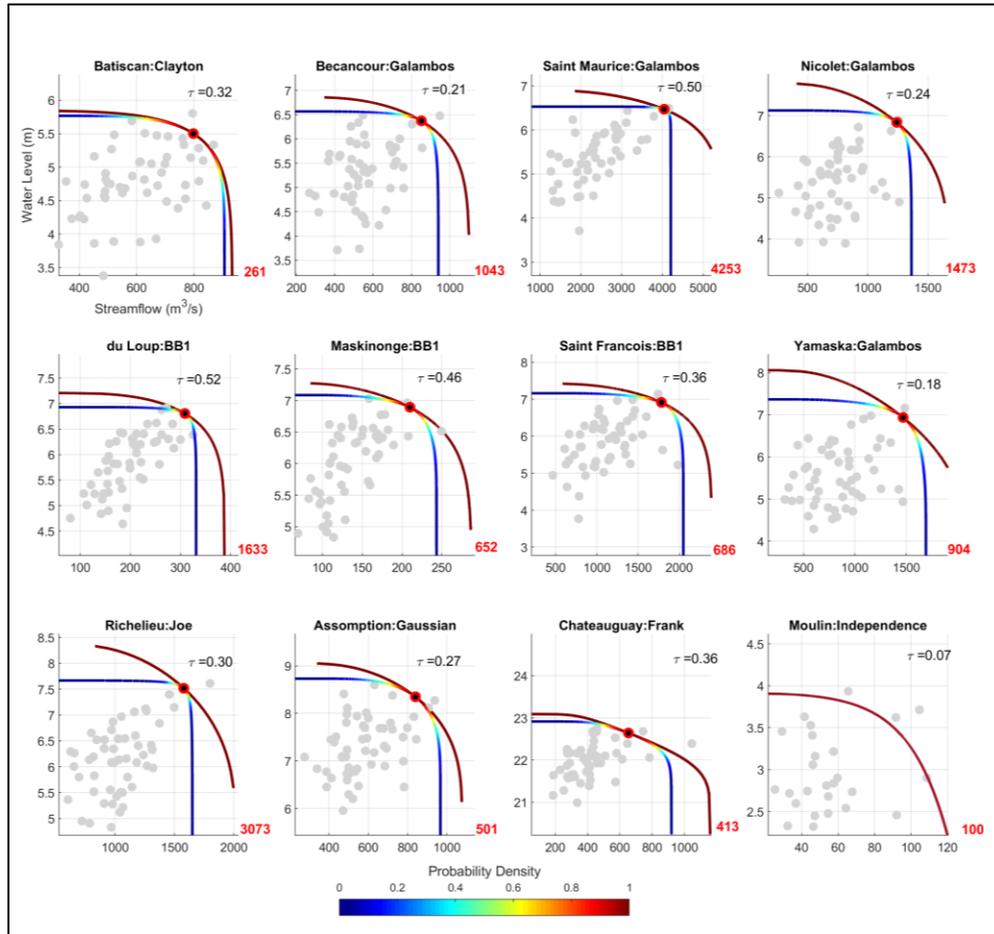


Figure 4. Isolignes de la crue conjointe pour une période de retour de 100 ans (lignes multicolores) de la série $WL_{cond}Q$. La couleur indique la probabilité de la paire Q-H. La ligne rouge illustre une copule indépendante équivalente qui croiserait le maximum de vraisemblance (cercle rouge). La période de retour de cette copule indépendante est indiquée en rouge. Le nom de l'exutoire et la fonction de copule sélectionnée sont indiqués dans le titre de chaque panneau.

La Figure 5 montre la même analyse, mais effectuée sur la série $Q_{cond}WL$. On constate que le maximum de FM se situe à la rivière Richelieu (~24), tandis que la rivière Châteauguay détient le FM minimal (~2) parmi les exutoires du secteur fluvial montrant

une dépendance entre les deux variables. Tel que mentionné précédemment, plus la différence est grande entre les périodes de retour indépendantes et dépendantes, plus l'évidence est forte pour rejeter l'hypothèse d'indépendance.

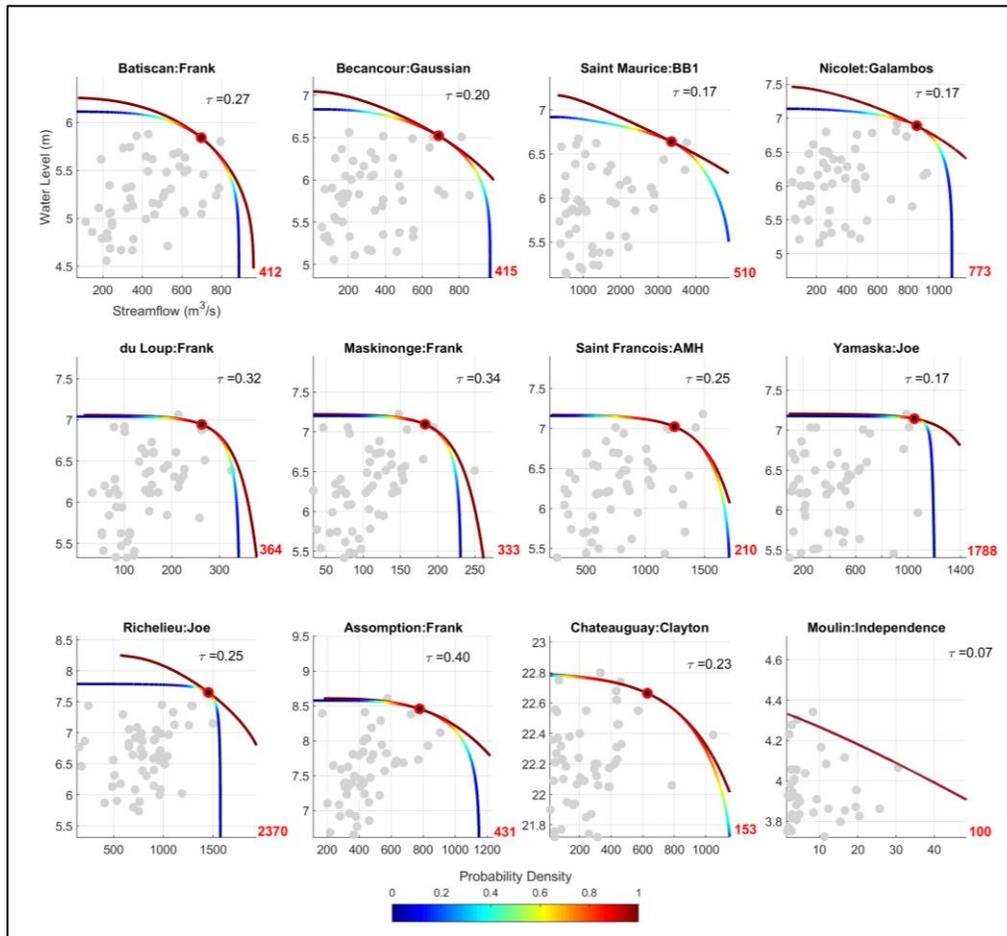


Figure 5. Semblable à la Figure 4, mais pour la série $Q_{\text{cond}}WL$.

La comparaison des Figures 4 et 5 montre que la corrélation reste statistiquement significative autant pour la série $WL_{\text{cond}}Q$ que $Q_{\text{cond}}WL$ dans le secteur fluvial du fleuve Saint-Laurent, mais qu'elle est généralement plus grande pour $WL_{\text{cond}}Q$ que pour $Q_{\text{cond}}WL$ (sauf pour la rivière Assomption). À l'exception de la rivière Batiscan, le FM est également généralement plus élevé pour la série $WL_{\text{cond}}Q$ que $Q_{\text{cond}}WL$, ce qui signifie qu'il est plus probable qu'un niveau d'eau élevé survienne au même moment que le débit de crue maximal annuel, que l'inverse.

Pour certains cas, comme la rivière Saint-Maurice, la corrélation plus élevée dans la série $WL_{\text{cond}Q}$ ($T=0.5$ par rapport à $T=0.17$) s'accompagne de l'existence d'une forte dépendance dans la queue supérieure, ce qui se traduit par une augmentation significative du FM (de 5 en $Q_{\text{cond}WL}$ à 43 pour la série $WL_{\text{cond}Q}$).

Pour la grande majorité des exutoires du secteur fluvial, la comparaison des périodes de retour avec/sans prise en compte de la dépendance entre le débit et le niveau d'eau confirme qu'ignorer cette dépendance entraînerait une forte sous-estimation du risque d'inondations sur le territoire situé à proximité de ces exutoires.

3.1.1 Différences de FM pour une corrélation similaire

On constate aussi dans la Figure 5 que le FM varie beaucoup entre les exutoires, même pour ceux dont le coefficient de corrélation de Kendall est très similaire. Par exemple, le coefficient de corrélation de Kendall (T) pour l'exutoire des rivières Batiscan et Richelieu est respectivement de 0,27 et 0,25. Or, le FM est égal à ~ 4 pour Batiscan et ~ 24 pour la rivière Richelieu. Pour visualiser la différence dans la forme de dépendance et l'impact sur le FM, la Figure 6 présente les nuages de pseudo-observations ainsi que les diagrammes de Kendall pour ces deux exutoires. Les diagrammes de Chi sont illustrés à la Figure 7.

Pour la rivière Batiscan, la dépendance se situe majoritairement au centre de la distribution conjointe, alors qu'une dépendance relativement forte dans la queue supérieure peut être identifiée pour la rivière Richelieu. Par conséquent, la copule Frank (aucune dépendance dans les extrêmes) a été choisie pour la rivière Batiscan, tandis que la copule Joe (dépendance dans la queue supérieure) a été choisie pour la rivière Richelieu. Dans ce cas particulier, le FM est donc principalement influencé par la fonction de copule choisie.

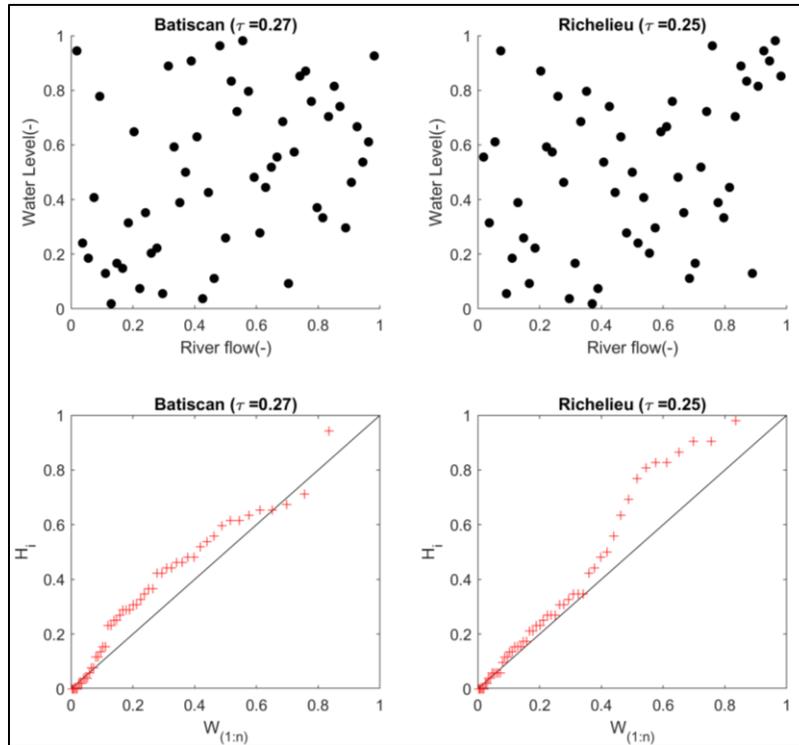


Figure 6. Les nuages de pseudo-observations et les diagrammes de Kendall pour l'exutoire des rivières Richelieu et Batiscan correspondant à la série $Q_{\text{cond}}WL$.

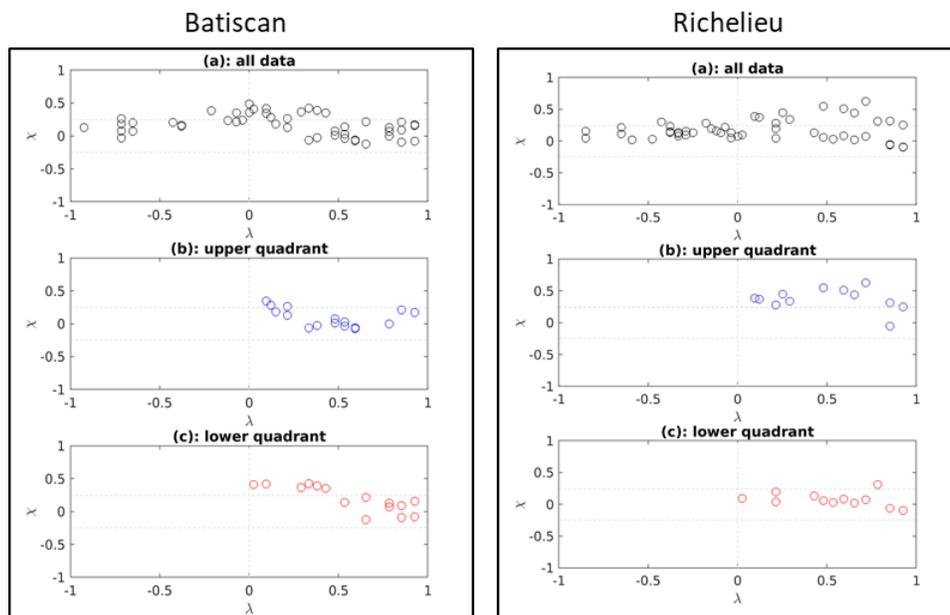


Figure 7. Diagrammes de Chi pour l'ensemble des paires débit-niveau d'eau conjoint correspondant à la série $Q_{\text{cond}}WL$ de la rivière Batiscan (a), ainsi que pour les queues supérieures (b) et inférieures (c). Les traits pointillés horizontaux délimitent la zone de l'hypothèse d'indépendance associée à un niveau de confiance de 95%.

3.1.2 Différences de FM pour des rivières voisines

Un autre constat intéressant de la Figure 5 est que des rivières voisines peuvent avoir des FM très différents, comme c'est le cas pour les rivières Yamaska (~18) et Saint-François (~2). Comme précédemment, les Figures 8 et 9 présentent les nuages de pseudo-observations, les diagrammes de Kendall et les diagrammes de Chi pour ces deux exutoires. On constate que des copules de type asymétrique sont choisies pour les deux cas, soient une copule Joe pour la rivière Yamaska et une copule AMH pour la rivière Saint-François. Malgré ces similarités, des différences marquées, mais subtiles, demeurent entre ces deux exutoires lorsque des métriques numériques sont utilisées. Par exemple, la copule Joe (choisie pour Yamaska) n'arrive que 16^e sur 25 pour la rivière Saint-François. Ces différences, dont le résultat est le choix d'une copule pour Yamaska qui est plus sensible à la dépendance dans les extrêmes, a pour conséquence que le FM à cette rivière est environ 9 fois plus grand que pour la rivière Saint-François. De manière pratique, ces différences statistiques pourraient provenir du relativement petit échantillon utilisé pour construire les copules, de différences dans leurs caractéristiques morphologiques et climatiques (localisation, pente et orientation moyenne des bassins versants, occupation des terres, régime de fonte de la neige) ou d'influences anthropiques (barrages) qui auraient pour effet de changer le synchronisme entre la crue printanière du fleuve Saint-Laurent et la crue des rivières Saint-François et Yamaska.

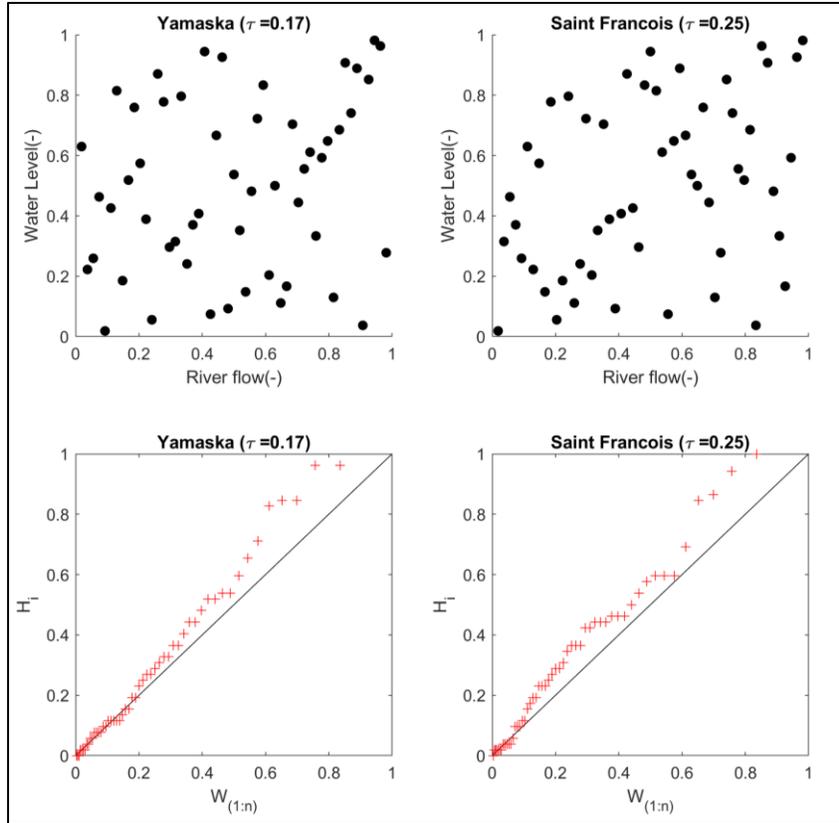


Figure 8. Les nuages de pseudo-observations et les diagrammes de Kendall pour l'exutoire des rivières Yamaska et Saint-François correspondant à la série $Q_{cond}WL$.

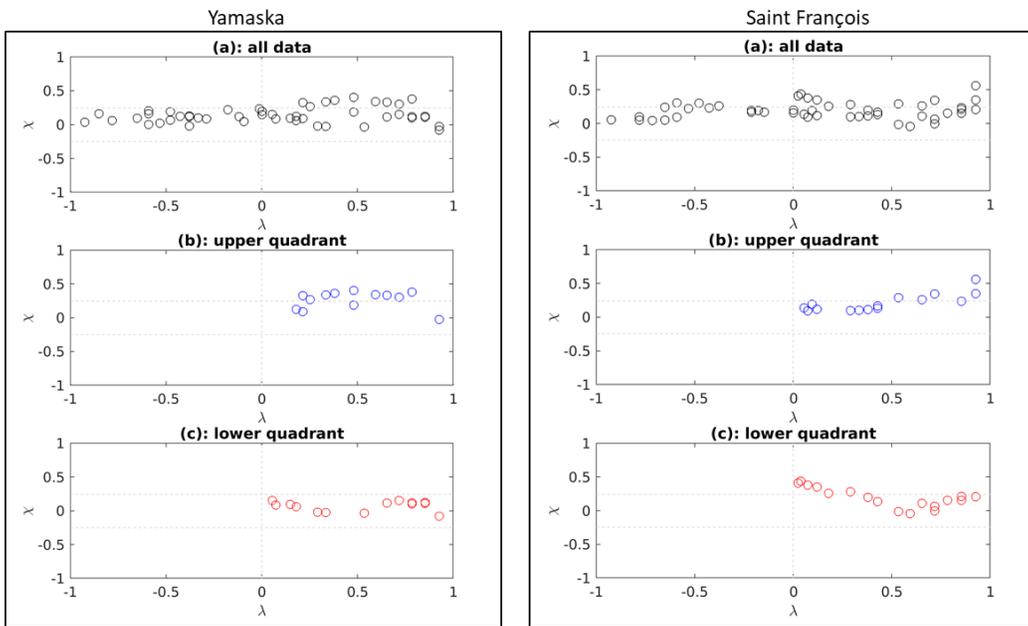


Figure 9. Semblable à la Figure 8, mais pour les rivières Yamaska et Saint-François.

3.2 Analyse de l'effet du rehaussement marin sur la récurrence des inondations conjointes

Une analyse a également été effectuée afin d'explorer l'impact du rehaussement marin sur la fréquence des crues conjointes. Dans ce but, la paire Q-H avec le maximum de vraisemblance associée à la crue conjointe de 100 ans en climat historique est comparée aux isolignes de la période future, dans le but d'identifier quelle serait sa période de retour lorsque l'on tient compte du rehaussement marin. Une analyse similaire avait été effectuée dans les LOT1 et LOT2 pour le cas de la copule indépendante. Le rehaussement marin a pour conséquence de rendre plus fréquents des niveaux d'eau considérés extrêmes aujourd'hui et on s'attend donc, en conséquence, à une augmentation des probabilités d'inondations conjointes (Ganguli et al., 2020).

3.2.1 Secteur fluvial

La Figure 10 illustre l'impact qu'aurait un rehaussement de 50 cm du niveau moyen de la mer à Saint-Joseph-de-la-Rive sur les niveaux d'eau moyens annuels le long du tronçon fluvial du fleuve Saint-Laurent, selon la modélisation effectuée par MPO. On constate que le rehaussement marin diminue graduellement le long du fleuve et qu'à Batiscan, la valeur de 32 cm est déjà seulement 60 % de celle utilisée à Saint-Joseph-de-la-Rive. Le rehaussement devient nul quelque part entre l'Assomption (11 cm) et Châteauguay.

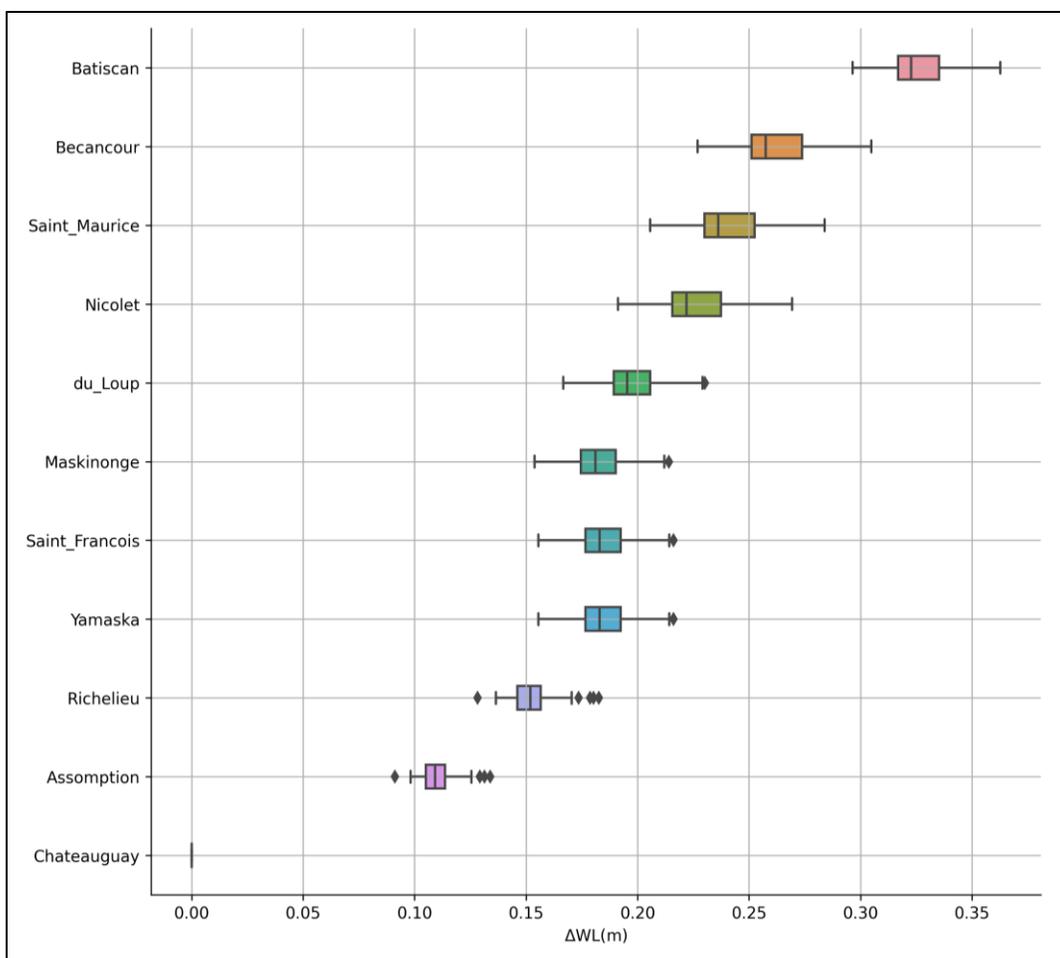


Figure 10. Différence (en mètre) dans le niveau d'eau moyen annuel entre la période historique et future aux exutoires dans le tronçon fluvial.

On peut donc s'attendre à ce que l'influence du rehaussement marin sur la récurrence des inondations conjointes diminue de Batiscan à Châteauguay. Cette comparaison est illustrée aux Figures 11 et 12 pour les séries $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ respectivement, où les cercles roses indiquent les paires Q-H avec le maximum de vraisemblance associées aux récurrences conjointes de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans avec le rehaussement marin. L'étoile noire montre la récurrence de 100 ans sans rehaussement marin.

La Figure 11 montre que pour l'exutoire de la rivière Batiscan, un événement de 100 ans deviendrait un événement d'environ 20 ans, soit 5 fois plus fréquent, avec le rehaussement marin. Pour les rivières Bécancour, Saint-Maurice, Nicolet, du Loup et Maskinongé, l'événement historique conjoint de 100 ans deviendrait plutôt un événement

d'environ 50 ans. Pour les exutoires situés plus en amont, c'est-à-dire Saint-François, Yamaska, Richelieu et Assomption, le rehaussement marin influence moins la fréquence de la crue conjointe. Les résultats sont similaires pour la série $Q_{\text{cond}}\text{WL}$ (Figure 12), à l'exception que l'événement historique conjoint de 100 ans devient aussi un événement 50 ans pour les rivières Yamaska et Assomption.

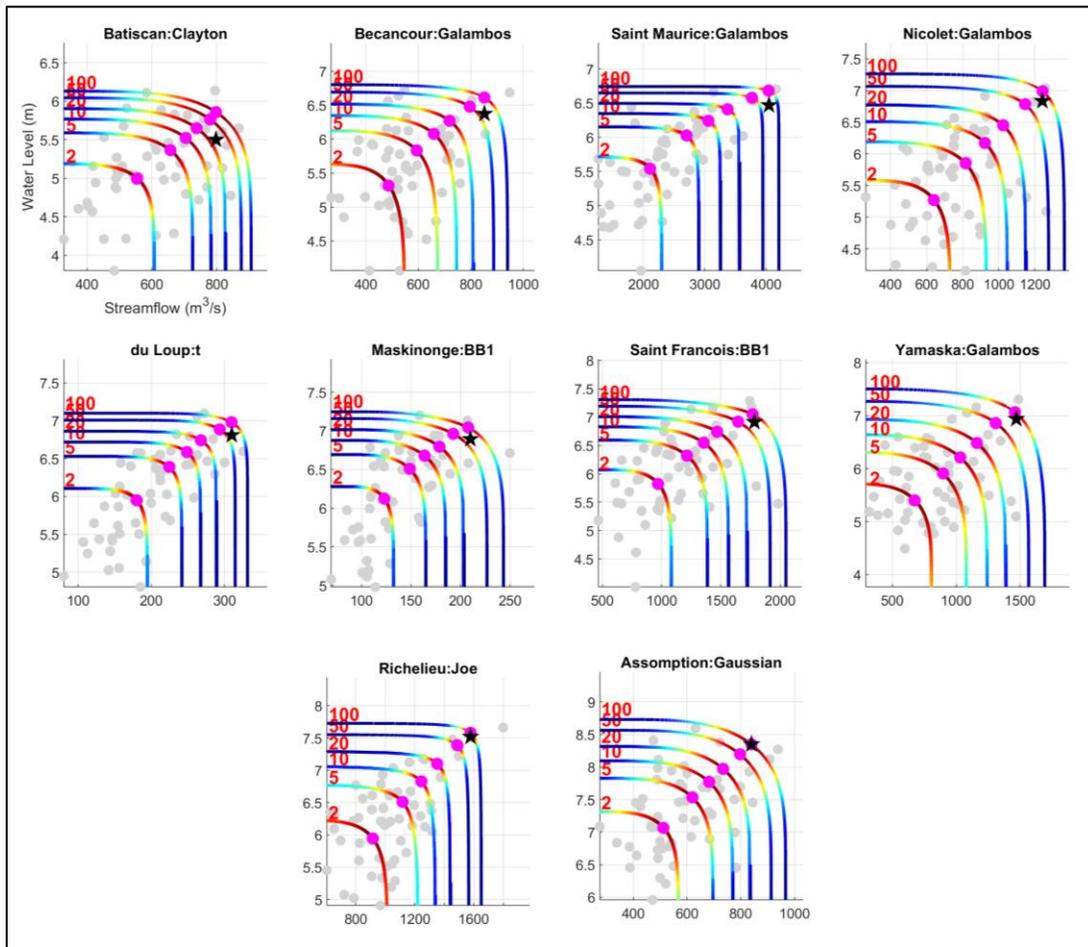


Figure 11. Courbes de probabilité pour un évènement de période de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour la série $WL_{\text{cond}}Q$ dans l'horizon futur, ainsi que les paires Q-H correspondant au maximum de vraisemblance (cercles roses). L'étoile noire indique le Q-H associé à la courbe de 100 ans dans l'horizon historique. Les cercles gris montrent le jeu de données conjoint.

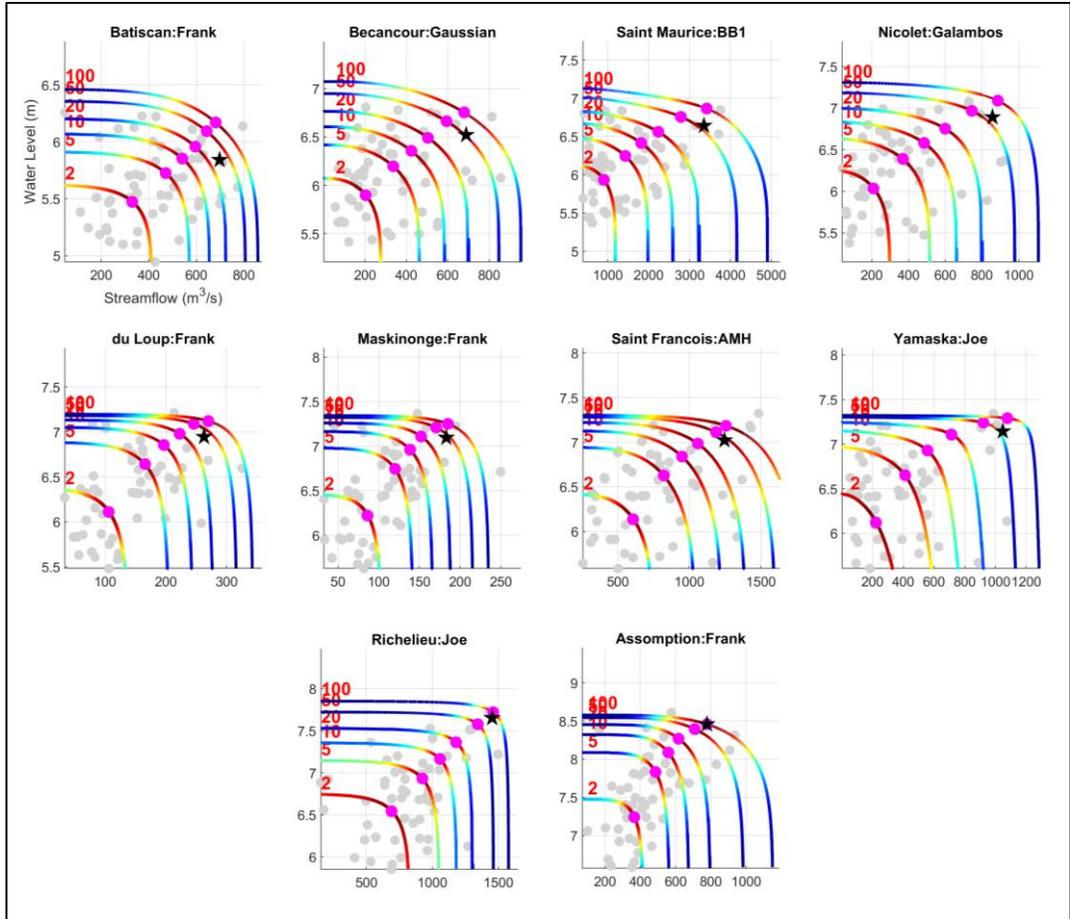


Figure 12. Semblable à la Figure 11 mais pour la série $Q_{cond}WL$.

3.2.2 Rivière du Moulin

Pour la rivière du Moulin, un rehaussement marin de 48,2 cm est utilisé. Cette valeur correspond au 50^e percentile projeté à l'embouchure de la rivière Saguenay pour l'horizon 2100 par un ensemble de simulations CMIP5 forcées par le scénario d'émission RCP8.5 (voir le Tableau 9 du rapport LOT1) (James et al., 2021). En raison d'un manque d'information sur la pente hydraulique du Saguenay, il a été jugé préférable de ne pas extrapoler cette valeur.

La Figure 13 présente les récurrences conjointes de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans, ainsi que les scénarios Q-H sélectionnés pour les horizons historiques (cercles noirs) et futurs (cercles mauves). On constate que le rehaussement marin de 48,2 cm entraîne une augmentation importante de la fréquence des crues conjointes. Par exemple, pour la série

$WL_{cond}Q$, le couple (\bar{Q}, H_{100}) historique tombe sur la courbe de 5 ans future (20 fois plus fréquent). L'augmentation est plus forte pour la série $Q_{cond}WL$, où les niveaux d'eau maximums annuels sont utilisés. Par exemple, ce même couple (\bar{Q}, H_{100}) historique devient plutôt un évènement de 2 ans dans la série conjointe future, soit 50 fois plus fréquent. Cela souligne fortement la nécessité d'inclure le rehaussement marin dans la délimitation des zones d'inondables.

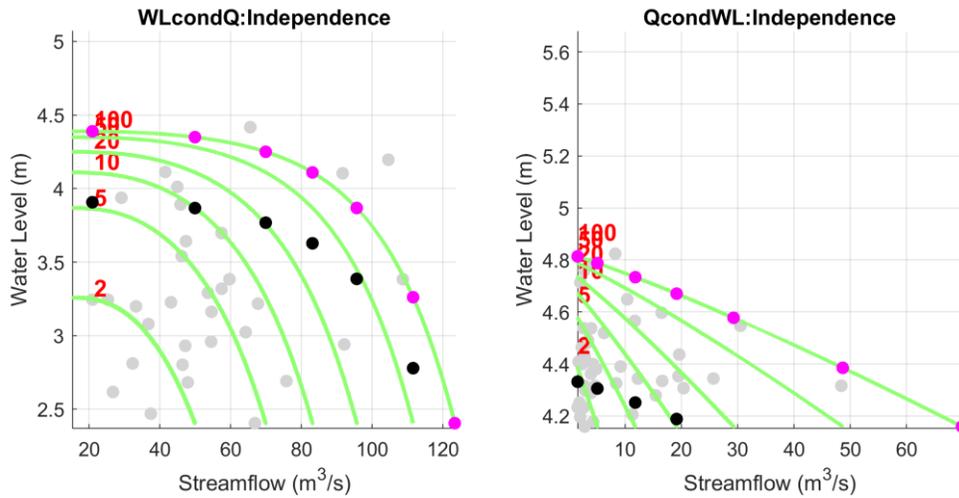


Figure 13. Isolignes des crues conjointes pour la série $WL_{cond}Q$ et $Q_{cond}WL$ à l'exutoire de la rivière du Moulin, ainsi que les paires Q-H sélectionnées (mauve) associées à l'évènement conjoint de 100 ans en incluant le rehaussement marin. Les points noirs montrent les paires Q-H choisie pour la récurrence conjointe de 100 ans en climat actuel.

4. CONCLUSIONS

Le présent rapport sert de deuxième livrable au 3^e LOT du projet *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*. Ce 3^e LOT du projet avait pour but l'analyse des crues conjointes et le calcul des débits et niveaux d'eau (Q-H) associés aux récurrences 2, 100 et 350 ans pour onze exutoires situés dans le secteur fluvial du fleuve Saint-Laurent, soient **Maskinongé, Nicolet, Saint-Maurice, Batiscan, du Loup, Saint-François, Yamaska, Bécancour, Richelieu, Assomption** et **Châteauguay**, ainsi que pour l'exutoire de la rivière **du Moulin** se jetant dans le Saguenay. Contrairement aux exutoires étudiés précédemment dans les LOT1 et 2, la corrélation entre le débit et le niveau d'eau est statistiquement significative pour tous les exutoires situés dans le tronçon fluvial, ce qui nécessite l'ajustement d'une fonction de copule pour le calcul des récurrences conjointes. Cela signifie également que le résultat est une seule paire Q-H qui correspond à un maximum de vraisemblance, plutôt que les sept scénarios équiprobables qui étaient fournis dans le cas de copules indépendantes.

La comparaison de l'indice de corrélation de Kendall (T) entre les séries de données montre qu'à l'exception de la rivière Assomption, la corrélation est systématiquement plus forte pour $WL_{cond}Q$ que pour $Q_{cond}WL$. Cela signifie qu'il est plus probable qu'un niveau d'eau élevé survienne au moment du débit maxima annuel, que l'inverse.

Afin de quantifier la sous-estimation des conditions frontières qui proviendrait de l'utilisation d'une hypothèse d'indépendance entre le débit et le niveau d'eau, un *Facteur de Multiplication (FM)* a été défini comme le ratio inverse entre la période de retour conjointe de 100 ans et la période de retour d'une copule indépendante qui croiserait le maximum de vraisemblance de cette courbe. Plus la valeur du FM est grande, plus la sous-estimation de la fréquence des crues conjointes avec l'hypothèse d'indépendance sera importante. Les résultats montrent que :

- 1- Pour la série $WL_{cond}Q$, le FM varie de 3 (Batiscan) à 43 (Saint-Maurice), ce qui confirme l'importance de la dépendance entre le débit et le niveau d'eau sur la

- réurrence des crues conjointes. Le FM est plus petit pour la série $Q_{cond}WL$, variant de 2 (Châteauguay) à 24 (Richelieu).
- 2- La forme de la dépendance varie entre les exutoires et entre les séries conjointes. Des copules Galambos de type extrême ont été sélectionnées, par exemple, pour les rivières Bécancour, Saint-Maurice, Nicolet et Yamaska dans la série $WL_{cond}Q$, mais seulement pour la rivière Nicolet dans la série $Q_{cond}WL$.
 - 3- Des exutoires voisins peuvent avoir une forme de dépendance et un type de copule différentes, comme c'est par exemple le cas pour les rivières Yamaska et Saint-François dans la série $WL_{cond}Q$.
 - 4- Pour les exutoires avec le même type de copule, plus la corrélation de Kendall est forte, plus la valeur de FM sera élevée.

Le rehaussement marin a été estimé par MPO en reconstruisant la série temporelle historique après avoir imposé un changement de +50 cm à Saint-Joseph-de-la-Rive. Cela entraîne une augmentation du niveau moyen à Batiscan de 32 cm, qui diminue graduellement le long du fleuve Saint-Laurent pour atteindre 11 cm à l'Assomption et 0 à Châteauguay. La comparaison des crues conjointes historique et future montre que le 100 ans historique deviendrait 2 à 5 fois plus fréquent pour les exutoires en aval de la rivière Maskinongé. Pour les exutoires plus en amont, le rehaussement marin semble moins influencer la fréquence de la crue conjointe.

En résumé, l'analyse des crues conjointes aux exutoires situés dans le secteur fluvial indique que la prise en compte de la dépendance entre le débit et le niveau est nécessaire pour le calcul des récurrences conjointes et quantifie la sous-estimation provenant de l'hypothèse d'indépendance. La comparaison des Q-H de l'horizon historique et futur permet d'identifier les exutoires les plus vulnérables face au rehaussement marin.

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 *nom-de-l'exutoire.mat*.

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)
```

RÉFÉRENCES

- Ai, P., Yuan, D., & Xiong, C. (2018). Copula-Based Joint Probability Analysis of Compound Floods from Rainstorm and Typhoon Surge: A Case Study of Jiangsu Coastal Areas, China. *Sustainability* 2018, Vol. 10, Page 2232, 10(7), 2232. <https://doi.org/10.3390/SU10072232>
- Couasnon, A., Eilander, D., Muis, S., Veldkamp, T. I. E., Haigh, I. D., Wahl, T., Winsemius, H. C., & Ward, P. J. (2020). Measuring compound flood potential from river discharge and storm surge extremes at the global scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 489–504. <https://doi.org/10.5194/NHESS-20-489-2020>
- FEMA. (2020). *Guidance for FEMA's Risk Mapping, Assessment and Planning (Guidance Combined Coastal and Riverine Floodplain)*. <https://www.fema.gov/media-collection/guidance-femas-risk-mapping-assessment-and-planning>
- Ganguli, P., & Merz, B. (2019). Extreme Coastal Water Levels Exacerbate Fluvial Flood Hazards in Northwestern Europe. *Scientific Reports* 2019 9:1, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49822-6>
- Ganguli, P., Paprotny, D., Hasan, M., Güntner, A., & Merz, B. (2020). Projected Changes in Compound Flood Hazard From Riverine and Coastal Floods in Northwestern Europe. *Earth's Future*, 8(11), e2020EF001752. <https://doi.org/10.1029/2020EF001752>
- Genest, C., & Favre, A.-C. (2007). Everything You Always Wanted to Know about Copula Modeling but Were Afraid to Ask. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4), 347–368. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:4\(347\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:4(347))
- Ghanbari, M., Arabi, M., Kao, S. C., Obeysekera, J., & Sweet, W. (2021). Climate Change and Changes in Compound Coastal-Riverine Flooding Hazard Along the U.S. Coasts. *Earth's Future*, 9(5), e2021EF002055. <https://doi.org/10.1029/2021EF002055>
- James, T. S., Robin, C., Henton, J. A., & Craymer, M. (2021). *Relative sea-level projections for Canada based on the IPCC Fifth Assessment Report and the NAD83v70VG national crustal velocity model*. <https://doi.org/10.4095/327878>
- Lefavre, D., D'Astous, A., & Matte, P. (2016). Hindcast of Water Level and Flow in the St. Lawrence River Over the 2005–2012 Period. <https://doi.org/10.1080/07055900.2016.1168281>, 54(3), 264–277. <https://doi.org/10.1080/07055900.2016.1168281>
- Lucey, J. T. D., & Gallien, T. W. (2022). Characterizing multivariate coastal flooding events in a semi-arid region: The implications of copula choice, sampling, and infrastructure. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(6), 2145–2167. <https://doi.org/10.5194/nhe-22-2145-2022>
- Moftakhari, H. R., Salvadori, G., AghaKouchak, A., Sanders, B. F., & Matthew, R. A. (2017). Compounding effects of sea level rise and fluvial flooding. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(37), 9785–9790. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1620325114/-/DCSUPPLEMENTAL>
- Moftakhari, H., Schubert, J. E., AghaKouchak, A., Matthew, R. A., & Sanders, B. F. (2019). Linking statistical and hydrodynamic modeling for compound flood hazard assessment in tidal channels and estuaries. *Advances in Water Resources*, 128, 28–38. <https://doi.org/10.1016/J.ADVWATRES.2019.04.009>
- Raftery, A. E. (1995). Bayesian Model Selection in Social Research. *Sociological*

- Methodology*, 25, 111. <https://doi.org/10.2307/271063>
- Sadegh, M., Moftakhari, H., Gupta, H. V., Ragno, E., Mazdidasni, O., Sanders, B., Matthew, R., & AghaKouchak, A. (2018). Multihazard Scenarios for Analysis of Compound Extreme Events. *Geophysical Research Letters*, 45(11), 5470–5480. <https://doi.org/10.1029/2018GL077317>
- Salvadori, G., Durante, F., De Michele, C., & Bernardi, M. (2018). Hazard Assessment under Multivariate Distributional Change-Points: Guidelines and a Flood Case Study. *Water* 2018, Vol. 10, Page 751, 10(6), 751. <https://doi.org/10.3390/W10060751>
- Tootoonchi, F., Sadegh, M., Haerter, J. O., Rätty, O., Grabs, T., Teutschbein, C., & Y W O R D S Copula, K. E. (2022). Copulas for hydroclimatic analysis: A practice-oriented overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, e1579. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1579>
- Wahl, T., Jain, S., Bender, J., Meyers, S. D., & Luther, M. E. (2015). Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. *Nature Climate Change* 2015 5:12, 5(12), 1093–1097. <https://doi.org/10.1038/nclimate2736>
- Ward, P. J., Couasnon, A., Eilander, D., Haigh, I. D., Hendry, A., Muis, S., Veldkamp, T. I. E., Winsemius, H. C., & Wahl, T. (2018). Dependence between high sea-level and high river discharge increases flood hazard in global deltas and estuaries. *Environmental Research Letters*, 13(8), 084012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AAD400>
- Zhao, P., Lü, H., Fu, G., Zhu, Y., Su, J., & Wang, J. (2017). Uncertainty of Hydrological Drought Characteristics with Copula Functions and Probability Distributions: A Case Study of Weihe River, China. *Water* 2017, Vol. 9, Page 334, 9(5), 334. <https://doi.org/10.3390/W9050334>



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