

Impact des changements climatiques sur les apports en eau au système Grands Lacs / Saint-Laurent : Phase 1.

Analyse multivariée des indices climatiques et des niveaux observés du système Grands Lacs/ Saint-Laurent

Réalisé par :

Dorra Hammami¹, Iris Klein¹, Hanane Hemi², Zakaria Mechri², Salah El Adlouni², André St-Hilaire¹, Fateh Chebana¹

¹*Institut national de la recherche scientifique -Centre Eau, Terre et Environnement,*

²*Université de Moncton*

À l'attention du Service Météorologique du Canada

(Région du Québec)

Environnement Canada

Mars 2014

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2014

Dépôt légal, Bibliothèque nationale du Québec

Dépôt légal, Bibliothèque et archives Canada

ISBN : 978-2-89146-857-2

Table des matières

Liste des tableaux.....	3
Liste des figures	4
Résumé.....	5
1. Objectif principal de l'étude	5
2. Introduction et revue de littérature	6
3. Les données	11
3.1. Choix des données.....	12
4. Méthodologie.....	14
4.1. Rappels théoriques	16
4.1.1. Méthode des copules trivariées.....	16
4.1.2. La GEV non-stationnaire	20
5. Résultats.....	21
5.1. Analyses préliminaires	21
5.2. Lac Supérieur	24
5.2.1. Choix du niveau de dépendance dans la GEV	24
5.2.2. Valeurs des périodes de retour conditionnelles	25
5.3. Lac Huron.....	29
5.3.1. Choix de niveau de dépendance dans la GEV	29
5.3.2. Valeurs des périodes de retour conditionnelles	29
5.4. Lac Érié	31
5.4.1. Choix des indices	31
5.4.3. Étude de la distribution conjointe des trois covariables.....	37
5.5. Lac Ontario.....	40
5.5.1. Choix des indices	40
5.5.2. Probabilités marginales.....	43
5.5.3. Étude de la distribution conjointe des 3 covariables.....	45
5.6. Fleuve Saint-Laurent	49
5.6.1. Choix des indices	49
5.6.2. Les probabilités marginales	50

5.6.3. Étude de la distribution conjointe des trois covariables.....	53
6. Discussion et conclusions	53
Références.....	57
Annexe 1 Représentation graphique des stations utilisées	59
Annexe 2 Résultats de corrélations des stations de niveau et les indices développés	60
Annexe 3 Résultats préliminaires	65
Annexe 4 Résultats du lac Supérieur	70
Annexe 5 Résultats du lac Huron.....	73
Annexe 6 Résultats du Lac Érié.....	76
Annexe 7 Résultats du lac Ontario.....	85
Annexe 8 Résultats du Fleuve Saint-Laurent.....	94

Liste des tableaux

Tableau 1: Tableau récapitulatif des données utilisées.....	14
Tableau 2: Exemples de copules archimédiennes et leurs générateurs.....	17
Tableau 3: Valeurs de retour de 2 ans et 5 ans (entre parenthèses) de la station Thunder Bay pour différentes combinaisons de covariables et différentes périodes	26
Tableau 4: Valeurs de retour pour la combinaison de covariables les plus extrêmes.....	27
Tableau 5: Les quantiles du niveau du lac Érié pour différentes périodes de retour	34
Tableau 6: Les quantiles des précipitations liquides (mars-mai) pour différentes périodes de retour	35
Tableau 7: Les quantiles du Maximum de débit d'été (juillet-septembre) pour différentes périodes de retour.....	36
Tableau 8: Périodes de retour conjointes bivariées entre le maximum de niveau du lac Érié avec les précipitations liquides et avec le maximum de débit d'été.....	39
Tableau 9: Les quantiles du maximum estival du niveau du lac Ontario pour différentes périodes de retour.....	43
Tableau 10: Les quantiles du maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours pour différentes périodes de retour.....	44
Tableau 11: Les quantiles du minimum de débit d'hiver (janvier-mars) pour différentes périodes de retour.....	45
Tableau 12: Périodes de retour conjointes bivariée entre le maximum de niveau estival du lac Ontario avec le maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours de mars à juin et le minimum de débit d'hiver de janvier à mars	48
Tableau 13: Les quantiles du niveau à la station Upper Iroquois pour différentes périodes de retour	51
Tableau 14: Les quantiles du nombre de jours avec $T_{max} > 20$ pour différentes périodes de retour	52
Tableau 15: Les quantiles du débit maximum moyen pour différentes périodes de retour	53

Liste des figures

Figure 1: Représentation du système Grands Lacs - Saint-Laurent (Clites et Quinn, 2003)	7
Figure 2: Illustration graphique de la méthode des copules imbriquées (Saad et al., 2013)	18
Figure 3: Niveaux d'eau mensuels au cours de l'année pour la station Thunder Bay	22
Figure 4: La fonction de répartition pour deux combinaisons différentes de covariables (#72 et #78)	28
Figure 5: La fonction de répartition pour deux combinaisons différentes de covariables	30
Figure 6: Ajustement du maximum estival du niveau du lac Érié par la loi Log Normale	34
Figure 7: Représentation de la distance quadratique entre les valeurs théoriques et les valeurs estimées de K avec la copule de Frank et la copule de Clayton.....	37
Figure 8: Représentation graphique des valeurs simulées du niveau maximum du lac, Maximum de débit d'été et les précipitations liquides par la copule de Frank (N=10000) en 3 dimensions et 2 dimensions respectivement	38
Figure 9: Représentation de la distance quadratique entre les valeurs théoriques et les valeurs estimées de K avec la copule de Frank et la copule de Clayton pour le lac Ontario	46
Figure 10: Représentation graphique des valeurs simulées du niveau maximum du lac Ontario, Maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours et le minimum de débit d'hiver par la copule de Frank (N=10000) en 3 dimensions et 2 dimensions respectivement	47

Résumé

Cette étude vise à améliorer la connaissance des liens entre les extrêmes hydrologiques du système des Grands Lacs / Saint-Laurent (GLSL) et les systèmes météorologiques. Ceci consiste à identifier la relation entre le niveau d'eau dans l'ensemble GLSL et leurs affluents et la contribution spatio-temporelle des phénomènes météorologiques. La méthodologie consiste à utiliser une approche multivariée basée sur les copules trivariées pour le lac Érié, le lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent et une GEV non-stationnaire pour le lac Supérieur et le lac Huron à cause de l'effet de la stationnarité. L'utilisation des copules permet d'étudier les structures de dépendance entre la variable du niveau maximum saisonnier (Été-Automne) et deux indices hydrométéorologiques fortement corrélés à la première variable indépendamment des distributions marginales de chaque indice.

Les résultats trouvés ont prouvé l'importance de la considération des variables hydrométéorologiques dans la modélisation de la variation des niveaux des lacs et leurs effets sur les périodes de retour conditionnelles.

1. Objectif principal de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'identifier les co-variables responsables des apports extrêmes hydrologiques (amplitude et durée des niveaux et / ou débits en périodes de crues et d'étiages) à partir des produits de réanalyses, des simulations de modèles climatiques régionaux et des données hydro-météorologiques observées disponibles. Ceci consiste à identifier, dans le climat actuel, la relation entre les niveaux

d'eau du système des Grands Lacs / Saint-Laurent (GLSL) et ses affluents et les phénomènes météorologiques associés. En effet, l'identification des principales variables atmosphériques et de leur combinaison, qui influencent les extrêmes hydrologiques, aidera à trouver des indicateurs pertinents pour le suivi des niveaux d'eau et permettra une meilleure interprétation des changements climatiques à venir et des impacts associés dans le système GLSL, ainsi qu'à développer des solutions pratiques pour l'adaptation et la gestion de l'eau.

2. Introduction et revue de littérature

Les Grands Lacs d'Amérique du Nord constituent la plus grande réserve d'eau douce au monde, avec une superficie totalisant 244 000 Km² (Ehsanzadeh et al., 2013). Cinq lacs sont situés sur ou près de la frontière entre les États-Unis et le Canada. Les lacs Supérieur, Huron, Érié et Ontario chevauchent la frontière canado-américaine. Seul le lac Michigan est situé en entier aux États-Unis (Figure 1).

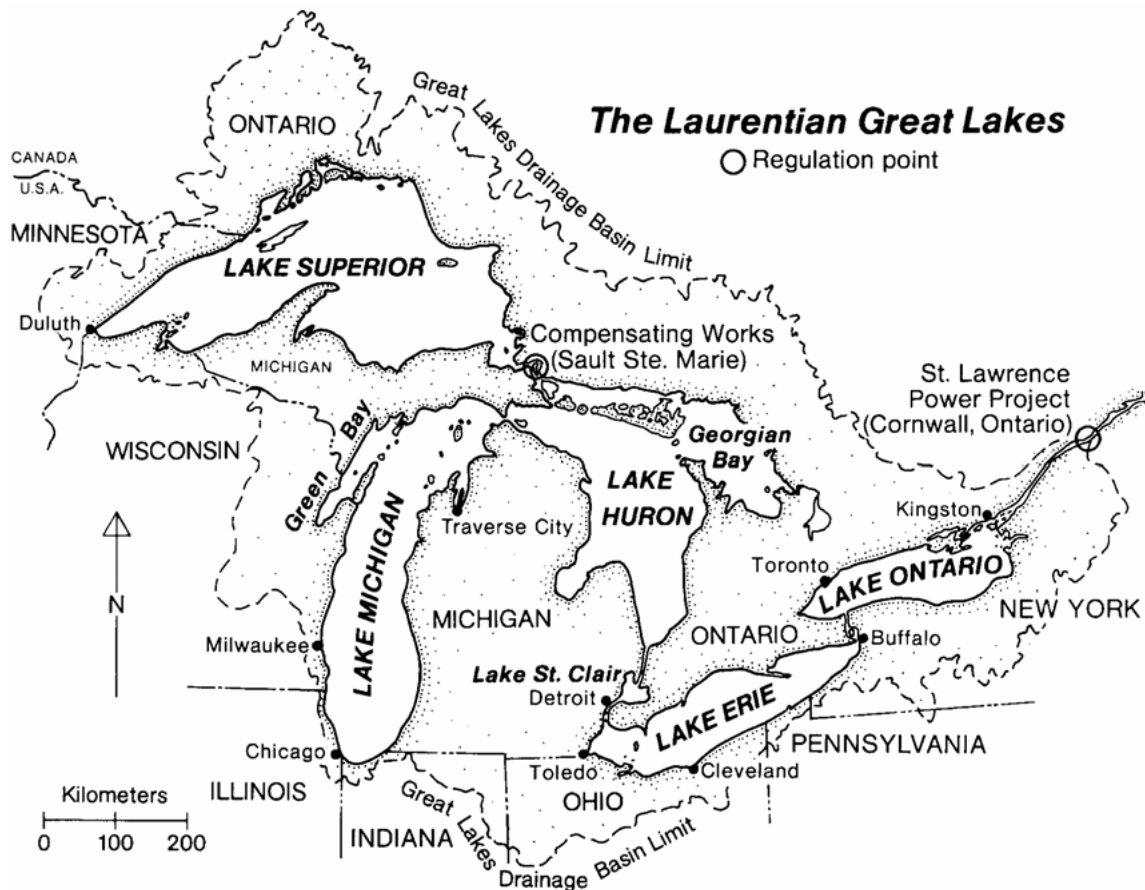


Figure 1: Représentation du système Grands Lacs / Saint-Laurent (Clites et Quinn, 2003).

En association avec le fleuve Saint-Laurent, l'ensemble Grands Lacs / Saint-Laurent (GLSL) forme le système d'eau douce le plus étendu au monde en contenant 20% de l'eau douce de la terre (Lofgren, 2003). En effet, des millions de personnes dépendent de l'eau fournie par le système GLSL pour la consommation quotidienne, la nourriture, le travail, l'hydro-électricité, l'industrie et les loisirs (Lofgren, 2003). Plusieurs études ont montré une baisse du niveau d'eau et de l'alimentation en eau des Grands Lacs associés à des changements ou tendances mesurées dans les séries chronologiques de certaines variables climatiques (Ehsanzadeh et al., 2013; Lofgren, 2003; Croley, 2003).

Ehsanzadeh et al. (2013) ont analysé les changements des variables hydro-climatologiques des Grands Lacs par l'intermédiaire des tests de tendances de Mann-Kendall (MK) ainsi qu'un modèle bayésien multiple capable de détecter les points de rupture ou de changement de tendance dans une série de données. Les résultats ont montré que plusieurs variables hydroclimatiques des Grands Lacs ont un comportement non stationnaire. Le moindre changement de ce comportement est associé à la diminution des niveaux d'eau dans les dernières décennies. Lofgren (2003) a utilisé un modèle régional couplé Hydrosphère-Atmosphère (CHARM) afin d'analyser et anticiper la variation de l'alimentation en eau des Grands Lacs sous l'influence d'une hausse des gaz à effet de serre pour 3 périodes de temps centrées en 1989, 2030 et 2095. Le cycle simulé montre une augmentation de l'alimentation en eau principalement au printemps pour les deux cas de 2030 et 2095 par rapport au cas de 1989 contrairement aux résultats de Croley (2003). Ce dernier a utilisé différents modèles climatiques globaux (MCGs) ainsi que différents scénarios de gaz à effet de serre. Les résultats de l'étude de Croley (2003) prévoient une diminution de l'alimentation en eau des Grands Lacs. Mortsch et Quinn (1996) ont développé des scénarios des changements climatiques à l'aide des MCGs en utilisant des données météorologiques de 1951 à 1980 pour les trois scénarios de MCG (OSU, GFDL et GISS) et de 1951 à 1988 pour le scénario du CCC GCM2. Ils ont montré l'existence d'effets directs et indirects des changements climatiques sur l'écosystème des Grands Lacs. En effet, ils ont enregistré une augmentation importante de la température de l'air et de l'eau, une variation mixte (positive et négative) des précipitations, une baisse au niveau de l'écoulement, une baisse de l'accumulation de la

neige, une augmentation au niveau de l'évapotranspiration et une baisse des niveaux des lacs.

En se basant sur des tests de MK, Ouarda et al. (2008) ont trouvé que pour la période 1971-2007, à l'exception du lac Ontario pour quelques périodes de l'année, les niveaux des Grands Lacs présentent une tendance négative à l'échelle mensuelle ainsi qu'à l'échelle annuelle contrairement à la première période d'étude (1918-1970). L'étude de Smith (1991) ainsi que d'autres traitant de l'effet des changements climatiques sur les Grands Lacs a trouvé que dans le cas des simulations pour lesquelles un doublement de la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère est utilisé, une diminution de 0,5 à 2,5 m du niveau des Grands Lacs est suggérée.

Wang et al. (2012), dans leur étude de la variabilité spatiale et temporelle de la couverture de glace dans les Grands Lacs, ont noté une tendance significative à la baisse de la couverture de glace de 1973 à 2010.

Selon Lofgren et al. (2002), plusieurs scénarios issus des MCGs ont montré une diminution du niveau d'écoulement des bassins ainsi qu'une augmentation de la température de surface des lacs causant une augmentation de l'évapotranspiration. Yee et al. (1990) ont trouvé que la diminution des précipitations et par conséquent de l'écoulement, l'augmentation de l'évapotranspiration ainsi que l'augmentation de l'écoulement des lacs représentent des facteurs majeurs contribuant à la baisse du niveau des lacs entre 1987 et 1988. Mortsch et al. (2000) ont étudié les tendances historiques des impacts des changements climatiques sur plusieurs variables météorologiques et hydrologiques telles que la température, les précipitations, l'évapotranspiration, les écoulements et les niveaux des Grands Lacs. Ils ont trouvé un déclin considérable dans

les apports d'eau et dans les niveaux des lacs. Ceci est considéré comme un problème majeur pouvant affecter les ressources hydriques, ce qui renforce le besoin d'une meilleure planification de la gestion des ressources en eau du système GLSL.

El Adlouni et Ouarda (2008) ont traité l'effet combiné des débits extrêmes à l'embouchure de la rivière Châteauguay avec le niveau du lac Saint-Louis par la modélisation de la loi conjointe de ces deux variables à l'aide d'une copule bivariée. Une copule est une fonction mathématique permettant d'estimer des probabilités conjointes et/ou conditionnelles. La copule permet de caractériser la dépendance entre les différentes variables aléatoire à valeurs dans R^d sans se préoccuper de ses lois marginales. El Adlouni et Ouarda (2008) ont montré que le fait de ne pas considérer l'effet combiné du débit de la rivière et du niveau du lac mène nécessairement à une sous-estimation des évènements extrêmes.

Afin de se concentrer sur des solutions pratiques pour l'adaptation et la gestion de l'eau, le développement de critères pour le suivi des niveaux d'eau est d'une importance cruciale et ceci peut contribuer à fournir une liste de solutions réalistes pour la planification à court et à long terme. En utilisant par exemple une approche multivariée innovante comme l'approche par copules trivariées, cette étude a comme but principal d'identifier la combinaison des covariables ou facteurs physiques responsables de la variation des niveaux d'eau à l'échelle saisonnière et à l'échelle décennale, sur divers affluents. Éventuellement, leurs contributions et l'impact des évènements extrêmes sur le système GLSL seront évalués. L'identification des principales variables météorologiques (et leur combinaison) qui font partie des facteurs affectant plusieurs phénomènes extrêmes, tels que les crues extrêmes, est essentielle afin d'intégrer des indicateurs

pertinents pour le suivi des niveaux d'eau et le développement de solutions d'adaptation. L'approche permettra ainsi d'identifier des scénarios hydro-climatiques réalistes et pertinents pouvant servir à compléter la modélisation déterministe du système hydrodynamique GLSL. En effet, cette étude permet d'utiliser une approche multivariée innovante pour la détermination des variables climatiques affectant les niveaux d'eau du système GLSL.

3. Les données

Afin de réaliser les objectifs de la présente étude, trois types de données sont nécessaires : les niveaux des lacs et du fleuve Saint-Laurent en amont de Trois-Rivières, les débits des tributaires et les données météorologiques, soit la température et les précipitations. La figure A1.1 de l'Annexe 1 représente l'emplacement de toutes les stations de niveaux et les stations de débits sélectionnées. Ainsi, la figure A1.2 de l'Annexe 1 présente les stations de niveaux, de débits et les stations météorologiques utilisées dans cette étude.

Les données des niveaux des lacs sont issues du site web de Pêches et Océans Canada (<http://www.isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/maps-cartes/inventory-inventaire-fra.asp>) où on a repéré 30 stations avec plus de 30 années de données hydrologiques complètes (figure A1.1). Les données de débit des tributaires proviennent de 2 sources différentes: la base de données HYDAT d'Environnement Canada (EC) (<http://www.ec.gc.ca/rhc-wsc/default.asp?lang=En&n=9018B5EC-1>) et la base de données du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/info_validite.htm).

On a défini certains critères de sélection afin de trouver les séries les plus appropriées aux objectifs du projet :

- Les rivières choisies sont les tributaires des Grands Lacs ou du fleuve Saint-Laurent en amont de Trois-Rivières et doivent être situées en Ontario ou au Québec;
- Le débit doit être naturel et non influencé par les activités humaines;
- La série de données hydrologiques doit avoir un minimum de 30 années complètes (d'octobre jusqu'à septembre) pour que la station soit considérée;
- La série doit se terminer au moins en 2005 pour avoir assez de données récentes.

Au total 107 stations ont ainsi été identifiées, dont 94 provenant de la base de données 'HYDAT' (92 pour l'Ontario et 2 pour le Québec) et 13 provenant de la base de données 'CEHQ' pour le Québec.

Les données météorologiques (température maximale, température minimale et précipitations) utilisées dans cette étude sont les données ajustées et homogénéisées d'Environnement Canada en premier lieu et les données provenant des archives nationales d'Environnement Canada via le site 'DAI' (http://loki.gc.ec.gc.ca/DAI/DAI_data-f.html) en cas de besoin, c'est-à-dire lorsqu'aucune station homogénéisée/ajustée n'est située à proximité de la station de niveaux d'eau à l'étude. Ces données sont disponibles sur plus de 30 ans.

3.1. Choix des données

Une vaste base de données est disponible pour l'étude des liens entre les niveaux du système GLSL, les débits des tributaires et la variabilité climatique. En effet, un choix de stations à utiliser est nécessaire.

Une analyse préliminaire de corrélation entre les stations de niveau de chaque lac et du fleuve Saint-Laurent a été faite. À partir des tableaux A2.1, A2.2, A2.3, A2.4 et A2.5 de

l'Annexe 2 qui représentent les corrélations entre les stations de niveaux d'eau de chaque lac et du fleuve Saint-Laurent, on a noté de fortes corrélations entre les stations du même lac. Afin d'éviter la redondance, une seule station de niveaux d'eau par lac a été sélectionnée, celle ayant le plus d'années de données hydrologiques disponibles (tableau 1).

Pour chaque lac, environ 3 à 5 stations de débit des tributaires représentatifs sont sélectionnées, selon la taille du bassin versant (le plus grand possible), et avec le moins d'années de données hydrologiques incomplètes. La station correspondant au bassin versant le plus grand est finalement choisie.

Pour les stations des données météorologiques, on a choisi la station la plus proche de la station de niveaux d'eau et qui a le plus d'années disponibles. On a opté pour l'utilisation des données de Températures homogénéisées et précipitations ajustées. Par contre, lorsque la station météo la plus proche ne fournit pas de données ajustées/homogénéisées, on utilisera les données non-homogénéisées de cette station (seulement dans le cas du lac Supérieur). Le tableau 1 résume le choix des différentes stations à utiliser dans cette étude pour les 4 lacs (Supérieur, Huron, Érié et Ontario) et le fleuve Saint-Laurent en amont de Trois-Rivières.

Tableau 1: Tableau récapitulatif des données utilisées

Lac	Station de niveaux d'eau	Station de débit	Station météo	Type de données météo
Lac Supérieur	Thunder Bay, Ontario	Pic River near Marathon	Thunder Bay	Températures : Homogénéisées Précipitations : DAI
Lac Huron	Thessalon, Ontario	Black River near Washago	Sault Ste Marie	Températures : Homogénéisées Précipitations : Ajustées
Lac Érié	Port Colborne, Ontario	Nith River near Canning	Welland	Températures : Homogénéisées Précipitations : Ajustées
Lac Ontario	Kingston, Ontario	Skootamatta River near Actinolite	Kingston	Températures : Homogénéisées Précipitations : Ajustées
Fleuve Saint-Laurent	Upper Iroquois, Ontario	De l'Achigan	Ottawa	Températures : Homogénéisées Précipitations : Ajustées

4. Méthodologie

Afin de déterminer le lien entre les extrêmes hydrologiques et la variabilité climatologique des données atmosphériques, on a effectué plusieurs analyses. Dans cette étude, la variable d'intérêt considérée est le niveau des lacs du système GLSL. Cependant, plusieurs alternatives de valeurs extrêmes sont possibles : maximum ou minimum hivernal (hiver/printemps) ou maximum ou minimum estival (été/automne).

Dans une première phase de ce projet, la variable d'intérêt choisie est le maximum de niveau estival.

Des analyses préliminaires ont été effectuées afin de déterminer le lien entre le maximum de niveau estival et les débits des tributaires. En effet, une corrélation des rangs

(corrélation de Spearman) est effectuée entre le maximum de niveau estival pour chaque lac et les débits de chaque rivière correspondante pour s'assurer de la possibilité de considérer le débit comme un bon indice des niveaux des GLSL. La corrélation de Spearman est utilisée puisqu'elle est largement utilisée dans des études similaires (e.g. Prudhomme et al., 2011).

En utilisant les données des débits et les données météorologiques (température et précipitations), un ensemble d'indices a été considéré pour pouvoir tester leurs effets sur la variation des niveaux des lacs et déterminer quels indices ont plus d'influence sur la variation des maximum estivaux des niveaux du système GLSL. On a utilisé 86 indices représentés dans le tableau A2.6 de l'Annexe 2. Une partie de ces indices est développée dans l'étude de Saad et al., 2013, le reste d'indices est développé dans le cadre de cette étude. Le choix des indices pour chaque lac passe par deux étapes. En premier lieu, en plus de la corrélation de Spearman, on a jugé que c'est nécessaire de calculer la corrélation de Kendall entre les différents indices et les niveaux des lacs puis on choisit les indices qui y sont significativement corrélés (p -valeurs < 0.01).

En second lieu, on calcule la corrélation de Pearson entre les indices choisis afin de considérer la paire d'indices la moins corrélée et alors déterminer un échantillon de variables explicatives indépendantes.

Dans le cadre d'une analyse multivariée, la méthode proposée pour la détermination de l'effet bivarié et trivarié des extrêmes hydrométéorologiques sur les niveaux des lacs est la méthode des copules bivariées et trivariées (Saad et al., 2013). L'application de cette méthode nécessite que certaines conditions soient satisfaites telle que l'hypothèse de la

stationnarité. Cependant, un test de stationnarité appliqué aux données des niveaux des lacs a montré une non-stationnarité significative dans les séries des extrêmes saisonniers et mensuels pour le lac Supérieur et le lac Huron, d'où l'utilisation de l'approche de la GEV non-stationnaire (El Adlouni et al., 2007) pour ces deux lacs. La GEV non-stationnaire est une approche d'analyse fréquentielle souvent utilisée dans la littérature pour décrire les extrêmes hydrologiques.

Ainsi, la détermination des probabilités marginales et des quantiles est nécessaire pour la quantification de l'effet trivarié sur les niveaux des GLSL. Cet effet est déterminé par l'intermédiaire de la méthode des copules trivariées en termes de périodes de retour conjointes et conditionnelles. Rappelons que les quantiles représentent les valeurs ayant une probabilité au non dépassement q [$q = F(x)$], correspondant à une période de retour $T = 1/(1-q)$ pour les variables en jeu pour chaque lac.

4.1. Rappels théoriques

4.1.1. Méthode des copules trivariées

Une copule est une fonction de répartition, notée C , définie sur $[0,1]^d$ en dimension d . La copule est caractérisée par sa capacité d'évaluer la dépendance entre plusieurs variables indépendamment de leurs lois marginales. Les distributions marginales de C sont notées C_i et sont définies par : $C_i(u) = C(1, \dots, 1, u, 1, \dots, 1) = u \quad \forall u \in [0,1]$. Il en résulte, que si C est une copule et si F_1, \dots, F_n sont des fonctions de répartition univariées, alors $F(x_1, \dots, x_n) = C[F_1(x_1), \dots, F_n(x_n)]$ est une fonction de répartition de dimension n avec des lois marginales F_1, \dots, F_n . (Sklar, 1959). Un cas particulier des copules est la copule

produit ayant la forme $C(u_1, \dots, u_n) = u_n$ qui correspond au cas où toutes les variables u_1, \dots, u_n sont indépendantes. Une classe importante de copule très utilisée en pratique, en particulier en hydrologie est celle des copules archimédiennes. Elles sont définies par $C(u_1, \dots, u_n) = \phi^{-1}[\phi(u_1) + \dots + \phi(u_n)] \quad \forall 0 \leq u_1, \dots, u_n \leq 1$ où ϕ est appelé générateur de la copule archimédienne avec $\phi(1) = 0$.

Ces copules sont très utilisées en pratique grâce à leur capacité de représenter différentes formes de dépendance et leurs expressions. Ainsi, elles sont très simples à implémenter grâce aux relations explicites entre le paramètre de la copule et le tau (τ) de Kendall. Le tableau 2 présente deux exemples des copules archimédiennes les plus utilisées dans le cas bivarié (El Adlouni et al. 2008, Clayton 1978 et Frank 1979).

Tableau 2: Exemples de copules archimédiennes et leurs générateurs

Copules	Générateur $\phi(t)$	Copule bivariée $C_\phi(u_1, u_2)$	τ de Kendall
Clayton	$t^{-\theta} - 1$	$(u_1^{-\theta} + u_2^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$	$\theta/\theta + 2$
Frank	$-\ln[(e^{-\theta t} - 1)/(e^{-\theta} - 1)]$	$-(1/\theta)\ln[1 + (e^{-\theta u_1} - 1)(e^{-\theta u_2} - 1)/(e^{-\theta} - 1)]$	$1 - \frac{4}{\theta} \{1 - D_1(\theta)\}$

Note : $D_k(x) = \frac{k}{x^k} \int_0^x \frac{t^k}{e^t - 1} dt$ est la fonction « Debye ».

Les copules bivariées sont utilisées pour le calcul des probabilités d'occurrence et par conséquent des périodes de retours conjointes et conditionnelles des évènements à étudier. Par exemple, on peut indiquer :

$$P(X > x, Y > y) = (1 - P(X \leq x)) + (1 - P(Y \leq y)) - 1 + C(F_x(x), F_y(y)) \quad (1)$$

$$T_{X>x,Y>y} = \frac{1}{P(X > x, Y > y)} \quad (2)$$

$$P(X > x | Y > y) = \frac{P(X > x, Y > y)}{P(Y > y)} \quad (3)$$

Cependant, dans le cas où trois ou plus variables indépendantes sont considérées dans un cadre d'analyse fréquentielle multivariée, la méthode des copules imbriquées peut être utilisée. Pour trois variables indépendantes, l'idée consiste à estimer le paramètre de la première copule pour la première paire de variables, puis estimer le deuxième paramètre de la deuxième copule ajustée entre la copule initiale et la troisième variable (équation 4)

(Saad et al., 2013)

$$C(u_1, u_2, u_3) = \phi_2^{-1}[\phi_2(\phi_1^{-1}[\phi_1(u_1) + \phi_1(u_2)]) + \phi_2(u_3)]$$

(4)

La figure 2 représente une illustration graphique de la méthode des copules imbriquées.

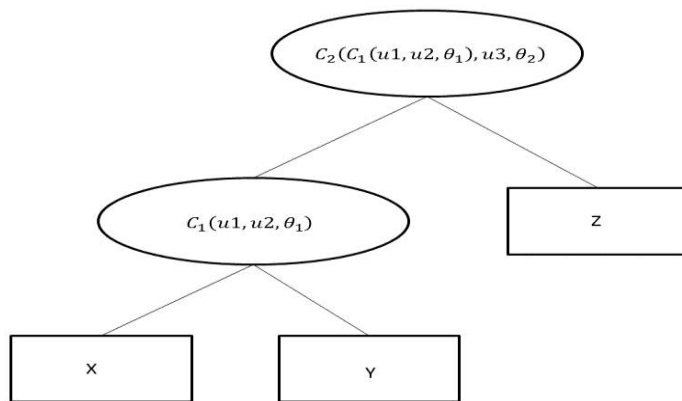


Figure 2: Illustration graphique de la méthode des copules imbriquées tirée de (Saad et al., 2013)

La probabilité au dépassement multivariée des événements de la forme

$(N > N_{T_0}, X > X_{T_1}, Y > Y_{T_2})$ permet de calculer les probabilités conditionnelles du type :

$$P(N > N_{T_0} | X > X_{T_1}, Y > Y_{T_2}) = \frac{P(N > N_{T_0}, X > X_{T_1}, Y > Y_{T_2})}{P(X > X_{T_1}, Y > Y_{T_2})}. \quad \text{\AA partir de cette}$$

probabilité on peut d\u00e9duire les p\u00e9riodes de retour conditionnelles.

N\u00e9anmoins, un choix de la meilleure copule archim\u00e9dienne \u00e0 utiliser est n\u00e9cessaire.

Genest et Rivest (1993) ont d\u00e9fini la fonction univari\u00e9e, K , li\u00e9e au g\u00e9n\u00e9rateur de la copule afin de choisir la copule qui ajuste le mieux les donn\u00e9es.

$$K(z) = z - \frac{\phi(z)}{\phi'(z)} \quad (5)$$

$\hat{K}(z)$ est un estimateur non param\u00e9trique de cette fonction et d\u00e9finit par :

$$\hat{K}(z) = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L 1_{[w_t \leq z]} \quad (6)$$

avec $w_t = \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L I[x_t < x_i, y_t < y_i]$, $t=1, \dots, L$ et I repr\u00e9sente l'indicatrice de cet

\u00e9v\u00e8nement. I est \u00e9gale \u00e0 1 si $x_t < x_i$ et $y_t < y_i$ et nulle sinon.

Donc la meilleure copule \u00e0 consid\u00e9rer est celle pour laquelle $\hat{K}(z)$ est plus proche des valeurs th\u00e9oriques.

Dans cette \u00e9tude, deux algorithmes de simulations sont propos\u00e9s pour l'estimation des probabilit\u00e9s d'occurrences conjointes en se limitant aux deux copules archim\u00e9diennes les

plus utilisées qui sont la copule de Clayton et la copule de Frank malgré qu'il y en a beaucoup d'autres copules qu'on peut explorer dans les prochaines étapes.

4.1.2. La GEV non-stationnaire

Le modèle des Valeurs Extrêmes Généralisée (GEV) contient trois familles de distributions statistiques : Gumbel, Fréchet, et Weibull. Les trois paramètres de la loi GEV sont le paramètre de position, le paramètre d'échelle et le paramètre de forme. Le troisième paramètre, le paramètre de forme, détermine la famille de distribution (il peut être négatif, positif, ou égal à 0). La fonction de répartition de la GEV est :

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - k \frac{x - \xi}{\alpha} \right)^{1/k} \right]$$

Il est possible d'inclure des covariables (des variables explicatives) dans les paramètres de la GEV. Avec cela, un paramètre devient une fonction d'une certaine covariable. Le cas le plus simple et le plus souvent utilisé est une dépendance linéaire dans le paramètre de position.

Même avec des covariables, les paramètres peuvent être facilement estimés avec la méthode de maximum de vraisemblance. La fonction de répartition existe, ce qui veut dire qu'on peut calculer des valeurs de retour de manière analytique.

La statistique de déviance sert à comparer deux modèles GEV différentes qui ont la même variable d'intérêt : un modèle plus compliqué, qui contient le modèle plus simple. Avec la statistique de déviance, qui est proportionnelle au rapport des vraisemblances calculées pour les deux modèles, on peut décider si le modèle plus compliqué est assez avantageux comparé à l'autre modèle, donc si cela vaut la peine d'accepter un paramètre

de plus (à estimer). Plus de détails sur le modèle GEV non-stationnaire ainsi que sur les approches d'estimation des paramètres sont disponibles dans El Adlouni et al. (2007).

5. Résultats

5.1. Analyses préliminaires

Les analyses préliminaires consistent en une étude des corrélations basées sur les rangs (rho de Spearman) entre la variable niveau, dans différentes stations, et les débits des tributaires. Cette première analyse montre des corrélations significatives dans plusieurs cas, d'où le développement de certains indices à partir du débit des tributaires.

Ainsi, un test de Mann-Kendall est effectué pour vérifier la stationnarité des minimums, maximums et moyennes des séries mensuelles de niveau d'eau. En outre, les séries sont divisées en deux parties pour voir les différences entre le passé plus lointain (des années 1960 jusqu'à 1978 : TP_1) et le passé récent (de 1988 jusqu'à 2012 ou 2013 : TP_2).

Les séries mensuelles du minimum, maximum et de la moyenne des niveaux du lac Supérieur sont significativement non-stationnaires à $p \leq 0,01$. Ce résultat est le même pour les trois stations analysées : Thunder Bay, Rosspport et Michipicoten.

En divisant les séries en deux, il est évident que la non-stationnarité est assez prononcée, le minimum de la première période de temps (TP_1) est plus élevé que le maximum de la deuxième période de temps (TP_2) pour tous les mois. La figure 3 le montre pour la station de Thunder Bay. Les graphiques correspondants pour les autres stations sont à l'Annexe 3.

Le maximum de niveau d'eau est observé autour du mois de septembre.

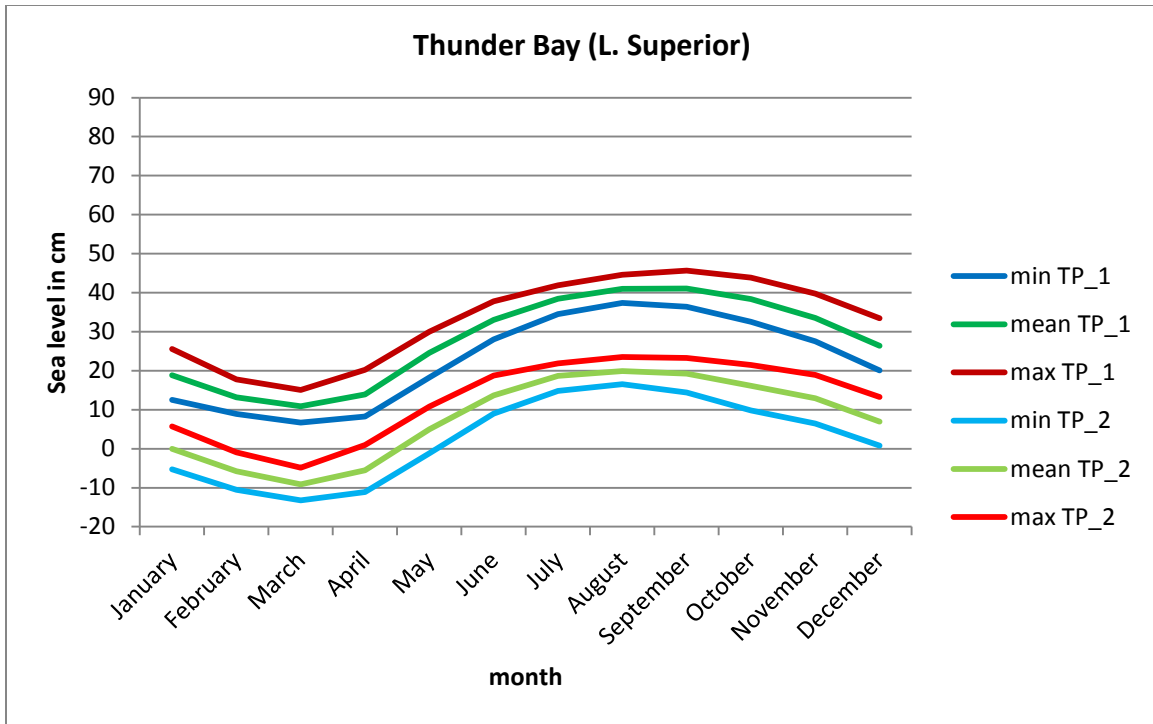


Figure 3: Niveaux d'eau mensuels au cours de l'année pour la station de Thunder Bay.

Pour le lac Huron, les séries mensuelles du minimum, maximum et de la moyenne des niveaux d'eau sont significativement non-stationnaires à $p \leq 0,05$; et très souvent même à $p \leq 0,01$. Le résultat est similaire pour les trois stations analysées : Thessalon, Tobermory et Goderich.

En divisant les séries en deux, il est évident que la non-stationnarité est assez prononcée, le minimum de la première période de temps (TP_1) est plus élevé que le maximum de la deuxième période de temps (TP_2) pour tous les mois. Les graphiques correspondants pour les trois stations sont à l'Annexe 3.

Le maximum de niveau d'eau est observé autour des mois de juillet et d'août.

Les résultats pour le lac Érié montrent que les séries mensuelles du minimum, maximum et de la moyenne des niveaux d'eau sont significativement stationnaires à $p \leq 0,05$ (avec

une exception qui est le minimum du mois de septembre pour la station de Kingsville).

Le résultat est similaire pour les deux stations analysées : Kingsville et Port Colborne.

En divisant les séries en deux, on voit des différences, mais qui ne sont pas très prononcées par rapport aux deux lacs précédents. Les graphiques correspondants pour les deux stations sont à l'Annexe 3.

Le maximum de niveau d'eau moyen est observé autour des mois de mai à juillet.

Pour le lac Ontario, les séries mensuelles du minimum, maximum et de la moyenne des niveaux d'eau sont significativement stationnaires à $p \leq 0,05$. Le résultat est similaire pour les deux stations analysées : Toronto et Kingston.

En divisant les séries en deux, on ne voit presque pas de différences entre les deux périodes de temps. Les graphiques correspondants pour les deux stations sont à l'Annexe 3.

Le maximum de niveau d'eau est observé autour du mois juin.

Les séries mensuelles du minimum, maximum et de la moyenne des niveaux d'eau de la station Upper Iroquois du Saint-Laurent sont généralement significativement stationnaires à $p \leq 0,05$ (exceptions : les mois de janvier à mars).

En divisant les séries en deux, les différences entre les séries pour les deux périodes ne sont pas significatives sauf pour les mois de janvier à mars. La figure illustrant l'analyse de la stationnarité des niveaux mensuels à la station Upper Iroquois est présentée à l'Annexe 3. Notons que le maximum du niveau d'eau moyen est observé autour des mois de mai à juin.

5.2. Lac Supérieur

La non-stationnarité dans les séries du lac Supérieur (e.g. la station de Thunder Bay) est fortement significative. On utilise donc ici une approche GEV non-stationnaire multivariée (avec deux covariables). Trois combinaisons d'indices sont choisies :

1. Les indices de degré jour de la température maximale (nombre de jours où la température maximale est supérieure à 20°C de juin à novembre) (#36) et le maximum de débit hivernal de décembre à mai en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#80) (les trois séries ensembles ont un total de 30 années complètes).
2. Les indices de maximum de débit printanier du mois d'avril à juin en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#72) et le minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#78) (les trois séries ensembles ont un total de 38 années complètes).
3. Les indices du minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#78) et le maximum de débit d'hiver/printemps de décembre à mai en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#80) (les trois séries ensembles ont un total de 37 années complètes).

5.2.1. Choix du niveau de dépendance dans la GEV

La statistique de déviance est un test statistique avec lequel on peut déterminer si un modèle plus compliqué apporte une amélioration significative comparé à un modèle plus simple.

Cette statistique est utilisée pour déterminer dans quel paramètre (ou quels paramètres) on devrait incorporer les covariables. Pour toutes les covariables (et les deux lacs), le résultat suggère d'inclure une dépendance linéaire dans le paramètre de position.

Après cela, on compare un modèle avec les deux covariables (le paramètre de position est une fonction linéaire des deux covariables) dans le paramètre de position par rapport à un modèle avec seulement une covariable (linéaire) dans le paramètre de position. La statistique de déviance suggère d'incorporer les deux indices comme covariables dans le modèle pour tous les cas.

On travaille donc avec deux covariables linéaires dans le paramètre de position.

5.2.2. Valeurs des périodes de retour conditionnelles

Avec un calcul stationnaire, sans covariable, la valeur de la période de retour de 2 ans est de 0,393 m (pour le maximum de niveau d'été).

Tableau 3: Valeurs des périodes de retour de 2 ans et 5 ans (entre parenthèses) pour la station de Thunder Bay pour différentes combinaisons de covariables et différentes périodes.

cov 1 et cov 2 :	Nombre de jours où la température maximale est supérieure à 20°C de juin à novembre (#36) avec l'indice du minimum de débit d'hiver/printemps de décembre à mai en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#80)	Maximum de débit de printemps d'avril à juin en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jour (# 72) avec l'indice du minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de 30 jours (# 78)	Minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de 30 jours (# 78) avec l'indice du minimum de débit d'hiver/printemps de décembre à mai en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (# 80)
Les années 1970	0,444 m (0,556 m)	0,428 m (0,543 m)	0,432 m (0,548 m)
Les années 1980	0,423 m (0,536 m)	0,403 m (0,518 m)	0,404 m (0,520 m)
Les années 1990	0,440 m (0,552 m)	0,407 m (0,522 m)	0,397 m (0,513 m)
Les années 2000	0,298 m (0,410 m)	0,340 m (0,455 m)	0,339 m (0,456 m)

En prenant la moyenne des covariables pour les années 1970, 1980 etc., on voit à partir du tableau 3 qu'il y a une tendance vers des valeurs plus basses avec le temps. Cette tendance est évidemment dans les valeurs de périodes de retour de 2 ans et de 5 ans. Le changement est similaire pour les trois combinaisons de covariables.

Tableau 4: Valeurs des périodes de retour pour la combinaison de covariables les plus extrêmes.

cov 1 et cov 2 :	Nombre de jours où la température maximale est supérieure à 20°C de juin à novembre (#36) avec l'indice du minimum de débit d'hiver/printemps de décembre à mai en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#80)	Maximum de débit de printemps d'avril à juin en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jour (# 72) avec l'indice du minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de 30 jours (# 78)	Minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de 30 jours (# 78) avec l'indice du minimum de débit d'hiver/printemps de décembre à mai en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (# 80)
Covariables observées extrêmes qui produisent des niveaux très bas	0,199 m (0,312 m)	0,178 m (0,294 m)	0,173 m (0,289 m)
Covariables observées extrêmes qui produisent des niveaux très hauts	0,610 m (0,722 m)	0,750 m (0,866 m)	0,716 m (0,833 m)

En prenant les extrêmes observés des covariables de toute la série, on estime comme valeurs de période de retour de 2 ans (et 5 ans entre parenthèses) tel que décrit dans le tableau 4. Les différences sont assez importantes : jusqu'à plus que 0,5 m de différence, obtenu simplement par l'utilisation de différentes valeurs extrêmes des covariables.

Les différences sont encore plus claires dans le graphique de la fonction de répartition (figure 4). On peut voir un décalage considérable des fonctions de répartition des niveaux selon les valeurs de covariables (10^e quantile vs 90^e quantile).

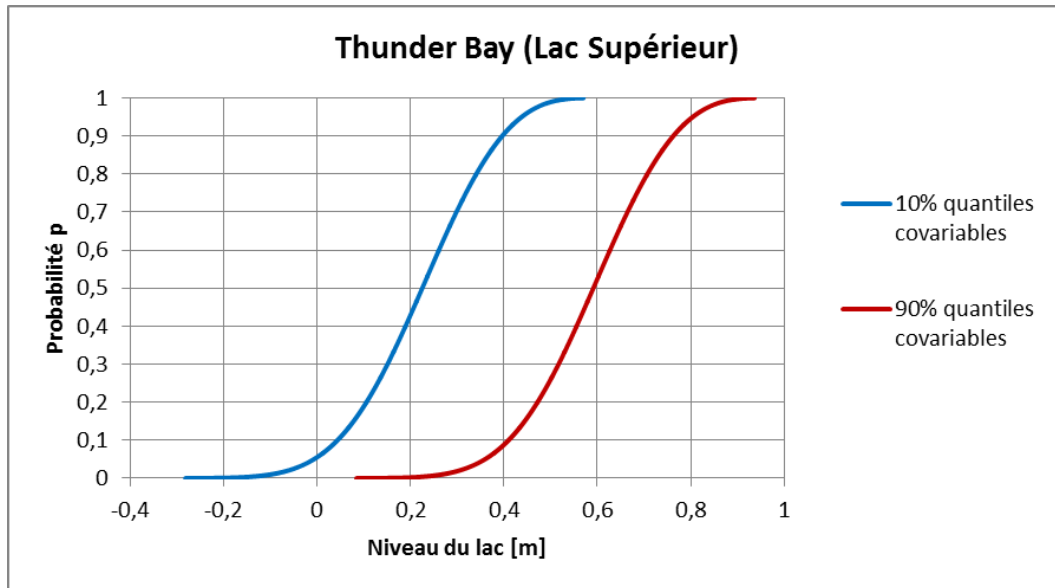


Figure 4: La fonction de répartition pour deux combinaisons différentes de covariables (Maximum de débit de printemps d'avril à juin en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jour (# 72) et l'indice du minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de 30 jours (# 78))

La courbe bleue représente la fonction de répartition prenant le quantile 10% des covariables observées, et la courbe rouge représente la fonction de répartition prenant le quantile 90% des covariables observées.

La forme des deux courbes est identique, parce que les covariables sont seulement utilisés pour l'estimation du paramètre de position. La distance entre les deux courbes est assez importante, ce qui montre la grande influence que peuvent avoir les covariables.

Plus de résultats sont présentés à l'Annexe 4.

5.3. Lac Huron

La non-stationnarité dans les séries du lac Huron (ex. la station Thessalon) est fortement significative. On utilise donc ici une approche GEV non-stationnaire multivariée (avec deux covariables).

Au départ de l'étude, on avait choisi la station Goderich pour le lac Huron, car elle compte le plus d'années de données hydrologiques complètes. Par contre, la station est située à l'est du lac, et l'analyse de corrélation ne montre aucune corrélation significative entre le maximum de niveau estival du lac Huron avec les indices météo. Donc, on a décidé de considérer la station Thessalon.

Une seule combinaison d'indices est considérée :

Le nombre de jours où la température maximale est supérieure à 20°C de juin à novembre (#36) avec l'indice du minimum de débit d'hiver/printemps de décembre à mai en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#80) (Les deux séries d'indices et la série du maximum de niveau d'eau estival donnent un total de 44 années complètes).

5.3.1. Choix de niveau de dépendance dans la GEV

La statistique de déviance suggère également d'utiliser les deux indices comme covariables dans le paramètre de position (dépendance linéaire).

5.3.2. Valeurs des périodes de retour conditionnelles

Avec un calcul stationnaire, sans covariables, la valeur de la période de retour de 2 ans est de 0,662 m pour le maximum de niveau d'été.

En prenant la moyenne des covariables pour les années 1960, 1970, 1980 etc., on voit le changement des valeurs de périodes de retour de 2 ans et 5 ans entre parenthèses. La tendance vers le bas est évidente :

Les années 1960 :0,625 m (0,924 m)

Les années 1970 :0,931 m (1,230 m)

Les années 1980 :0,783 m (1,082 m)

Les années 1990 :0,650 m (0,949 m)

Les années 2000 :0,561 m (0,860 m)

Avec les valeurs les plus extrêmes observées des covariables qui mènent plutôt aux faibles valeurs de retour, on obtient :

0,011 m et 0,310 m (pour 2 ans et 5 ans de récurrence, respectivement)

Avec les valeurs les plus extrêmes observées des covariables qui mènent plutôt aux valeurs de périodes de retour élevées, on obtient :

1,354 m et 1,653 m (pour 2 ans et 5 ans de récurrence, respectivement)

Les différences sont encore plus claires dans le graphique de la fonction de répartition :

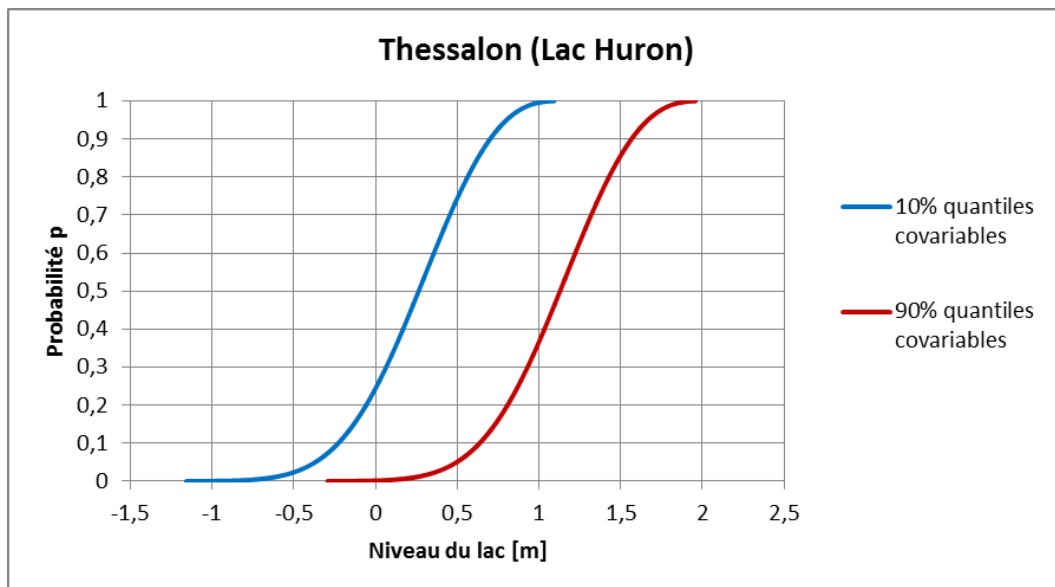


Figure 5: La fonction de répartition pour deux combinaisons différentes de covariables

La courbe bleue représente la fonction de répartition pour le quantile 10% des covariables observées, et la courbe rouge représente la fonction de répartition pour le quantile 90% des covariables observées.

Avec ces résultats, il est évident que l'influence des variables explicatives (les covariables) est assez prononcée, et peut faire des différences importantes dans les valeurs des périodes de retour. Ainsi, la figure 5 montre que pour des valeurs relativement faibles (10^e quantile) de la covariable, la distribution des niveaux estimés est décalée vers des valeurs nettement plus faibles que lorsque l'estimation du paramètre de la GEV est faite à l'aide de valeurs plus élevées de la covariable.

Plus de résultats sont présentés à l'Annexe 5.

5.4. Lac Érié

5.4.1. Choix des indices

Dans un premier temps, on a considéré les indices les plus corrélés avec la variable du maximum de niveau d'eau estival, puis on a calculé la corrélation linéaire entre les indices pré-sélectionnés afin de choisir les deux moins corrélés pour l'étude multivariée. Le tableau A6.1 de l'Annexe 6 présente les résultats de corrélations (Spearman et Kendall) entre les différents indices développés et le maximum de niveau estival du lac Érié. Les indices choisis sont des indices ayant une corrélation significative à 99% avec le niveau maximal du lac. Ces différents indices sont: 90^{ème} percentile de pluie printanière de mars à mai (#7), 90^{ème} percentile de pluie printanière de mars à juin (#8), précipitations totales d'octobre à juin (#9), précipitations totales de novembre à juin (#12), précipitations liquides de mars à juin (#22), précipitations liquides de mars à juillet (#23), moyenne de débit d'été

de juillet à août (#54), maximum de débit d'été de juillet à août (#58), minimum de débit de printemps d'avril à juin (#61), minimum de débit d'été de juillet à août (#62), minimum de débit de printemps d'avril à juin en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#73), maximum de débit d'été de juillet à août en utilisant fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#75), maximum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#76), minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#77), minimum de débit d'été de juillet à août en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#78), minimum de débit été/automne de juin à novembre en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#85) et min de débit été/automne de juin à novembre en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#86). (Voir tableau A2.6 pour la signification de tous les indices utilisés). Étant donné que pour quelques indices, les séries de données ne sont pas assez importantes (moins de 30 ans de données), on a décidé de rajouter quatre autres indices à l'ensemble choisi, qui sont corrélés significativement à 95% avec le niveau maximal du lac Érié (précipitations solides au mois d'avril (#19), précipitations liquides de mars à mai (#21), maximum de précipitations cumulées pendant 5 jours de mars à mai (#27) et degré jour Tmoy de juin à novembre en utilisant une fenêtre mobile de moyenne de 10 jours (#46)) et qui ont plus de 40 ans de données. Les tableaux A6.2 et A6.3 représentent les résultats de corrélations entre les indices choisis. Finalement, sept couples d'indices répondent aux critères suivants :

1. Précipitations totales (novembre-juin) avec Débit moyen d'été (juillet-septembre) (#12 et #54)

2. Précipitations totales (novembre-juin) avec Maximum de débit d'été (juillet-septembre) (#12 et #58)
3. Précipitations totales (novembre-juin) avec Maximum de débit d'été (juillet-septembre) (fenêtre mobile de moyenne de 30 jours) (#12 et #76)
4. Précipitations liquides (mars-mai) avec Débit moyen d'été (juillet-septembre) (#21 et #54)
5. Précipitations liquides (mars-mai) avec Débit maximum d'été (juillet-août), fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#21 et #75)
6. Précipitations solides (avril) avec Minimum de débit d'été (juin-novembre), fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#19 et #86)
7. Précipitations solides (avril) avec Le degré jour de la température moyenne (juin-novembre), fenêtre mobile de 10 jours $>16^{\circ}\text{C}$ (#19 et #46)

Compte tenu du grand nombre de valeurs manquantes dans la série de l'indice de précipitations totales de novembre à juin (indice 12 avec seulement 28 ans de données complètes) et que l'indice de précipitations solides au mois d'avril (#19) contient plusieurs valeurs de 0, ce qui rend l'ajustement d'une loi de probabilité impossible, on a décidé d'utiliser l'indice de précipitations liquides de mars à mai (#21) et l'indice de débit maximum d'été de juillet à août (#75) en cas multivarié pour voir leurs effets sur les périodes de retour conjointes et conditionnelles du niveau maximum estival du lac Érié.

5.4.2. Probabilités marginales

- a) Maximum de niveau estival du lac Érié

Cette section représente les probabilités marginales des maximums des niveaux d'eau estivaux du lac Érié. La loi utilisée est la distribution log-normale à deux paramètres $LN2(\mu, \sigma)$ ajustée avec la méthode du maximum de vraisemblance avec la taille de la série $N = 48$. Le choix de l'ajustement (fig. 6) le plus approprié à la série de données est basé sur le critère d'information d'Akaike (AIC). Les paramètres estimés sont $\hat{\mu} = 0.1391$ et $\hat{\sigma} = 0.2630$. Les quantiles de cette loi sont donnés dans le tableau 5 pour les périodes de retour les plus utilisées.

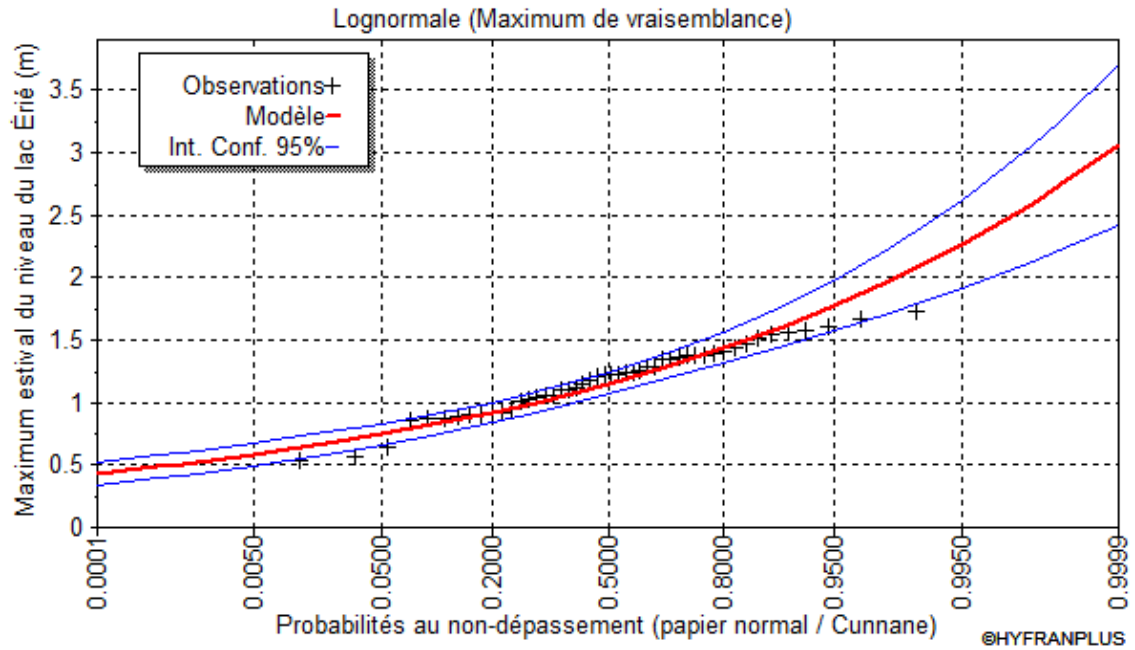


Figure 6: Ajustement du maximum estival du niveau du lac Érié par la loi log-normale

Tableau 5: Les quantiles du niveau du lac Érié pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Niveau (m)	Écart-type (m)	Intervalle de confiance (95%) asymptotique
10000	0,9999	3,06	0,33	2,51-3,79
2000	0,9995	2,73	0,26	2,29-3,32

1000	0,9990	2,59	0,24	2,19-3,11
200	0,9950	2,26	0,18	1,96-2,65
100	0,9900	2,12	0,15	1,85-2,45
50	0,9800	1,97	0,13	1,74-2,25
20	0,9500	1,77	0,10	1,58-1,98
10	0,9000	1,61	0,08	1,45-1,78
5	0,8000	1,43	0,06	1,31-1,57
3	0,6667	1,29	0,05	1,19-1,39
2	0,5000	1,15	0,05	1,07-1,24

b) Précipitations liquides (mars-mai)

La série de données des précipitations liquides entre le mois de mars et le mois de mai a été modélisée par la loi Gamma à deux paramètres $G(\alpha, \lambda)$ ajustée par la méthode du maximum de vraisemblance pour une taille $N = 45$. Les paramètres estimés sont $\hat{\alpha} = 16.0537$ et $\hat{\lambda} = 1.2768$. Le tableau 6 présente les quantiles de probabilité marginale au dépassement pour cette variable.

Tableau 6: Les quantiles des précipitations liquides (mars-mai) pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Précipitations liquides (mars-mai) (mm)	Écart-type (mm)	Intervalle de confiance (95%) asymptotique
10000	0,9999	45,16	3,59	38,12-52,20
2000	0,9995	41,59	3,07	35,58-47,61
1000	0,9990	39,99	2,84	34,42-45,56
200	0,9950	36,05	2,29	31,54-40,56
100	0,9900	34,23	2,06	30,19-38,27
50	0,9800	32,32	1,82	28,75-35,88
20	0,9500	29,57	1,49	26,65-32,50
10	0,9000	27,26	1,24	24,82-29,70
5	0,8000	24,63	1,00	22,66-26,60
3	0,6667	22,38	0,97	20,72-24,04

2	0,5000	20,07	0,97	18,60-21,55
---	--------	--------------	------	-------------

c) Maximum de débit d'été (juillet-septembre)

Cette variable est calculée en considérant une fenêtre mobile de 15 jours. Cette section présente les probabilités marginales du maximum de débit d'été pour les mois de juillet à septembre. La loi sélectionnée est une la distribution log-normale $LN2(\mu, \sigma)$ ajustée avec la méthode du maximum de vraisemblance pour une taille $N = 49$. Pour cet ajustement, les estimations des paramètres sont $\hat{\mu} = 2.0045$ et $\hat{\sigma} = 0.7407$. Le tableau 7 présente les quantiles de probabilité marginale au dépassement pour cette variable.

Tableau 7: Les quantiles du Maximum de débit d'été (juillet-septembre) pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Maximum de débit d'été (juillet-septembre) (m3/s)	Écart-type (m3/s)	Intervalle de confiance (95%) asymptotique
10000	0,9999	116,65	35,04	47,97-185,33
2000	0,9995	84,93	22,96	39,93-129,94
1000	0,9990	73,23	18,78	36,42-110,04
200	0,9950	50,03	11,09	28,30-71,76
100	0,9900	41,59	8,53	24,86-58,32
50	0,9800	33,99	6,38	21,47-46,50
20	0,9500	25,10	4,10	17,07-33,14
10	0,9000	19,18	2,75	13,78-24,57
5	0,8000	13,84	1,71	10,49-17,19
3	0,6667	10,21	1,13	7,99-12,42
2	0,5000	7,42	0,78	5,88-8,96

5.4.3. Étude de la distribution conjointe des trois variables

À partir de la figure 7 qui représente la distance quadratique séparant les valeurs estimées $\hat{K}(z)$ des valeurs théoriques, on trouve que la copule de Frank est la mieux adaptée pour représenter l'interdépendance des variables dans notre cas ($L^2_{Frank} = 0.0017$ et $L^2_{Clayton} = 0.0026$)

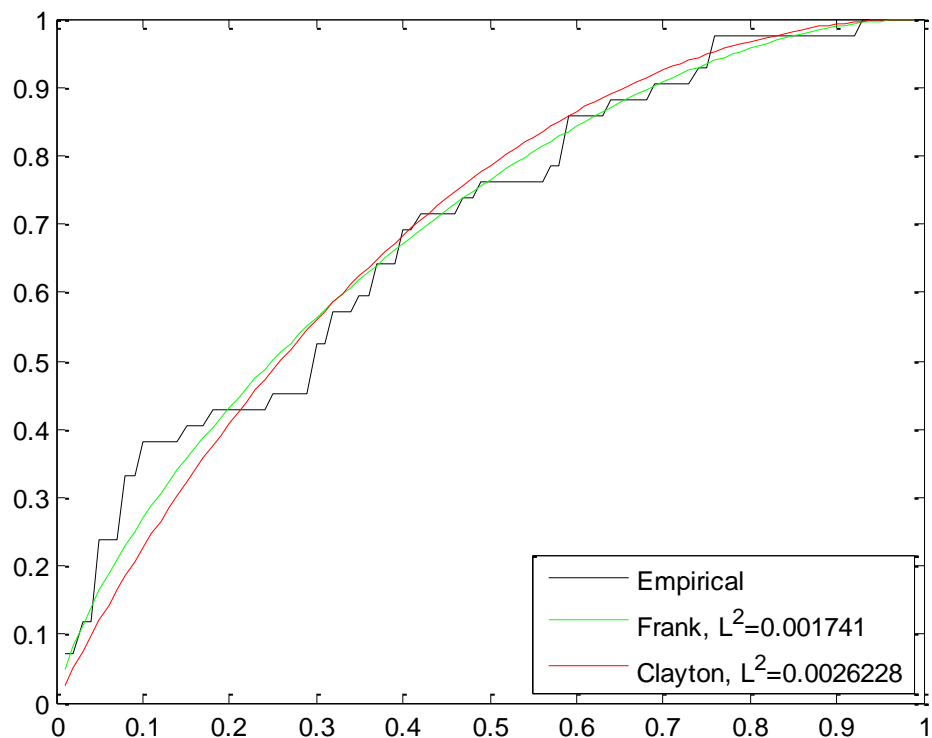


Figure 7: Représentation de la distance quadratique entre les valeurs théoriques et les valeurs estimées de K avec la copule de Frank et la copule de Clayton

Les problèmes de calcul numérique liés au calcul des probabilités sont résolus en ayant recours à des simulations de Monte Carlo. La figure 8 présente 10000 valeurs simulées des trois variables considérées en 3D et en 2D à partir du modèle trivarié de la copule de Frank. Ces simulations sont considérées pour calculer les périodes de retour conjointes et conditionnelles.

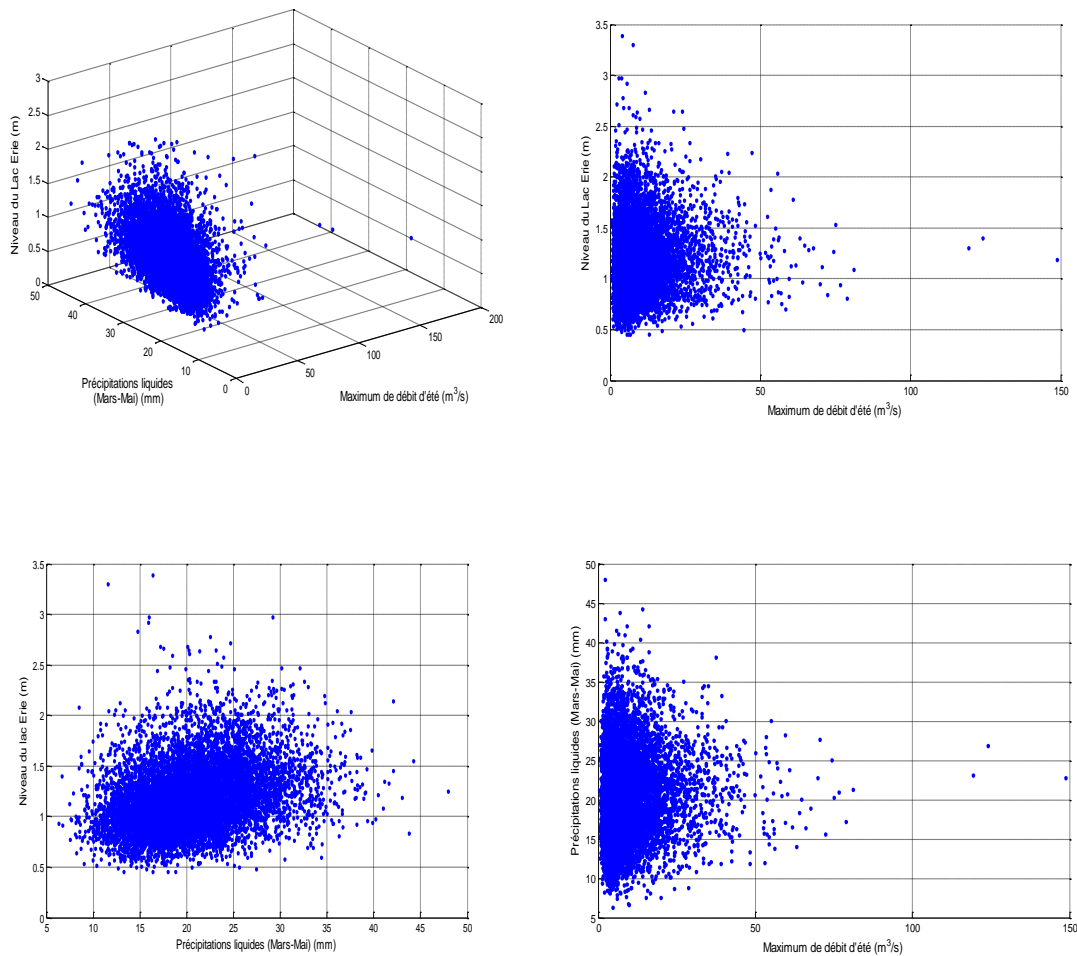


Figure 8: Représentation graphique des valeurs simulées du niveau maximum du lac, Maximum de débit d'été et les précipitations liquides par la copule de Frank (N=10000) en 3 dimensions et 2 dimensions respectivement

L'interprétation des périodes de retour conjointes (T) pour deux variables consiste à attribuer une probabilité au non dépassement ($p = 1/T$) aux deux variables simultanément par rapport à un évènement donné. C'est la probabilité pour laquelle les deux variables dépassent simultanément certains seuils.

Le tableau 8 illustre les périodes de retour conjointes bivariées, calculées avec la copule de Frank, du maximum du niveau du lac avec le maximum de débit d'été et les précipitations liquides de mars à mai pour un événement assez fréquent ($T = 2$). La période de retour est passée de 2 à 3 ans en association avec la variable de précipitations liquides et de 2 à 4 ans en association avec le maximum de débit d'été. Plus d'informations sur les périodes de retour conjointes bivariées sont données aux tableaux A6.4 et A6.5 de l'Annexe 6. Cette période de retour va augmenter davantage en rajoutant de l'information sur deux variables reliées au maximum de niveau du lac. Une période de retour conjointe trivariée est la probabilité pour laquelle les trois variables dépassent simultanément certains seuils.

Tableau 8: Périodes de retour conjointes bivariées entre le maximum de niveau du lac Érié avec les précipitations liquides et avec le maximum de débit d'été

	Précipitations liquides : 20,07 mm (T=2)	Maximum de débit d'été : 7,42 m ³ /s (T=2)
Niveau du lac : 1.15 m (T=2)	3-3	4-4

Les tableaux A6.6, A6.7, A6.8 et A6.9 de l'Annexe 6 présentent les probabilités conjointes pour les trois variables pour des périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans du maximum estival du niveau du lac Érié. Par exemple, la valeur maximale du maximum du niveau du lac est de de **1,735 m**, observée en 1986. Cette valeur a une période de retour de 17 ans dans le cas univarié selon l'ajustement de la loi log-normale. Cependant, en association avec les valeurs correspondantes des précipitations liquides de 26,231 mm, de période de retour de 8 ans dans le cas univarié et du débit maximal estival de 49,64

m³/s, de période de retour de 194 ans dans le cas univarié, la période de retour conjointe augmente considérablement. Elle est comprise entre 3846 ans et 25 000 ans.

Les périodes de retour conditionnelles peuvent être plus représentatives de l'effet simultané des deux variables considérées sur le niveau maximal du lac. En effet, pour les mêmes évènements préalablement évoqués, la période de retour conditionnelle trouvée est comprise entre 3 et 12 ans. Donc, le fait de ne pas considérer l'effet des deux covariables sur le niveau du lac va entraîner une surestimation de la période de retour de cet évènement, dans le contexte d'occurrence des indices hydroclimatiques. Les tableaux A6.10, A6.11, A6.12 et A6.13 de l'Annexe 6 présentent les périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Érié pour des périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans.

5.5. Lac Ontario

5.5.1. Choix des indices

Dans cette partie, on étudie le modèle de dépendance entre le maximum de niveau estival du lac Ontario avec deux indices hydrométéorologiques. Comme pour le premier modèle du lac Érié, les indices les plus corrélés à la variable d'intérêt sont choisis en premier lieu, puis parmi ces derniers, on choisit la paire d'indices les moins corrélés entre eux. Le tableau A7.1 de l'Annexe 7 représente les résultats de corrélations (Spearman et Kendall) entre les indices développés et la variable d'intérêt. Les indices choisis sont : Les précipitations totales de novembre à mars (#2), les précipitations totales d'octobre à juin (#9), les précipitations totales de novembre à avril (#10), les précipitations totales de novembre à mai (#11), les précipitations totales de novembre à juin (#12), les

précipitations totales de décembre à mai (#15), le degré jour de la température maximale de juin à novembre (#40), la moyenne de débit de printemps d'avril à juin (#53), le maximum de débit de printemps d'avril à juin (#57), le minimum de débit d'hiver de janvier à mars (#60), le min de débit d'été de juillet à août avec une fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#77), le min de débit d'été de juillet à août avec une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#78), le minimum de débit d'hiver/printemps de décembre à mai avec une fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#81), le minimum de débit d'hiver/printemps de décembre à mai avec une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#82), le minimum de débit d'été/automne de juin à novembre avec une fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#85) et), le minimum de débit d'été/automne de juin à novembre avec une fenêtre mobile de moyenne de 30 jours (#86).

Le choix des indices à utiliser est effectué en considérant ceux ayant une corrélation significative à 99% avec le maximum estival du niveau du lac Ontario. Cependant, certains indices n'ont pas assez de données pour être utilisés pour l'étude multivariée. Conséquemment, les huit indices ayant une corrélation significative à 95% avec le niveau maximal estival du lac Ontario (les précipitations totales de novembre à mars (#1), les précipitations totales de décembre à avril (#14), le maximum de précipitations cumulées pendant 5 jours de mars à juin (#28), le maximum de précipitations cumulées pendant 5 jours de mars à juillet (#29), la moyenne de débit d'été de juillet à août (#54), le maximum de débit d'automne d'octobre à décembre (#55), le minimum de débit d'été de juillet à août (#62) et le min de débit d'hiver de janvier à mars avec une fenêtre mobile de moyenne de 15 jours (#69)) et qui ont plus de 40 ans de données ont aussi été inclus dans l'analyse. Les tableaux A7.2 et A7.3 résument les résultats de corrélations entre les indices préalablement cités. On a trouvé neuf couples d'indices les moins corrélés entre eux:

1. Les précipitations totales de décembre à mai avec le degré jour de la température maximale de juin à novembre (#15 et #40)
2. Le minimum de débit d'hiver/printemps (décembre à mai) (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours avec le minimum de débit d'été (juin-novembre) (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) (#81 et #85)
3. Le maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours (mars-juin) avec le minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (#28 et # 60)
4. Le maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours (mars-juin) avec le minimum de débit d'hiver/printemps (décembre-mai) (#28 et # 81)
5. Le maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours (mars-juillet) avec les précipitations totales (novembre-avril) (#29 et #10)
6. Le minimum de débit d'hiver (janvier-mars) avec le degré jour de la température maximale (juin-novembre) (#69 et #40)
7. Le minimum de débit d'hiver (janvier-mars) avec la moyenne de débit de printemps (avril-juin) (#69 et #53)
8. La moyenne de débit d'été (juillet-août) avec le total de précipitations (décembre-avril) (#54 et #14)
9. Le minimum de débit d'hiver (janvier-mars) avec la moyenne de débit d'été (juillet-août) (#69 et #54)

Afin de choisir deux indices de natures différentes (un indice d'extrême hydrologique et un indice météorologique) et qui contiennent aussi de longues séries de données complètes (plus de 30 ans de données), on a décidé de travailler avec le 3ème couple d'indices en analyse multivariée pour étudier l'interdépendance du maximum de

précipitations cumulées tous les 5 jours (mars-juin) (#28) et du minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (#60) avec le maximum de niveau estival du lac Ontario.

5.5.2. Probabilités marginales

a) Maximum de niveau estival du lac Ontario

La loi utilisée pour la présentation des probabilités marginales du maximum estival du niveau du lac Ontario est la loi de Gumbel $EV(\mu, \sigma)$. Cette loi est ajustée avec la méthode du maximum de vraisemblance pour une taille $N = 50$. Les estimations des paramètres trouvées sont $\hat{\mu} = 1.067$ et $\hat{\sigma} = 0.227$. Le tableau 9 présente les quantiles de probabilité marginale au dépassement pour cette variable.

Tableau 9: Les quantiles du maximum estival du niveau du lac Ontario pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Niveau (m)	Écart-type (m)	Intervalle de confiance (95%) asymptotique
10000	0,9999	1,57	0,049	1,47-1,66
2000	0,9995	1,52	0,046	1,43-1,61
1000	0,9990	1,50	0,044	1,42-1,59
200	0,9950	1,44	0,040	1,36-1,52
100	0,9900	1,41	0,039	1,33-1,49
50	0,9800	1,37	0,037	1,30-1,45
20	0,9500	1,31	0,034	1,25-1,38
10	0,9000	1,25	0,032	1,19-1,32
5	0,8000	1,17	0,032	1,11-1,24
3	0,6667	1,09	0,033	1,02-1,15
2	0,5000	0,98	0,037	0,91-1,05

b) Maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours (mars-juin)

Cette section présente les probabilités marginales du maximum de précipitations cumulées tous les cinq jours entre le mois de mars et le mois de juin. La loi choisie est la loi Gamma à deux paramètres $G(\alpha, \lambda)$ ajustée avec la méthode du maximum de

vraisemblance pour une taille $N = 40$. Pour cet ajustement, les estimations des paramètres sont $\hat{\alpha} = 16.08$ et $\hat{\lambda} = 0.33$. Le tableau 10 présente les quantiles de probabilité marginale au dépassement pour cette variable.

Tableau 10: Les quantiles du maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Maximum de précipitations cumulées (mars-juin) (mm)	Écart-type (mm)	Intervalle de confiance (95%) asymptotique
10000	0,9999	11,92	1,00	9,95-13,89
2000	0,9995	10,98	0,86	9,30-12,66
1000	0,9990	10,56	0,79	9,00-12,12
200	0,9950	9,52	0,64	8,26-10,78
100	0,9900	9,04	0,57	7,91-10,17
50	0,9800	8,53	0,51	7,54-9,53
20	0,9500	7,81	0,41	6,99-8,63
10	0,9000	7,20	0,35	6,52-7,89
5	0,8000	6,50	0,28	5,95-7,06
3	0,6667	5,91	0,27	5,45-6,38
2	0,5000	5,30	0,27	4,89-5,71

c) Minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Dans cette section, le minimum de débit d'hiver de janvier à mars est ajusté avec la loi de Gumbel $EV(\mu, \sigma)$ en utilisant une série de données de taille $N = 50$. L'ajustement est fait par l'intermédiaire de la méthode du maximum de vraisemblance. Les estimations des paramètres sont $\hat{\mu} = 4.76$ et $\hat{\sigma} = 1.78$. Le tableau 11 présente les quantiles de probabilité marginale au dépassement pour cette variable.

Tableau 11: Les quantiles du minimum de débit d'hiver (janvier-mars) pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Le minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)	Écart type	Intervalle de confiance (95%) asymptotique
10000	0,9999	8,72	0,38	7,98-9,47
2000	0,9995	8,38	0,35	7,69-9,08
1000	0,9990	8,21	0,34	7,54-8,88
200	0,9950	7,74	0,31	7,12-8,35
100	0,9900	7,49	0,30	6,89-8,08
50	0,9800	7,19	0,28	6,63-7,76
20	0,9500	6,72	0,27	6,19-7,25
10	0,9000	6,25	0,25	5,74-6,75
5	0,8000	5,61	0,25	5,11-6,10
3	0,6667	4,93	0,26	4,41-5,44
2	0,5000	4,10	0,29	3,52-4,68

5.5.3. Étude de la distribution conjointe des 3 covariables

La figure 9 présente la distance quadratique séparant les valeurs théoriques des valeurs estimées $\hat{K}(z)$. Dans notre cas d'étude pour le lac Ontario, la copule de Frank semble être la mieux adaptée pour la représentation de l'interdépendance des variables utilisées (

$$L_{Frank}^2 = 0.0013 \text{ et } L_{Clayton}^2 = 0.0014)$$

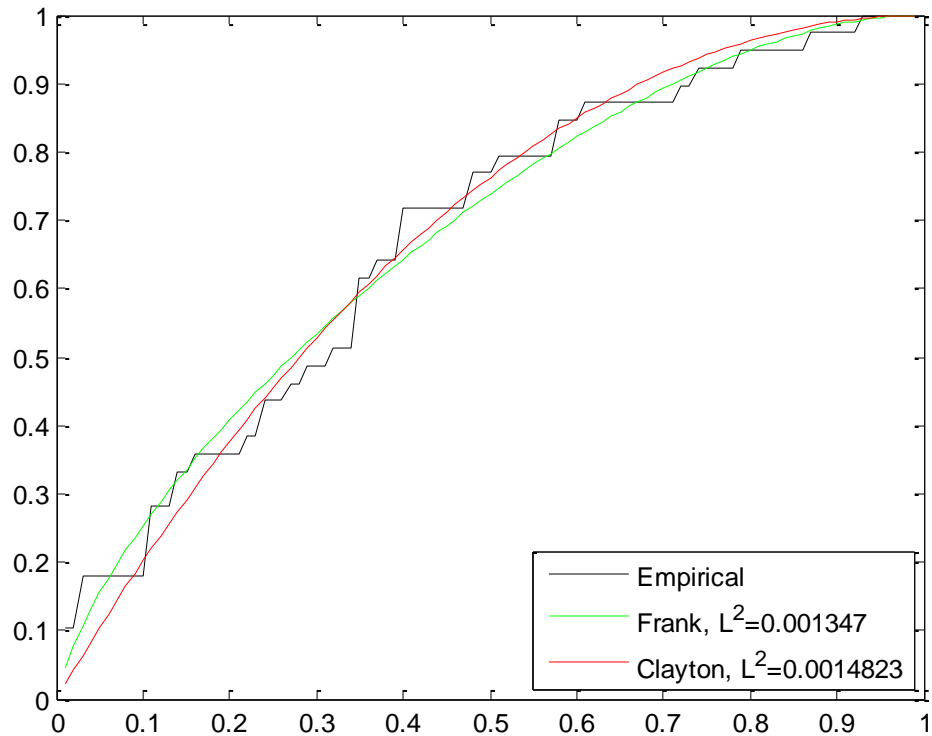


Figure 9: Représentation de la distance quadratique entre les valeurs théoriques et les valeurs estimées de K avec la copule de Frank et la copule de Clayton pour le lac Ontario

Comme pour le cas du lac Érié, des simulations de Monte Carlo sont utilisées pour résoudre les problèmes de calcul numérique. La figure 10 présente les simulations (N=10000) des trois variables utilisées en 3D et 2D à partir de la copule de Frank. On s'en servira après pour le calcul des périodes de retour conjointes et conditionnelles.

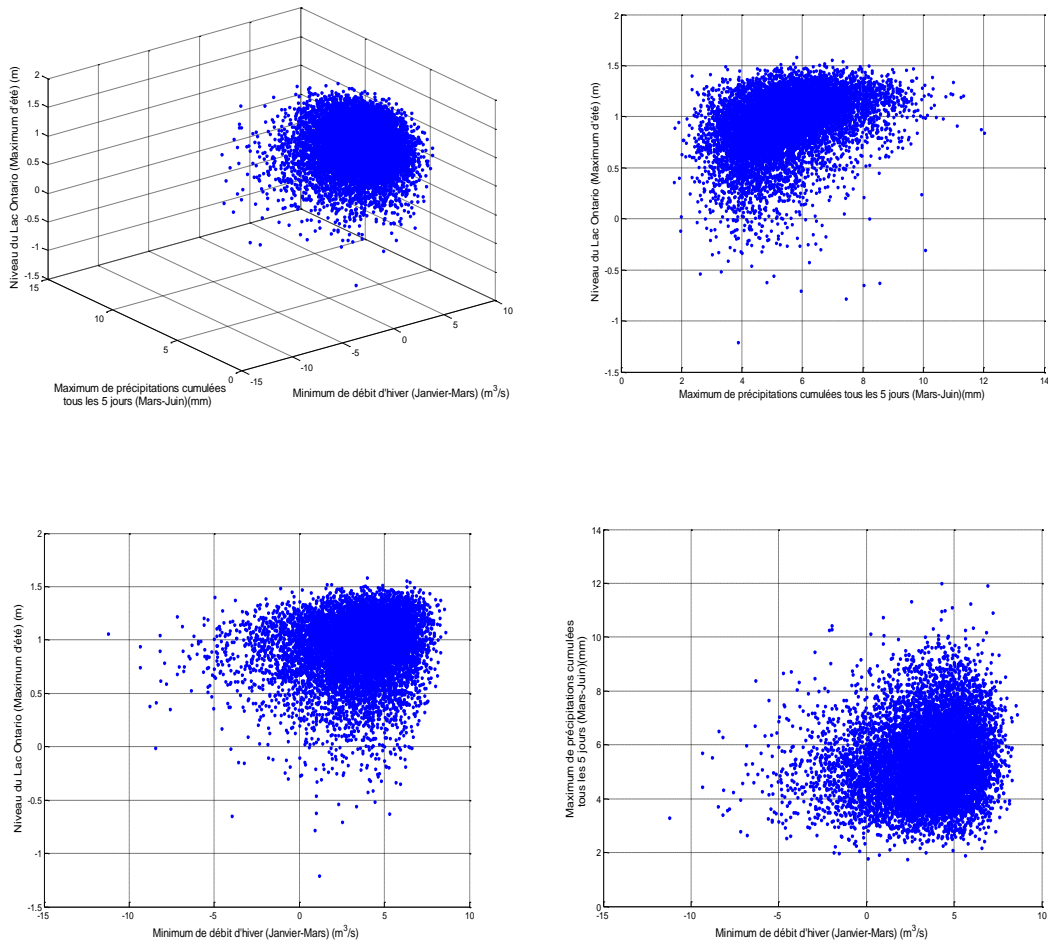


Figure 10: Représentation graphique des valeurs simulées du niveau maximum du lac Ontario, Maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours et le minimum de débit d'hiver par la copule de Frank (N=10000) en 3 dimensions et 2 dimensions respectivement

Comme pour le lac Érié, les périodes de retour bivariées conjointes, calculées par l'intermédiaire de la copule de Frank, du maximum estival du niveau du lac Ontario avec le minimum de débit d'hiver et le maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours de mars à juin ont augmenté par rapport aux cas univariés. Ceci peut être vu à partir du tableau 12 présentant les périodes de retours conjointes bivariées pour un évènement

assez fréquent ($T = 2$). Les tableaux A7.4 et A7.5 de l'annexe 7 présentent les périodes de retour conjointes bivariées pour ($T = 3; T = 5; T = 10$ et $T = 20$).

Tableau 12: Périodes de retour conjointes bivariée entre le maximum de niveau estival du lac Ontario avec le maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours de mars à juin et le minimum de débit d'hiver de janvier à mars

	Maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours (mars-juin) : 5,30 mm	Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) : 4,10 m ³ /s
Niveau du lac Ontario : 0,98m (T=2)	3-3	4-4

Dans le cas trivarié, les périodes de retour conjointes ont augmenté énormément par rapport aux périodes de retour univariées. Les tableaux A7.6, A7.7, A7.8 et A7.9 de l'Annexe 7 présentent les périodes de retour conjointes pour les trois variables pour des périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans du maximum estival du niveau du lac Ontario. Par exemple, le maximum de niveau d'été-automne de l'année 1972 est de **1,198 m**, et a une période de retour univariée de 6 ans selon l'ajustement de la loi de Gumbel. Cependant, en l'associant aux valeurs correspondantes de maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours de mars à juin de 5,798 mm d'une période de retour univariée de 3 ans selon l'ajustement de la loi Gamma et du minimum de débit d'hiver de janvier à mars de 4,96 m³/s d'une période de retour de 3 ans selon l'ajustement de la loi de Gumbel, la période de retour conjointe a augmenté considérablement. Elle est comprise entre 21 et 23 ans.

Les périodes de retour conditionnelles sont plus représentatives de l'effet simultané des indices choisis sur le niveau maximal du lac Ontario. En effet, pour les mêmes événements cités, la période de retour conditionnelle trouvée est de 3 ans. Donc, le fait de ne pas considérer l'effet des deux indices hydrométéorologiques entraînera une

surestimation de la période de retour de cet évènement. Les tableaux A7.10, A7.11, A7.12 et A7.13 de l'annexe 7 présentent les périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Ontario pour des périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans.

5.6. Fleuve Saint-Laurent

5.6.1. Choix des indices

L'étude multivariée du niveau à la station Upper Iroquois est effectuée en considérant des variables hydrométéorologiques observées dans plusieurs sous-bassins du fleuve les plus proches de la station d'étude. Trois stations hydrométriques et une station météorologique ont été considérées, afin d'identifier les variables à utiliser dans le modèle multivarié. Le choix des variables s'est effectué à partir des résultats des corrélations de Spearman et Kendall. Ces deux mesures sont équivalentes et basées sur les rangs et ne sont pas affectées par les valeurs extrêmes.

Les trois stations de débits ont été considérées dans un premier temps pour en retenir celle qui correspond à des indices hydrométriques les plus corrélés avec la variable Niveau. Les différentes variables correspondent aux indices hydrométéorologiques présentés au tableau A2.6.

Le tableau A8.1 de l'Annexe 8 représente les caractéristiques de la station Upper Iroquois et des stations hydrométéorologiques considérées pour le calcul des indices. Les premières analyses montrent que pour la variable du niveau maximum Été-Automne, les indices hydrométriques obtenus à partir de la station Sainte-Anne-de-Bellevue sont les plus corrélés avec la variable Niveau à la station Upper Iroquois. Lorsqu'on considère tous les indices hydrométriques (Sainte-Anne-de-Bellevue) et météorologiques (Ottawa

CDA), les variables les plus corrélées avec la variable Niveau sont les indices associés aux numéros # 2, 24, 36, 47 et 84 (tableau A8.2).

Les indices hydrométéorologiques choisis à cette étape sont :

2 : Précipitations totales solides et liquides (octobre-mai)

24 : Indice d'intensité journalière SDII (mars-mai)

36 : Nombre de jours avec $T_{\max} > 20^{\circ}\text{C}$ (juin-novembre)

47 : Nombre d'épisode de 10 jours avec $T_{\text{mean}} > 17^{\circ}\text{C}$ (juin-novembre)

84 : Débit maximum moyen sur une fenêtre mobile de 30 jours (juin-novembre)

Les corrélations entre ces indices et les p-value, sont présentées au tableau A8.3 de l'Annexe 8. Compte tenu des résultats des corrélations entre les indices et le niveau maximum Été-Automne à la station Upper Iroquois, l'indice du Nombre de jours avec $T_{\max} > 20^{\circ}\text{C}$ (juin-novembre) (indice #36) et le Débit maximum moyen sur une fenêtre mobile de 30 jours (juin-novembre) (indice #84) sont retenus.

5.6.2. Les probabilités marginales

Cette section représente les probabilités marginales des deux indices hydrométéorologiques et du niveau maximum été-automne à Upper Iroquois. Le choix est basé sur le critère d'information d'Akaike (AIC).

a) Niveau maximum été-automne à Upper Iroquois

La loi log-normale à deux paramètres $LN2(\mu, \sigma)$ a été choisie pour l'ajustement de la série (de taille $N = 43$) du niveau maximum été-automne à Upper Iroquois sur le fleuve Saint-Laurent. L'ajustement est effectué par la méthode du maximum de vraisemblance et mène au modèle $LN(\hat{\mu} = 0.0838, \hat{\sigma} = 0.1717)$. Les quantiles de cette loi sont donnés dans le tableau 13 pour les périodes de retour les plus utilisées.

Tableau 13: Les quantiles du niveau à la station Upper Iroquois pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Niveau (m)	Écart-type(m)	Intervalle de Confiance (95%)
10000	0,9999	2,06	0,153	1,76 - 2,36
2000	0,9995	1,91	0,128	1,66 - 2,17
1000	0,9990	1,85	0,118	1,62 - 2,08
200	0,9950	1,69	0,0930	1,51 - 1,88
100	0,9900	1,62	0,0825	1,46 - 1,78
50	0,9800	1,55	0,0721	1,41 - 1,69
20	0,9500	1,44	0,0584	1,33 - 1,56
10	0,9000	1,36	0,0482	1,26 - 1,45
5	0,8000	1,26	0,0384	1,18 - 1,33
3	0,6667	1,17	0,0321	1,11 - 1,23
2	0,5000	1,09	0,0285	1,03 - 1,14

b) Indice du nombre de jours avec $T_{max} > 20$

L'ajustement de la série des observations (de taille $N = 110$) de cette variable est effectuée par la loi Gamma à deux paramètres $G(\alpha, \lambda)$. L'estimation des paramètres est effectuée par la méthode du maximum de vraisemblance et mène au modèle $G(\hat{\alpha} = 2.05, \hat{\lambda} = 212.04)$. Les quantiles estimés, sont donnés dans le tableau 14 pour différentes périodes de retour.

Tableau 14: Les quantiles du nombre de jours avec $T_{max} > 20$ pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	Écart-type	Intervalle de confiance (95%)
10000	0,9999	132	2,24	127 - 136
2000	0,9995	128	1,98	124 - 132
1000	0,9990	127	1,86	123 - 130
200	0,9950	122	1,57	119 - 126
100	0,9900	120	1,44	118 - 123
50	0,9800	118	1,31	116 - 121
20	0,9500	115	1,12	113 - 117
10	0,9000	112	0,966	111 - 114
5	0,8000	109	0,817	108 - 111
3	0,6667	106	0,721	105 - 108
2	0,5000	103	0,675	102 - 104

c) Débit maximum moyen sur 30 jours

L'ajustement de la série des observations (de taille $N = 71$) de cette variable est effectuée par la loi Gamma $G(\alpha, \lambda)$. L'estimation des paramètres est effectuée par la méthode du maximum de vraisemblance et mène au modèle $G(\hat{\alpha} = 202.15, \hat{\lambda} = 4508.28)$.

Les quantiles estimés sont donnés dans le tableau 15.

Tableau 15: Les quantiles du débit maximum moyen pour différentes périodes de retour

Période de retour T (ans)	Probabilité au non-dépassement	Débit maximum moyen (m ³ /s)	Écart-type	Intervalle de Confiance (95%)
10000	0,9999	23,6	0,115	23,3 - 23,8
2000	0,9995	23,4	0,103	23,2 - 23,6
1000	0,9990	23,3	0,0976	23,2 - 23,5
200	0,9950	23,2	0,0840	23,0 - 23,3
100	0,9900	23,1	0,0776	22,9 - 23,2
50	0,9800	23,0	0,0709	22,8 - 23,1
20	0,9500	22,9	0,0614	22,7 - 23,0
10	0,9000	22,7	0,0539	22,6 - 22,8
5	0,8000	22,6	0,0462	22,5 - 22,7
3	0,6667	22,4	0,0414	22,4 - 22,5
2	0,5000	22,3	0,0394	22,2 - 22,4

5.6.3. Étude de la distribution conjointe des trois covariables

Les périodes de retour conditionnelles sont plus représentatives de l'effet simultané des deux variables considérées sur le niveau maximal à la station Upper Uroquois du fleuve Saint-Laurent. En effet, pour l'événement de période de retour 20 ans du niveau, les périodes de retour conditionnelles aux différentes combinaisons des indices de température et du débit sont comprises entre 3 et 12 ans. Les tableaux A8.4 à A8.11 de l'Annexe 8 présentent les périodes de retour conjointes et conditionnelles du niveau maximum estival à Upper Iroquois avec les deux indices de température et de débit pour les périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans.

6. Discussion et conclusions

Les travaux complétés dans cette étude ont permis d'utiliser le potentiel des analyses des extrêmes hydrométéorologiques dans un cadre multivarié. Les niveaux des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent ont été étudiés à maintes reprises dans le passé (ex. Croley II, 2003, Mortsch et Quinn, 1996). Cependant, le contexte multivarié permet d'obtenir des

informations supplémentaires. Dans la présente étude, de nombreux indices météorologiques ayant une influence potentielle sur les niveaux des Grands Lacs ont été sélectionnés sur la base de leur corrélation avec les séries de niveaux. Deux cas ont été étudiés : le cas stationnaire, par le truchement des copules et le cas non-stationnaire, avec une estimation de quantiles complétée par l'ajustement de la loi GEV avec paramètres dépendant des indices sélectionnés.

Le cadre stationnaire permet d'exploiter la polyvalence des copules. Les probabilités marginales de la variable principale et des indices, leur probabilité conjointe et les probabilités conditionnelles peuvent être comparées. Plus la variable principale dépend de l'indice météorologique, plus la probabilité conditionnelle sera faible, et ce, en dépit d'une probabilité conjointe qui peut être extrême. C'est le cas des niveaux maximum analysés pour le lac Ontario avec le minimum de débit d'hiver et le maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours de mars à juin. Ces covariables étant fortement corrélées au niveau, les probabilités conjointes sont plus élevées que celles des cas univariés, (augmentation de 2 à plus de 20 ans), tandis que les probabilités conditionnelles sont plus faibles que les probabilités marginales univariées. On soupçonne donc que le lien de causalité entre débits d'hiver maximum est ces covariables est adéquatement pris en compte par les copules.

L'application de copules dans un cadre trivarié offre plusieurs avantages. Dans le cas précis de l'étude des niveaux des Grands Lacs et du Saint-Laurent, cela permet non seulement d'identifier des indices météorologiques pouvant servir éventuellement de prédicteurs pour des conditions de niveau extrême, mais la même approche pourrait aussi servir afin de faire une analyse plus fine des niveaux extrêmes. Non seulement les

maxima peuvent être étudiés, mais les minima pourraient être aussi soumis à la même analyse. De plus, la même approche pourrait permettre l'analyse conjointe de plusieurs caractéristiques des niveaux maximum ou minimum. Par exemple, l'analyse de la valeur de niveau maximum pourrait être faite conjointement avec la durée de l'événement extrême culminant avec ce niveau extrême. Une autre variable d'intérêt pourrait être le volume d'eau associé au dépassement d'un certain seuil jugé extrême, ou son opposé, le déficit volumétrique associé à un événement de faible niveau, sous un seuil prescrit.

Bien que l'utilisation de la GEV non-stationnaire ne permette pas une analyse identique, la définition de paramètres de cette loi qui sont dépendants de covariables permet de faire une analyse plus fine de l'évolution des quantiles dans le temps. Ainsi dans la présente étude, l'évolution des quantiles de période de retour de 2 ans des niveaux du lac Supérieur montre une baisse significative (plus d'un mètre) entre 1970 et 2000, lorsque les covariables sont incluses dans le modèle. Ces quantiles conditionnels aux covariables météorologiques ne sont pas directement comparables à ceux calculés par les copules. Cependant, le contexte non-stationnaire est d'une importance majeure dans un système en évolution comme celui des Grands Lacs et du Saint-Laurent. En ce qui a trait à l'identification des principales variables atmosphériques et de leur combinaison, qui influencent les extrêmes hydrologiques, les deux approches proposées permettent d'évaluer quantitativement les liens entre les extrêmes (par ex. niveaux maximums saisonniers) et les variables explicatives (par ex. débits des affluents et précipitations antécédentes). L'approche est donc prometteuse.

Références

- Clayton, D.G. 1978. A model for association in bivariate life tables chronic disease incidence. *Biometrika*, 65(1) : 141-151.
- Clites, A. H. and F. H. Quinn (2003). "The history of Lake Superior regulation: Implications for the future." *Journal of Great Lakes Research* 29(1): 157-171.
- Croley II.T.E, C. (2003). "Great Lakes climate change hydrologic impact assessment: IJC Lake Ontario-St. Lawrence River regulation study." NOAA Technical Memorandum GLERL-126. Great Lakes Environmental Research Laboratory, Ann Arbor, Michigan.
- Ehsanzadeh, E., H. M. Saley, T. B. M. J. Ouarda, D. H. Burn, A. Pietroniro, O. Seidou, C. Charron and D. Lee (2013). "Analysis of changes in the Great Lakes hydro-climatic variables." *Journal of Great Lakes Research* 39(3): 383-394.
- El Adlouni, S. and T. B. M. J. Ouarda (2008). "Étude de la loi conjointe débit-niveau par les copules : Cas de la rivière Châteauguay." *Canadian Journal of Civil Engineering* 35(10): 1128-1137.
- El Adlouni, S., Ouarda, T.B.M.J., Zhang, X., Roy, R. and Bobée, B (2007). "Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model." *Water Resources Research*, 43, W03410.
- Frank, M.J. 1979. On the simultaneous associativity of $F(x, y)$ and $x + y - F(x, y)$. *Aequationes Mathematicae*, 19(1) : 194-226.
- Genest, C. and Rivest, L.P. (1993). "Inference Procedures for Bivariate Archimedean Copulas". *Journal of the American Statistical Association*, Volume 88, Issue 423. pp 1034-1043
- Lofgren, B. M., F. H. Quinn, A. H. Clites, R. A. Assel, A. J. Eberhardt and C. L. Luukkonen (2002). "Evaluation of potential impacts on Great Lakes water resources based on climate scenarios of two GCMs." *Journal of Great Lakes Research* 28(4): 537-554.
- Lofgren.B.M (2003). Simulation of possible future effects of greenhouse warming on great lakes water supply using a regional climate model. 17th conference on hydrology, 83 rd AMS annual meeting 4.
- Mortsch, L. D. and F. H. Quinn (1996). "Climate change scenarios for Great Lakes Basin ecosystem studies." *Limnology and Oceanography* 41(5): 903-911.

Nelsen, R.B (1999). "An introduction to copulas: Lecture notes in statistics. Springer-Verlag, New York

Prudhomme, Christel, Simon Parry, Jamie Hannaford, Douglas B. Clark, Stefan Hagemann, Frank Voss, 2011: How Well Do Large-Scale Models Reproduce Regional Hydrological Extremes in Europe?. *J. Hydrometeor*, 12, 1181–1204.

Saad C., S. El Adlouni, A. St-Hilaire et P. Gachon (2014). A nested multivariate copula approach to hydrometeorological simulations of spring floods: The case of the Richelieu River (Québec, Canada) record flood. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Soumis (Décembre 2013).

Sklar, A. (1959), "Fonctions de répartition à n dimensions et leurs marges", *Publ. Inst. Statist. Univ. Paris* 8: 229–231

Smith, J. B. (1991). "The Potential Impacts of Climate Change on the Great-Lakes." *Bulletin of the American Meteorological Society* 72(1): 21-28.<

T.B.M.J. Ouarda, E. E., H. M. Saley, N. Khaliq, O. Seidou, C. Charron, A. Pietroniro and D. Lee (2008). "Analysis of Changes in the Great Lakes Net Basin Supply (NBS) Components and Explanatory Variables."

Wang, J., X. Z. Bai, H. G. Hu, A. Clites, M. Colton and B. Lofgren (2012). "Temporal and Spatial Variability of Great Lakes Ice Cover, 1973-2010." *Journal of Climate* 25(4): 1318-1329.

Yee, P., Cuthbert, D., Moulton, R., (1990). The 1987-89 drop in Great Lakes water levels, causes and effects. In: FitzGibbon, J.E. (Ed.), *International and Transboundary Water Resources Issues*. American Water Resources Association, Bethesda, MD, pp. 191-201.

Annexe 1

Représentation graphique des stations utilisées

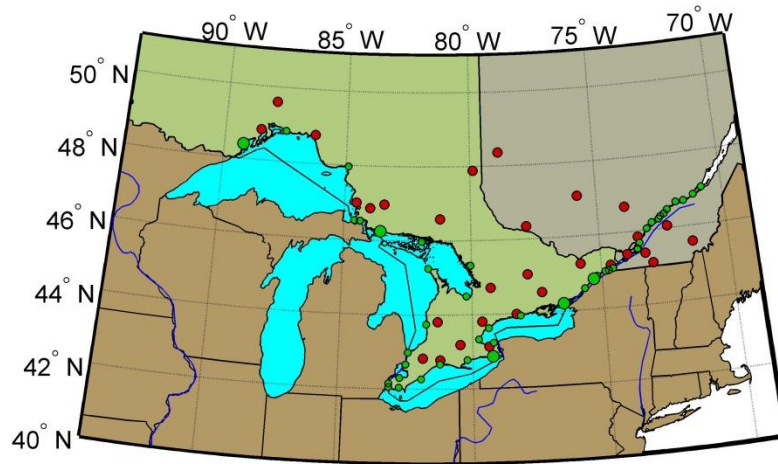


Figure A1.1 : Représentation des stations de niveau du système GLSL et les stations de débits sélectionnées

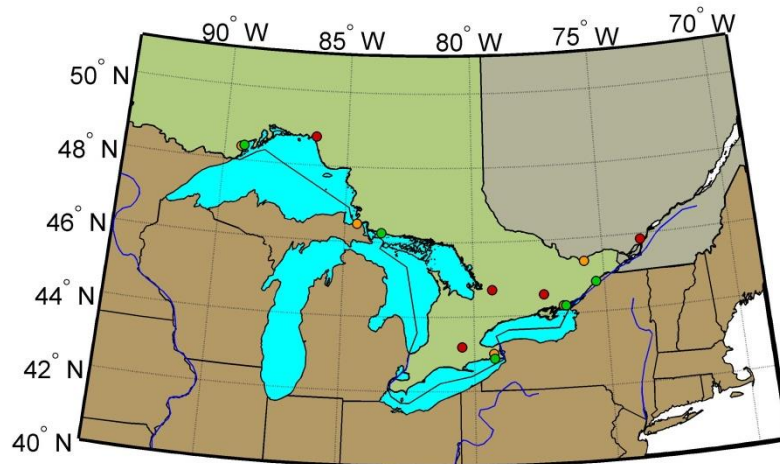


Figure A1.2 : Représentation graphique des stations de niveau, de débit et météorologiques sélectionnées

Annexe 2

Résultats de corrélations des stations de niveau et les indices développés

Tableau A2.1 : Corrélation entre les stations de niveau du lac Supérieur

Numéro de station	1107	11195	11690	11860	11500	11375
1107	1	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99
11195	1,00	1	1,00	0,99	0,99	1,00
11690	1,00	1,00	1	0,99	1,00	1,00
11860	0,99	0,99	0,99	1	1,00	0,99
11500	0,99	0,99	1,00	1,00	1	1,00
11375	0,99	1,00	1,00	0,99	1,00	1

Tableau A2.2 : Corrélation entre les stations de niveau du lac Huron

Numéro de station	11940	11950	11995	12005	11965
11940	1	0,96	0,89	0,79	0,94
11950	0,96	1	0,92	0,83	0,96
11995	0,89	0,92	1	0,97	0,97
12005	0,79	0,83	0,97	1	0,89
11965	0,94	0,96	0,97	0,89	1

Tableau A2.3 : Corrélation entre les stations de niveau du lac Érié

Numéro de station	12005	12065	12250	12400	12710	12865
12005	1	0,99	0,97	0,93	0,86	0,79
12065	0,99	1	0,99	0,96	0,91	0,86
12250	0,97	0,99	1	0,99	0,96	0,92
12400	0,93	0,96	0,99	1	0,99	0,96
12710	0,86	0,91	0,96	0,99	1	0,99
12865	0,79	0,86	0,92	0,96	0,99	1

Tableau A2.4 : Corrélation entre les stations de niveau du lac Ontario

Numéro de station	13030	13150	13320	13590	13988
13030	1	1,00	1,00	1,00	0,99
13150	1,00	1	1,00	0,99	0,98
13320	1,00	1,00	1	1,00	0,99
13590	1,00	0,99	1,00	1	0,99
13988	0,99	0,98	0,99	0,99	1

Tableau A2.5 : Corrélation entre les stations de niveau du fleuve Saint-Laurent

Numéro de station	13988	14400	14600	14602
13988	1	0,98	0,68	0,62
14400	0,98	1	0,80	0,73
14600	0,68	0,80	1	0,98
14602	0,62	0,73	0,98	1

Tableau A2.6 : Représentation des différents indices développés pour l'étude de l'interdépendance avec les niveaux du système GLSL

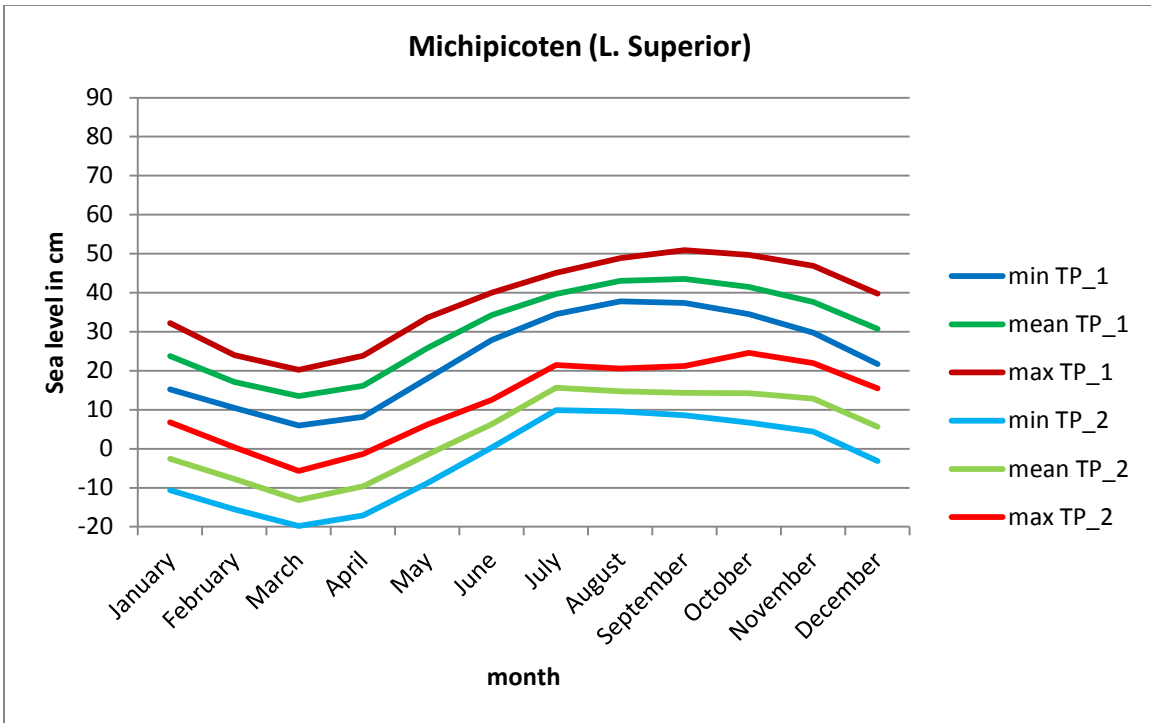
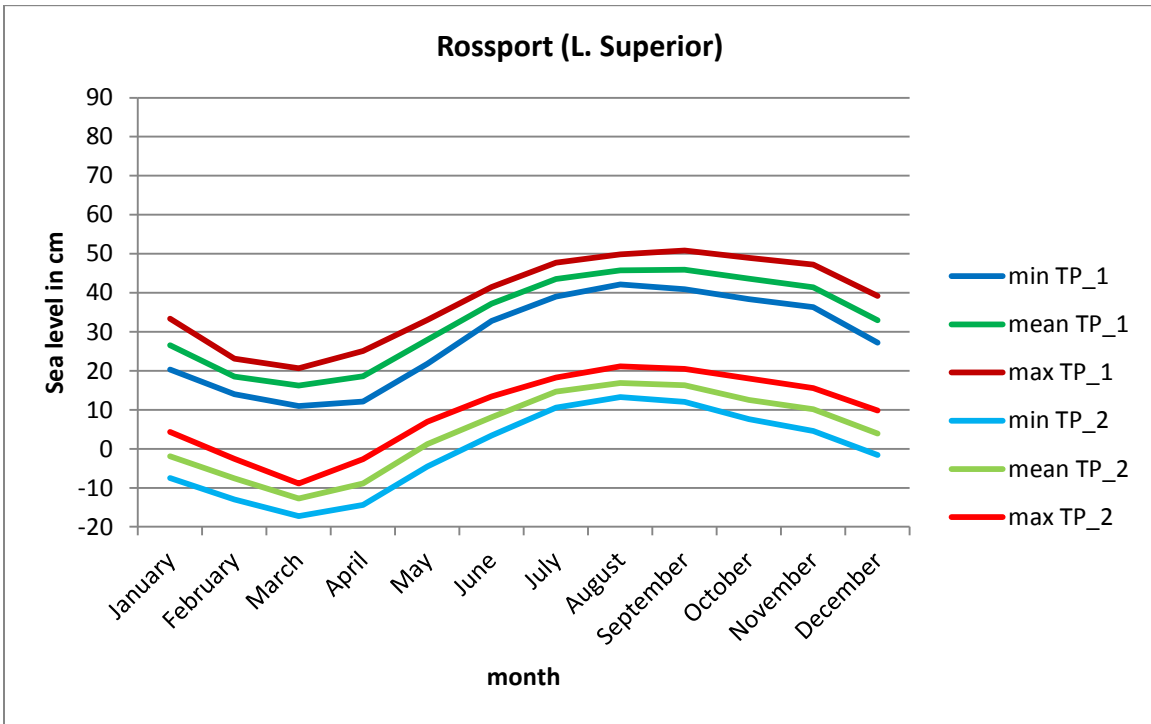
	Indice	Période	Détails	unité
1	Précipitations totales	Nov-Mar	Précipitations solides et liquides	mm
2	Précipitations totales	Oct-Mai	Précipitations solides et liquides	mm
3	Fréquence de gel/dégel	Déc-Fev	Tmin < 0 et Tmax > 0	1
4	Fréquence de gel/dégel	Déc-Mar	Tmin < 0 et Tmax > 0	1
5	Fréquence de gel/dégel	Nov-Avr	Tmin < 0 et Tmax > 0	1
6	Fréquence de gel/dégel	Oct-Mai	Tmin < 0 et Tmax > 0	1
7	90 ^{ème} percentile de pluie printanière	Mar-Mai	Tmoy > 0, puis on utilise la formule de Cunnane	mm
8	90 ^{ème} percentile de pluie printanière	Mar-Juin	Tmoy > 0, puis on utilise la formule de Cunnane	mm
9	Précipitations totales	Oct-Juin	Précipitations solides et liquides	mm
10	Précipitations totales	Nov-Avr	Précipitations solides et liquides	mm
11	Précipitations totales	Nov-Mai	Précipitations solides et liquides	mm
12	Précipitations totales	Nov-Juin	Précipitations solides et liquides	mm
13	Précipitations totales	Déc-Mar	Précipitations solides et liquides	mm
14	Précipitations totales	Déc-Avr	Précipitations solides et liquides	mm
15	Précipitations totales	Déc-Mai	Précipitations solides et liquides	mm

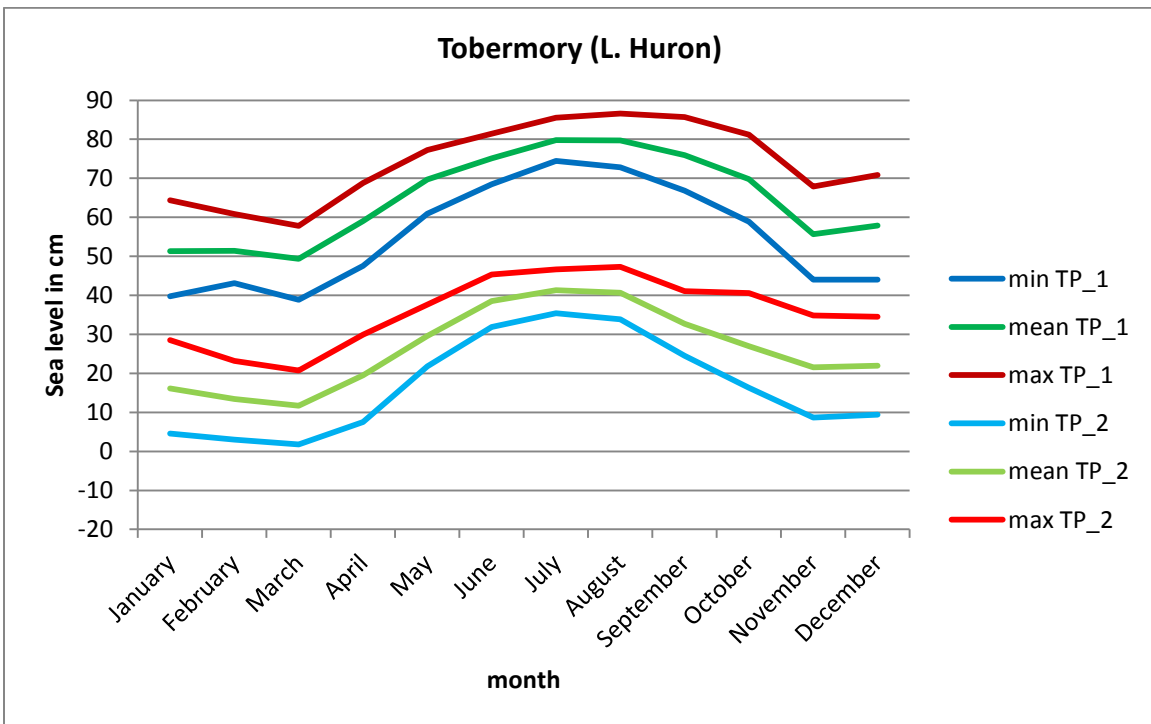
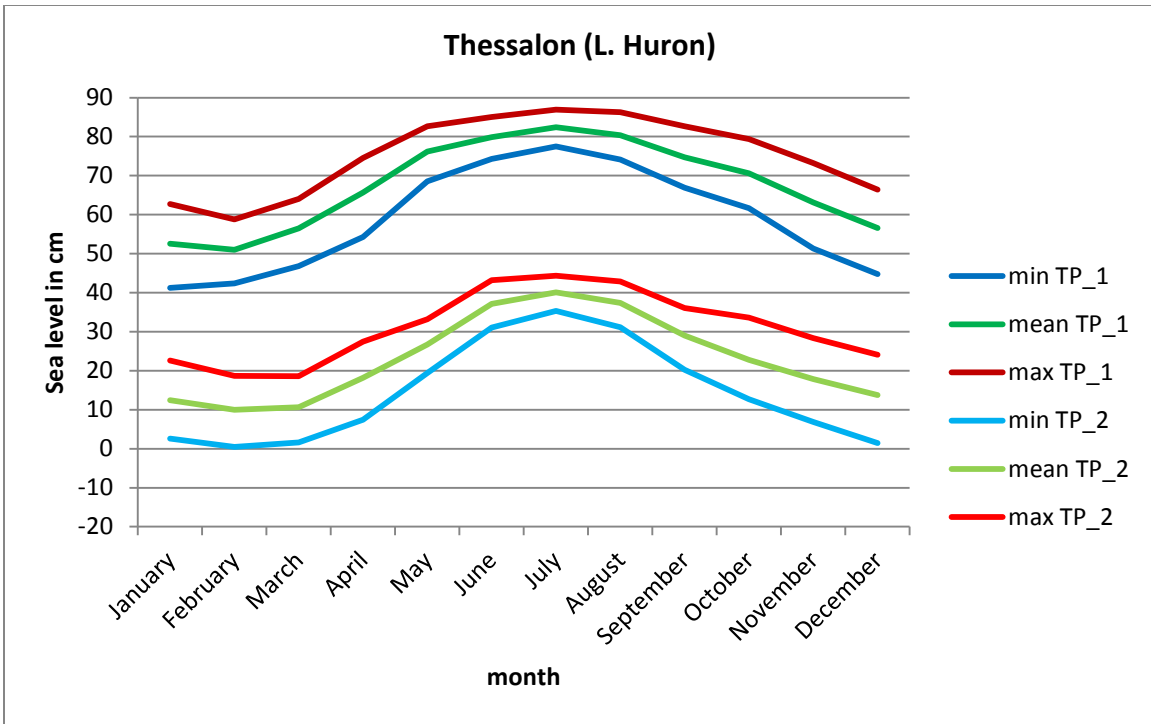
16	Précipitations solides	Déc-Fév	Tmoy < 0	mm
17	Précipitations solides	Mars	Tmoy < 0	mm
18	Précipitations solides	Déc-Mar	Tmoy < 0	mm
19	Précipitations solides	Avr	Tmoy < 0	mm
20	Précipitations solides	Déc-Avr	Tmoy < 0	mm
21	Précipitations liquides	Mar-Mai	Tmoy < 0	mm
22	Précipitations liquides	Mar-Juin	Tmoy < 0	mm
23	Précipitations liquides	Mar-Juill	Tmoy < 0	mm
24	SDII Liquide	Mar-May	Indice d'intensité journalière	mm/jour de pluie
25	SDII Liquide	Mar-Juin	Indice d'intensité journalière	mm/jour de pluie
26	SDII Liquide	Mar-Juill	Indice d'intensité journalière	mm/jour de pluie
27	R5D	Mar-Mai	max de précipitations cumulées pendant 5 jours	mm
28	R5D	Mar-Juin	max de précipitations cumulées pendant 5 jours	mm
29	R5D	Mar-Juill	max de précipitations cumulées pendant 5 jours	mm
30	DD_melt	Mars	Degré jour	mm
31	DD_melt	Mar-Avr	Degré jour	mm
32	DD_melt	April	Degré jour	mm
33	Temp moyenne de l'indice 30	Mars	Temp moyenne de l'indice 30	°C
34	Temp moyenne de l'indice 31	Mar-Avr	Temp moyenne de l'indice 31	°C
35	Temp moyenne de l'indice 32	Avril	Temp moyenne de l'indice 32	°C
36	degré jour Tmax	Juin-Nov	# jours Tmax > 20	1
37	degré jour Tmax	Juin-Nov	# jours Tmax > 22.5	1
38	degré jour Tmax	Juin-Nov	# jours Tmax > 25	1
39	degré jour Tmax	Juin-Nov	# jours Tmax > 27.5	1
40	degré jour Tmax	Juin-Nov	# jours Tmax > 30	1
41	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# jours Tmoy > 17	1
42	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# jours Tmoy > 18.5	1
43	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# jours Tmoy > 20	1
44	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# jours Tmoy > 21.5	1
45	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# jours Tmoy > 23	1
46	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# fenêtre mobile de 10 jours > 16	1
47	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# fenêtre mobile de 10 jours > 17	1
48	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# fenêtre mobile de 10 jours > 18	1
49	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# fenêtre mobile de 10 jours > 19	1
50	degré jour Tmoy	Juin-Nov	# fenêtre mobile de 10 jours > 20	1

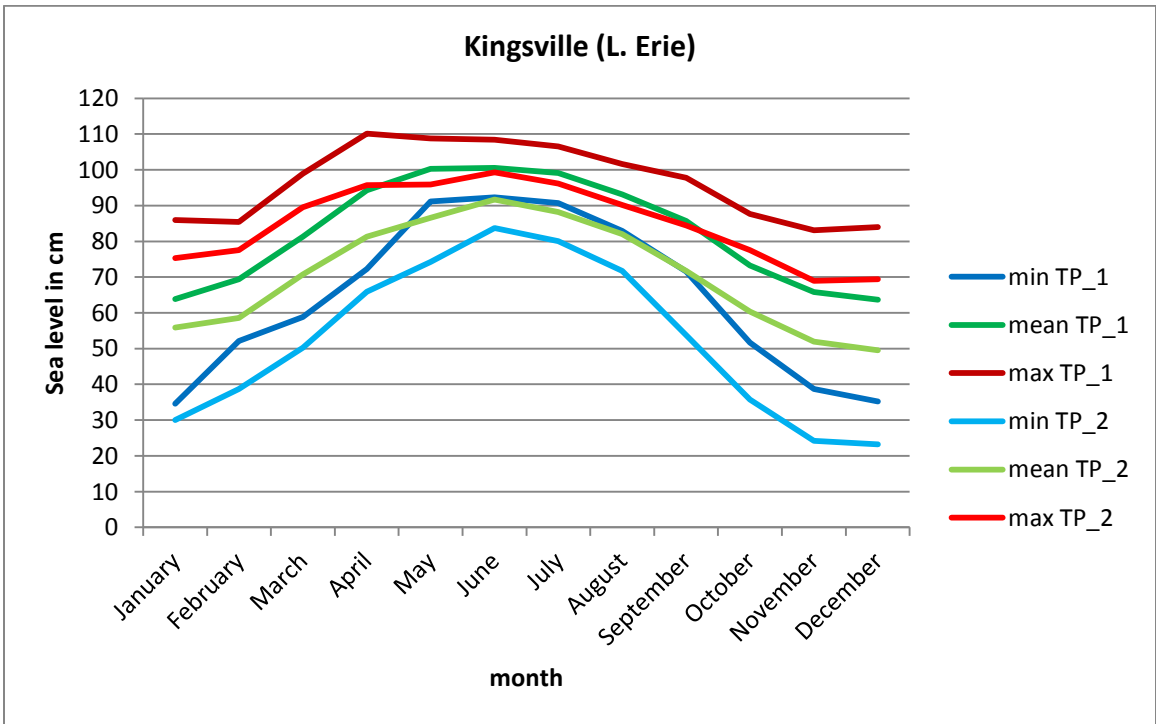
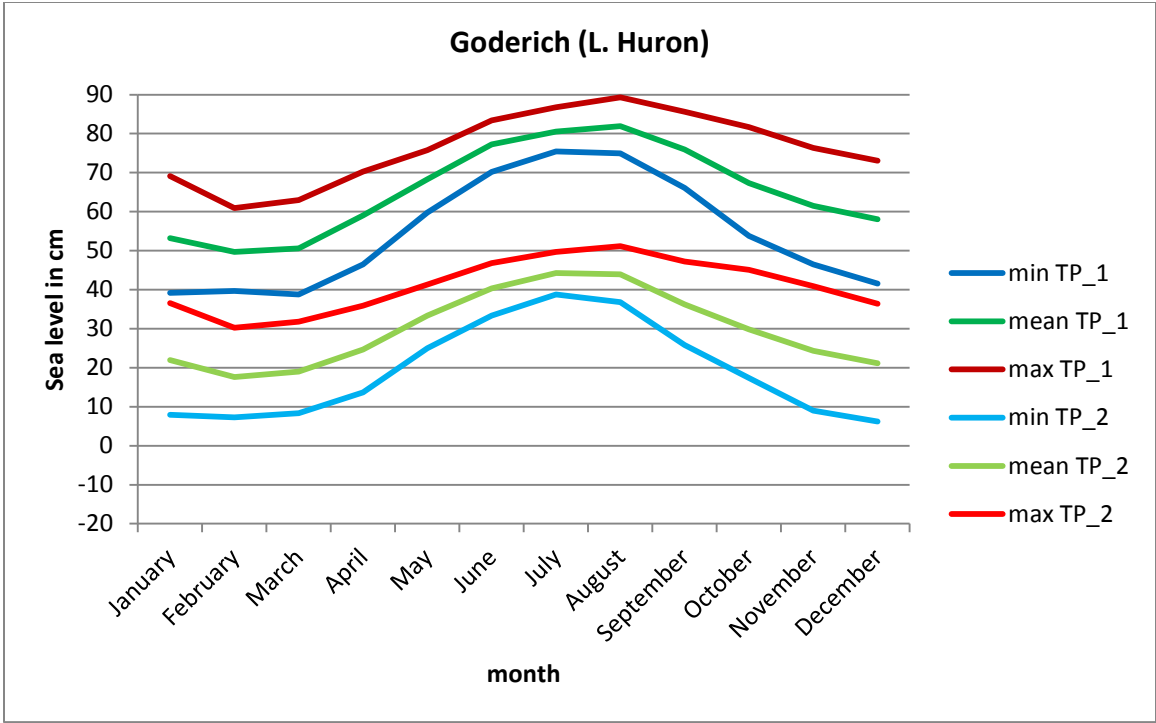
51	moyenne de débit d'automne	Oct-Déc		m ³ /s
52	moyenne de débit d'hiver	Jan-Mar		m ³ /s
53	moyenne de débit de printemps	Avr-Juin		m ³ /s
54	moyenne de débit d'été	Juill-août		m ³ /s
55	max de débit d'automne	Oct-Dec		m ³ /s
56	max de débit d'hiver	Jan-Mar		m ³ /s
57	max de débit de printemps	Avr-Juin		m ³ /s
58	max de débit d'été	Juill-août		m ³ /s
59	min de débit d'automne	Oct-Déc		m ³ /s
60	min de débit d'hiver	Jan-Mar		m ³ /s
61	min de débit de printemps	Avr-Juin		m ³ /s
62	min de débit d'été	Juill-Août		m ³ /s
63	max de débit d'automne	Oct-Déc	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
64	max de débit d'automne	Oct-Déc	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
65	min de débit d'automne	Oct-Déc	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
66	min de débit d'automne	Oct-Déc	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
67	max de débit d'hiver	Jan-Mar	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
68	max de débit d'hiver	Jan-Mar	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
69	min de débit d'hiver	Jan-Mar	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
70	min de débit d'hiver	Jan-Mar	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
71	max de débit de printemps	Avr-Juin	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
72	max de débit de printemps	Avr-Juin	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
73	min de débit de printemps	Avr-Juin	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
74	min de débit de printemps	Avr-Juin	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
75	max de débit d'été	Juill-Août	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
76	max de débit d'été	Juill-Août	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
77	min de débit d'été	Juill-Août	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
78	min de débit d'été	Juill-Août	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
79	max de débit hiver/printemps	Déc-Mai	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
80	max de débit hiver/printemps	Déc-Mai	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
81	min de débit hiver/printemps	Dec-May	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s

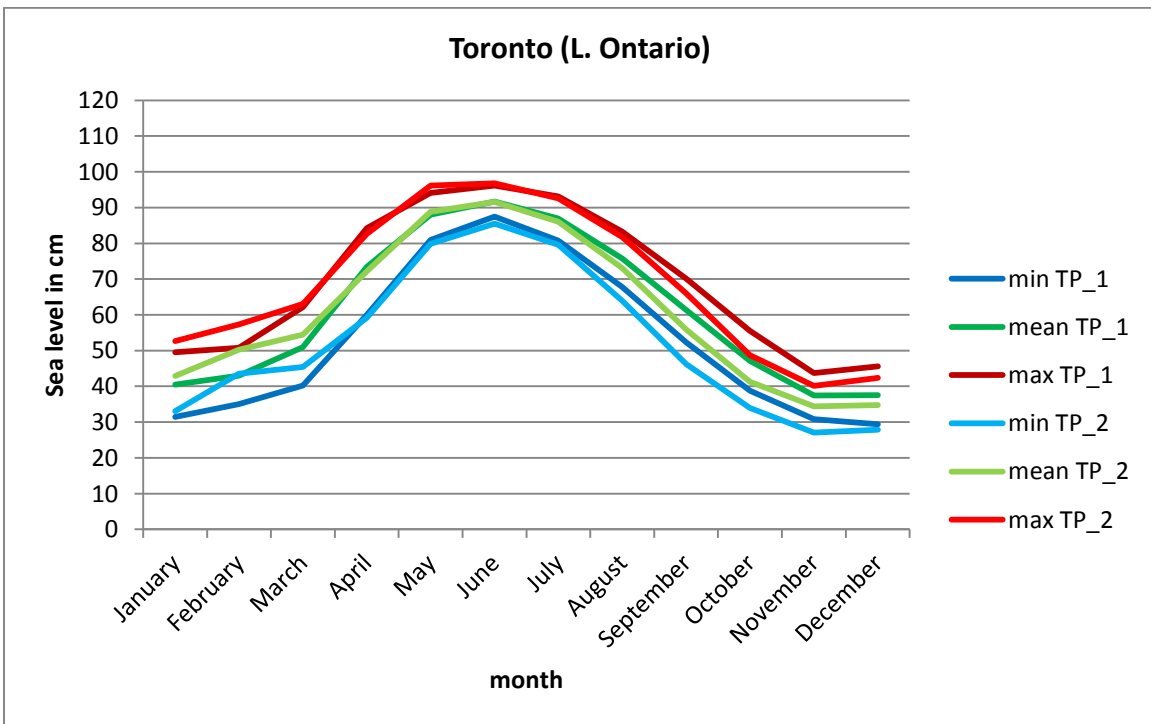
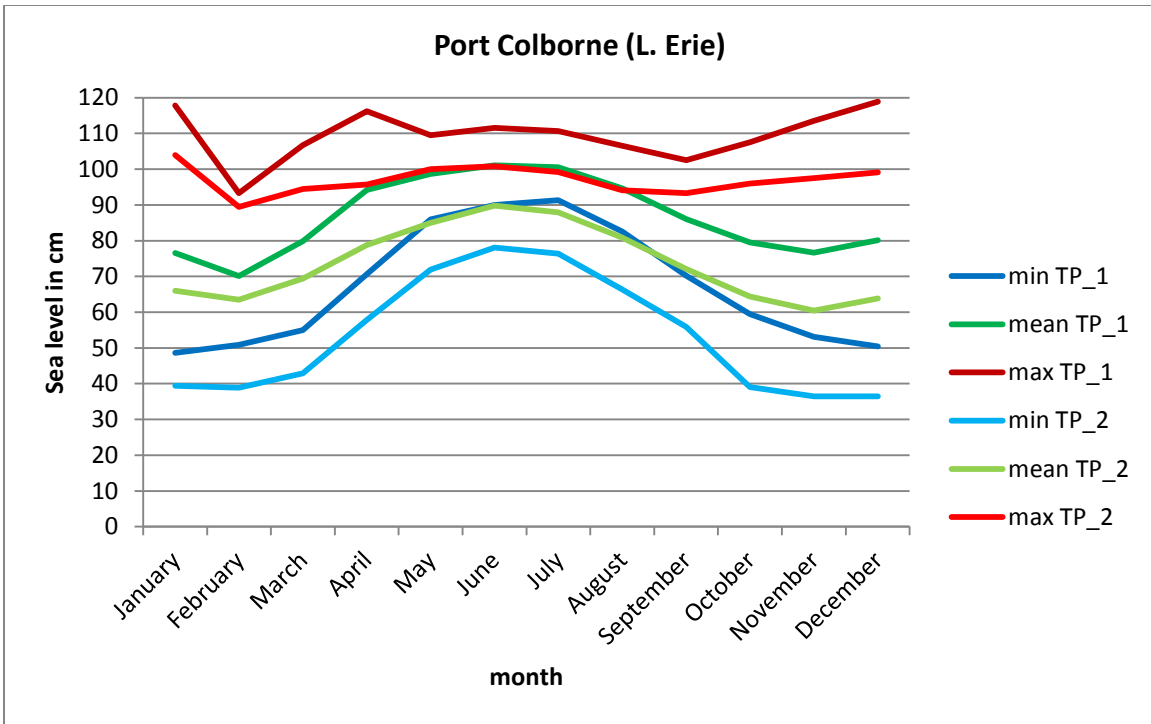
82	min de débit hiver/printemps	Dec-May	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
83	max de débit été/automne	June- Nov	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
84	max de débit été/automne	June- Nov	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s
85	min de débit été/automne	June- Nov	fenêtre mobile de moyenne de 15 jours	m ³ /s
86	min de débit été/automne	June- Nov	fenêtre mobile de moyenne de 30 jours	m ³ /s

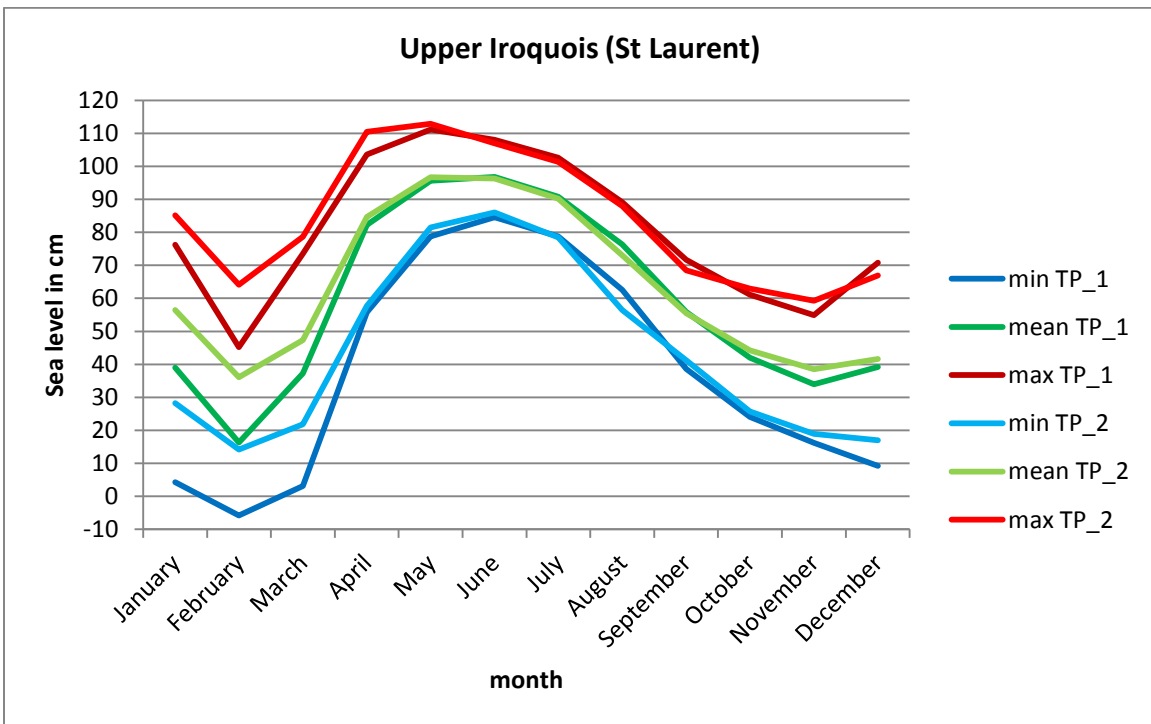
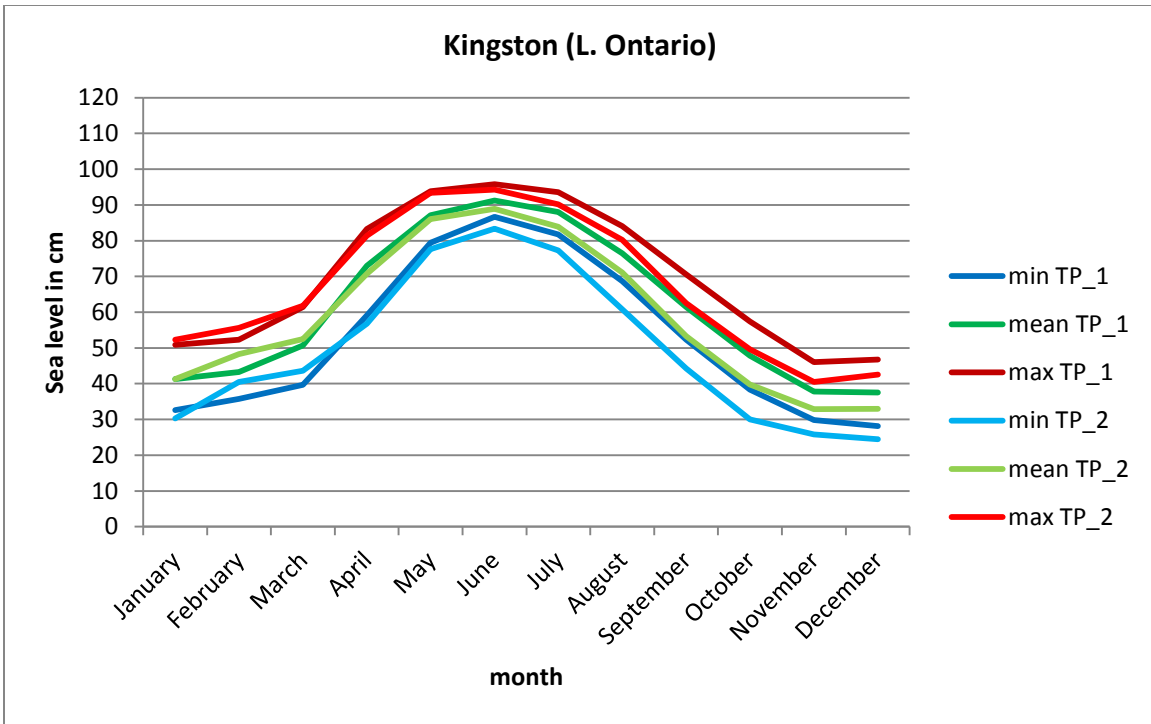
Annexe 3 Résultats préliminaires











Annexe 4

Résultats du lac Supérieur

Tableau A4.1. Résultats des corrélations de Spearman et Kendall entre les indices développés et le maximum de niveau estival du lac Supérieur

Indice	Corrélation de Spearman			Corrélation de Kendall		
	Nombre d'années	ρ	p_valeurs	Nombre d'années	ρ	p_valeurs
1	29	0,344	0,068	29	0,202	0,129
2	29	0,479	0,009	29	0,335	0,010
3	29	-0,190	0,324	29	-0,111	0,418
4	28	-0,086	0,663	28	-0,057	0,692
5	26	-0,399	0,043	26	-0,283	0,049
6	26	-0,494	0,010	26	-0,327	0,022
7	29	0,261	0,171	29	0,202	0,129
8	29	0,175	0,361	29	0,113	0,402
9	29	0,469	0,011	29	0,291	0,027
10	29	0,322	0,089	29	0,222	0,095
11	29	0,370	0,049	29	0,232	0,081
12	29	0,380	0,043	29	0,241	0,069
13	29	0,362	0,054	29	0,227	0,088
14	29	0,232	0,226	29	0,128	0,342
15	29	0,398	0,033	29	0,249	0,061
16	29	0,194	0,313	29	0,138	0,305
17	32	0,003	0,986	32	0,014	0,922
18	29	0,147	0,446	29	0,079	0,564
19	33	0,024	0,894	33	0,010	0,950
20	29	0,163	0,398	29	0,094	0,491
21	29	0,238	0,214	29	0,114	0,398
22	29	0,257	0,178	29	0,163	0,225
23	29	0,453	0,014	29	0,316	0,017
24	29	0,289	0,128	29	0,202	0,129
25	29	0,196	0,308	29	0,143	0,288
26	29	0,304	0,109	29	0,202	0,129
27	29	0,167	0,385	29	0,074	0,590
28	29	0,137	0,475	29	0,108	0,423
29	29	0,265	0,164	29	0,177	0,185
30	1	NaN	NaN	1	NaN	NaN
31	1	NaN	NaN	1	NaN	NaN
32	1	NaN	NaN	1	NaN	NaN
33	1	NaN	NaN	1	NaN	NaN
34	1	NaN	NaN	1	NaN	NaN
35	1	NaN	NaN	1	NaN	NaN
36	39	-0,550	0,000	39	-0,400	0,000
37	39	-0,468	0,003	39	-0,334	0,003
38	39	-0,325	0,043	39	-0,229	0,043
39	39	-0,170	0,302	39	-0,144	0,208

40	39	-0,248	0,128	39	-0,171	0,138
41	39	-0,272	0,095	39	-0,198	0,081
42	39	-0,208	0,204	39	-0,146	0,199
43	39	-0,188	0,252	39	-0,131	0,250
44	39	-0,234	0,151	39	-0,184	0,109
45	39	-0,221	0,176	39	-0,176	0,134
46	39	-0,305	0,059	39	-0,199	0,079
47	39	-0,177	0,280	39	-0,131	0,250
48	39	-0,142	0,390	39	-0,088	0,438
49	39	-0,131	0,426	39	-0,113	0,330
50	39	-0,239	0,143	39	-0,184	0,125
51	37	0,105	0,535	37	0,084	0,475
52	37	0,094	0,577	37	0,060	0,612
53	38	0,223	0,178	38	0,158	0,168
54	38	0,273	0,098	38	0,186	0,102
55	37	0,109	0,522	37	0,083	0,480
56	37	-0,078	0,647	37	-0,041	0,734
57	38	0,352	0,030	38	0,242	0,034
58	38	0,271	0,100	38	0,177	0,122
59	37	0,220	0,190	37	0,158	0,174
60	37	0,250	0,136	37	0,165	0,154
61	38	-0,168	0,315	38	-0,108	0,346
62	38	0,365	0,024	38	0,262	0,021
63	37	0,096	0,570	37	0,066	0,576
64	37	0,141	0,404	37	0,111	0,342
65	37	0,143	0,396	37	0,105	0,369
66	37	0,069	0,685	37	0,054	0,649
67	37	0,051	0,763	37	0,042	0,726
68	37	0,080	0,638	37	0,066	0,576
69	37	0,221	0,187	37	0,147	0,206
70	37	0,171	0,311	37	0,120	0,304
71	38	0,365	0,025	38	0,226	0,046
72	38	0,455	0,004	38	0,297	0,008
73	38	-0,275	0,095	38	-0,181	0,114
74	38	-0,095	0,569	38	-0,073	0,532
75	38	0,226	0,171	38	0,147	0,201
76	38	0,231	0,163	38	0,158	0,168
77	38	0,450	0,005	38	0,306	0,007
78	38	0,428	0,008	38	0,294	0,009
79	37	0,367	0,026	37	0,222	0,054
80	37	0,451	0,005	37	0,294	0,010
81	37	0,224	0,182	37	0,147	0,206
82	37	0,202	0,230	37	0,138	0,236
83	38	0,036	0,831	38	0,018	0,881
84	38	0,036	0,828	38	0,018	0,881
85	38	0,502	0,002	38	0,337	0,003
86	38	0,499	0,002	38	0,346	0,002

Tableau A4.2. Les valeurs de retour conditionnelles de 2 et 5 ans

cov 1 et cov 2 :	# 36 et # 80	# 72 et # 78	# 78 et # 80
5% quantile des covariables observées qui produisent des niveaux très bas	0,200 m (0,312 m)	0,188 m (0,304 m)	0,183 m (0,299 m)
10% quantile des covariables observées qui produisent des niveaux très bas	0,241 m (0,354 m)	0,225 m (0,341 m)	0,221 m (0,338 m)
90% quantile des covariables observées qui produisent des niveaux très bas	0,546 m (0,658 m)	0,591 m (0,707 m)	0,598 m (0,714 m)
95% quantile des covariables observées qui produisent des niveaux très bas	0,594 m (0,706 m)	0,645 m (0,760 m)	0,629 m (0,746 m)

Annexe 5

Résultats du lac Huron

Tableau A5.1. Résultats de corrélations de Spearman et Kendall entre les indices développés et le maximum de niveau estival du lac Huron

Indice	Corrélation de Spearman			Corrélation de Kendall		
	Nombre d'années	ρ	p_valeurs	Nombre d'années	ρ	p_valeurs
1	42	-0,254	0,105	42	-0,187	0,083
2	41	-0,223	0,160	41	-0,150	0,171
3	32	0,180	0,325	32	0,125	0,329
4	32	0,156	0,393	32	0,113	0,380
5	32	0,066	0,720	32	0,047	0,721
6	32	0,052	0,778	32	0,037	0,782
7	43	0,019	0,904	43	0,006	0,967
8	40	0,203	0,207	40	0,131	0,241
9	38	-0,225	0,174	38	-0,144	0,210
10	42	-0,253	0,106	42	-0,178	0,100
11	41	-0,230	0,148	41	-0,166	0,130
12	38	-0,248	0,133	38	-0,158	0,168
13	43	-0,244	0,114	43	-0,167	0,117
14	43	-0,222	0,153	43	-0,161	0,132
15	42	-0,219	0,162	42	-0,159	0,141
16	43	-0,327	0,033	43	-0,216	0,042
17	44	0,021	0,894	44	0,005	0,968
18	43	-0,269	0,082	43	-0,189	0,075
19	44	-0,101	0,515	44	-0,075	0,485
20	43	-0,280	0,069	43	-0,200	0,059
21	43	0,079	0,614	43	0,050	0,647
22	40	0,215	0,182	40	0,144	0,197
23	40	0,233	0,148	40	0,141	0,206
24	43	-0,050	0,752	43	-0,048	0,662
25	40	0,106	0,514	40	0,072	0,524
26	40	0,049	0,764	40	0,028	0,808
27	43	-0,023	0,886	43	-0,030	0,787
28	40	0,131	0,419	40	0,085	0,451
29	40	0,259	0,107	40	0,167	0,133
30	44	-0,052	0,736	44	-0,027	0,802
31	44	-0,062	0,689	44	-0,047	0,665
32	44	-0,047	0,761	44	-0,032	0,771
33	44	-0,052	0,736	44	-0,027	0,802
34	44	-0,062	0,689	44	-0,047	0,665
35	44	-0,047	0,761	44	-0,032	0,771
36	44	-0,314	0,038	44	-0,223	0,035
37	44	-0,251	0,100	44	-0,159	0,134
38	44	-0,148	0,338	44	-0,111	0,297
39	44	-0,156	0,313	44	-0,081	0,453

40	44	-0,170	0,270	44	-0,124	0,258
41	44	-0,200	0,194	44	-0,149	0,159
42	44	-0,154	0,320	44	-0,105	0,326
43	44	-0,195	0,205	44	-0,123	0,248
44	44	-0,121	0,432	44	-0,081	0,453
45	44	-0,138	0,371	44	-0,099	0,366
46	44	-0,151	0,326	44	-0,117	0,274
47	44	-0,080	0,605	44	-0,046	0,671
48	44	-0,098	0,528	44	-0,049	0,649
49	44	-0,108	0,483	44	-0,067	0,530
50	44	-0,212	0,168	44	-0,134	0,220
51	44	0,255	0,095	44	0,180	0,087
52	44	0,059	0,703	44	0,030	0,786
53	44	0,258	0,091	44	0,182	0,084
54	44	0,096	0,534	44	0,070	0,513
55	44	0,263	0,085	44	0,191	0,069
56	44	0,042	0,787	44	0,017	0,879
57	44	0,318	0,035	44	0,204	0,052
58	44	0,084	0,586	44	0,062	0,557
59	44	0,253	0,097	44	0,174	0,099
60	44	0,214	0,163	44	0,137	0,195
61	44	0,008	0,959	44	-0,002	0,992
62	44	0,212	0,168	44	0,135	0,199
63	44	0,280	0,066	44	0,199	0,058
64	44	0,277	0,069	44	0,190	0,070
65	44	0,270	0,077	44	0,186	0,077
66	44	0,213	0,164	44	0,161	0,127
67	44	0,108	0,484	44	0,066	0,539
68	44	0,081	0,598	44	0,051	0,636
69	44	0,193	0,208	44	0,133	0,207
70	44	0,124	0,422	44	0,089	0,403
71	44	0,354	0,019	44	0,243	0,020
72	44	0,291	0,055	44	0,203	0,053
73	44	-0,016	0,920	44	-0,008	0,944
74	44	-0,049	0,753	44	-0,027	0,802
75	44	0,110	0,475	44	0,080	0,450
76	44	0,064	0,680	44	0,057	0,594
77	44	0,178	0,246	44	0,121	0,255
78	44	0,186	0,225	44	0,135	0,200
79	44	0,437	0,003	44	0,302	0,004
80	44	0,434	0,003	44	0,304	0,003
81	44	0,219	0,153	44	0,135	0,200
82	44	0,171	0,267	44	0,112	0,290
83	44	-0,003	0,985	44	0,040	0,710
84	44	-0,016	0,920	44	0,017	0,880
85	44	0,167	0,277	44	0,116	0,272
86	44	0,183	0,233	44	0,133	0,207

Les résultats suivants montrent les valeurs de retour « conditionnelles », qu'on obtient en utilisant des quantiles des covariables observées :

95% quantile de la covariable 1 et 5% quantile de la covariable 2 :

0,197 m et 0,496 m comme valeur de retour de 2 ans et 5 ans, respectivement.

90% quantile de la covariable 1 et 10% quantile de la covariable 2 :

0,264 m et 0,563 m comme valeur de retour de 2 ans et 5 ans, respectivement.

10% quantile de la covariable 1 et 90% quantile de la covariable 2 :

1,129 m et 1,428 m comme valeur de retour de 2 ans et 5 ans, respectivement.

5% quantile de la covariable 1 et 95% quantile de la covariable 2 :

1,203 m et 1,502 m comme valeur de retour de 2 ans et 5 ans, respectivement

Annexe 6

Résultats du Lac Érié

Tableau A6.1. Résultats de corrélations de Spearman et Kendall entre les indices développés et le maximum de niveau estival du lac Érié

Indice	Corrélation de Spearman			Corrélation de Kendall		
	Nombre d'années	ρ	p_valeurs	Nombre d'années	ρ	p_valeurs
1	34	0,302	0,082	34	0,205	0,091
2	29	0,400	0,033	29	0,241	0,069
3	36	0,206	0,227	36	0,152	0,204
4	35	0,163	0,350	35	0,122	0,319
5	35	0,192	0,270	35	0,151	0,211
6	33	0,056	0,758	33	0,039	0,768
7	42	0,444	0,004	42	0,310	0,004
8	38	0,478	0,003	38	0,354	0,002
9	25	0,608	0,002	25	0,380	0,007
10	34	0,292	0,094	34	0,176	0,147
11	32	0,324	0,071	32	0,210	0,095
12	28	0,544	0,003	28	0,376	0,005
13	35	0,238	0,168	35	0,139	0,246
14	35	0,233	0,177	35	0,129	0,283
15	33	0,281	0,114	33	0,186	0,134
16	35	0,033	0,850	35	0,025	0,844
17	46	0,056	0,710	46	0,041	0,698
18	35	0,031	0,858	35	0,032	0,800
19	45	0,323	0,030	45	0,231	0,038
20	35	0,046	0,794	35	0,039	0,756
21	42	0,347	0,025	42	0,226	0,035
22	38	0,498	0,002	38	0,334	0,003
23	32	0,594	0,000	32	0,415	0,001
24	42	-0,143	0,366	42	-0,096	0,376
25	38	-0,050	0,765	38	-0,018	0,881
26	32	-0,038	0,837	32	-0,024	0,860
27	42	0,309	0,047	42	0,194	0,072
28	38	0,320	0,051	38	0,198	0,083
29	32	0,247	0,172	32	0,153	0,226
30	44	-0,075	0,628	44	-0,044	0,678
31	41	-0,062	0,699	41	-0,043	0,703
32	43	0,017	0,913	43	0,011	0,925
33	44	-0,075	0,628	44	-0,044	0,678
34	41	-0,062	0,699	41	-0,043	0,703
35	43	0,017	0,913	43	0,011	0,925
36	23	-0,177	0,418	23	-0,162	0,294
37	23	-0,354	0,098	23	-0,253	0,096
38	23	-0,360	0,092	23	-0,273	0,072
39	23	-0,337	0,116	23	-0,241	0,114

40	23	-0,310	0,149	23	-0,249	0,102
41	23	-0,447	0,034	23	-0,336	0,025
42	23	-0,294	0,172	23	-0,209	0,172
43	23	-0,133	0,542	23	-0,099	0,530
44	23	-0,153	0,484	23	-0,067	0,676
45	38	-0,153	0,358	38	-0,087	0,453
46	38	-0,339	0,038	38	-0,235	0,043
47	38	-0,314	0,055	38	-0,231	0,045
48	38	-0,178	0,286	38	-0,145	0,208
49	38	-0,164	0,326	38	-0,123	0,285
50	38	-0,139	0,406	38	-0,085	0,465
51	46	0,167	0,266	46	0,118	0,252
52	46	0,352	0,016	46	0,238	0,020
53	46	0,277	0,062	46	0,186	0,071
54	46	0,468	0,001	46	0,331	0,001
55	46	0,124	0,411	46	0,080	0,437
56	46	0,140	0,354	46	0,092	0,373
57	46	0,172	0,252	46	0,123	0,233
58	46	0,380	0,009	46	0,266	0,009
59	46	0,293	0,048	46	0,210	0,041
60	46	0,219	0,143	46	0,168	0,103
61	46	0,514	0,000	46	0,376	0,000
62	46	0,589	0,000	46	0,437	0,000
63	46	0,200	0,182	46	0,137	0,182
64	46	0,143	0,344	46	0,093	0,368
65	46	0,205	0,172	46	0,128	0,215
66	46	0,122	0,418	46	0,064	0,538
67	46	0,332	0,024	46	0,232	0,024
68	46	0,285	0,055	46	0,207	0,044
69	46	0,232	0,121	46	0,160	0,118
70	46	0,203	0,177	46	0,137	0,182
71	46	0,199	0,184	46	0,122	0,237
72	46	0,225	0,133	46	0,157	0,127
73	46	0,434	0,003	46	0,307	0,003
74	46	0,283	0,056	46	0,199	0,052
75	46	0,384	0,008	46	0,265	0,010
76	46	0,430	0,003	46	0,302	0,003
77	46	0,559	0,000	46	0,408	0,000
78	46	0,522	0,000	46	0,369	0,000
79	45	0,267	0,076	45	0,179	0,085
80	45	0,320	0,032	45	0,225	0,030
81	45	0,232	0,125	45	0,173	0,096
82	45	0,262	0,082	45	0,181	0,082
83	45	0,199	0,190	45	0,126	0,225
84	45	0,219	0,148	45	0,155	0,137
85	45	0,561	0,000	45	0,411	0,000
86	45	0,541	0,000	45	0,391	0,000

Tableau A6.2 : Représentation de la corrélation entre les 21 indices les plus corrélés au niveau maximum du lac Érié (Tableau de ρ)

	7	8	9	12	22	23	54	58	61	62	73	75	76	77	78	85	86	19	21	27	46
7	1,000	0,896	0,217	0,254	0,523	0,432	0,202	0,208	0,162	0,100	0,160	0,273	0,252	0,179	0,100	0,220	0,174	0,214	0,597	0,530	-0,268
8	0,896	1,000	0,321	0,348	0,624	0,519	0,244	0,307	0,222	0,153	0,215	0,300	0,285	0,196	0,082	0,252	0,214	0,329	0,572	0,550	-0,260
9	0,217	0,321	1,000	0,942	0,611	0,559	0,061	0,086	0,576	0,405	0,489	0,031	0,038	0,321	0,281	0,310	0,270	0,284	0,497	0,353	-0,127
12	0,254	0,348	0,942	1,000	0,644	0,570	0,015	-0,004	0,543	0,383	0,457	-0,024	-0,005	0,243	0,177	0,220	0,179	0,300	0,529	0,379	-0,137
22	0,523	0,624	0,611	0,644	1,000	0,881	0,222	0,218	0,530	0,291	0,518	0,215	0,219	0,309	0,190	0,326	0,272	0,170	0,864	0,665	-0,165
23	0,432	0,519	0,559	0,570	0,881	1,000	0,526	0,382	0,523	0,408	0,512	0,470	0,498	0,569	0,475	0,558	0,527	0,205	0,755	0,579	-0,181
54	0,202	0,244	0,061	0,015	0,222	0,526	1,000	0,836	0,336	0,586	0,304	0,920	0,958	0,827	0,824	0,773	0,756	0,035	0,014	0,173	-0,247
58	0,208	0,307	0,086	-0,004	0,218	0,382	0,836	1,000	0,222	0,397	0,182	0,921	0,890	0,565	0,523	0,558	0,536	0,168	0,031	0,184	-0,199
61	0,162	0,222	0,576	0,543	0,530	0,523	0,336	0,222	1,000	0,546	0,943	0,250	0,260	0,530	0,392	0,569	0,524	-0,094	0,317	0,225	-0,149
62	0,100	0,153	0,405	0,383	0,291	0,408	0,586	0,397	0,546	1,000	0,398	0,388	0,422	0,856	0,735	0,925	0,884	-0,038	0,054	0,148	-0,193
73	0,160	0,215	0,489	0,457	0,518	0,512	0,304	0,182	0,943	0,398	1,000	0,240	0,255	0,437	0,319	0,448	0,411	-0,057	0,304	0,197	-0,116
75	0,273	0,300	0,031	-0,024	0,215	0,470	0,920	0,921	0,250	0,388	0,240	1,000	0,984	0,617	0,572	0,616	0,592	0,089	0,016	0,184	-0,268
76	0,252	0,285	0,038	-0,005	0,219	0,498	0,958	0,890	0,260	0,422	0,255	0,984	1,000	0,678	0,657	0,644	0,608	0,077	0,024	0,174	-0,278
77	0,179	0,196	0,321	0,243	0,309	0,569	0,827	0,565	0,530	0,856	0,437	0,617	0,678	1,000	0,927	0,968	0,912	-0,048	0,100	0,145	-0,218
78	0,100	0,082	0,281	0,177	0,190	0,475	0,824	0,523	0,392	0,735	0,319	0,572	0,657	0,927	1,000	0,837	0,832	-0,041	0,072	0,124	-0,178
85	0,220	0,252	0,310	0,220	0,326	0,558	0,773	0,558	0,569	0,925	0,448	0,616	0,644	0,968	0,837	1,000	0,956	-0,038	0,107	0,171	-0,218
86	0,174	0,214	0,270	0,179	0,272	0,527	0,756	0,536	0,524	0,884	0,411	0,592	0,608	0,912	0,832	0,956	1,000	0,002	0,052	0,171	-0,210
19	0,214	0,329	0,284	0,300	0,170	0,205	0,035	0,168	-0,094	-0,038	-0,057	0,089	0,077	-0,048	-0,041	-0,038	0,002	1,000	0,039	0,107	0,011
21	0,597	0,572	0,497	0,529	0,864	0,755	0,014	0,031	0,317	0,054	0,304	0,016	0,024	0,100	0,072	0,107	0,052	0,039	1,000	0,685	-0,083
27	0,530	0,550	0,353	0,379	0,665	0,579	0,173	0,184	0,225	0,148	0,197	0,184	0,174	0,145	0,124	0,171	0,171	0,107	0,685	1,000	-0,108
46	-0,268	-0,260	-0,127	-0,137	-0,165	-0,181	-0,247	-0,199	-0,149	-0,193	-0,116	-0,268	-0,278	-0,218	-0,178	-0,218	-0,210	0,011	-0,083	-0,108	1,000

Tableau A6.3 : Représentation de la corrélation entre les 21 indices les plus corrélés au niveau maximum du lac Érié (Tableau de p_valeurs)

	7	8	9	12	22	23	54	58	61	62	73	75	76	77	78	85	86	19	21	27	46
7	0,000	0,000	0,076	0,029	0,000	0,000	0,102	0,091	0,186	0,421	0,191	0,025	0,040	0,148	0,419	0,083	0,173	0,032	0,000	0,000	0,009
8	0,000	0,000	0,008	0,002	0,000	0,000	0,061	0,017	0,085	0,244	0,097	0,020	0,027	0,134	0,535	0,061	0,113	0,001	0,000	0,000	0,014
9	0,076	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,693	0,577	0,000	0,006	0,001	0,842	0,805	0,033	0,064	0,052	0,092	0,019	0,000	0,003	0,310
12	0,029	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,918	0,980	0,000	0,007	0,001	0,873	0,972	0,096	0,228	0,151	0,245	0,009	0,000	0,001	0,253
22	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,088	0,094	0,000	0,024	0,000	0,099	0,092	0,016	0,146	0,014	0,043	0,104	0,000	0,000	0,123
23	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,065	0,000	0,000	0,111
54	0,102	0,061	0,693	0,918	0,088	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,777	0,911	0,160	0,051
58	0,091	0,017	0,577	0,980	0,094	0,005	0,000	0,000	0,063	0,001	0,129	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,165	0,806	0,136	0,118
61	0,186	0,085	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,063	0,000	0,000	0,000	0,036	0,029	0,000	0,001	0,000	0,000	0,433	0,009	0,065	0,241
62	0,421	0,244	0,006	0,007	0,024	0,003	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,753	0,662	0,232	0,129
73	0,191	0,097	0,001	0,001	0,000	0,000	0,010	0,129	0,000	0,001	0,000	0,044	0,032	0,000	0,007	0,000	0,000	0,637	0,012	0,108	0,363
75	0,025	0,020	0,842	0,873	0,099	0,000	0,000	0,000	0,036	0,001	0,044	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,465	0,900	0,136	0,033
76	0,040	0,027	0,805	0,972	0,092	0,000	0,000	0,000	0,029	0,000	0,032	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,525	0,848	0,158	0,027
77	0,148	0,134	0,033	0,096	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,694	0,419	0,242	0,086
78	0,419	0,535	0,064	0,228	0,146	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,737	0,561	0,319	0,163
85	0,083	0,061	0,052	0,151	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,760	0,405	0,180	0,097
86	0,173	0,113	0,092	0,245	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,988	0,000	0,685	0,110
19	0,032	0,001	0,019	0,009	0,104	0,065	0,777	0,165	0,433	0,753	0,637	0,465	0,525	0,694	0,737	0,760	0,988	0,000	0,699	0,289	0,916
21	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,911	0,806	0,009	0,662	0,012	0,900	0,848	0,419	0,561	0,405	0,685	0,699	0,000	0,000	0,425
27	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,160	0,136	0,065	0,232	0,108	0,136	0,158	0,242	0,319	0,180	0,181	0,289	0,000	0,000	0,297
46	0,009	0,014	0,310	0,253	0,123	0,111	0,051	0,118	0,241	0,129	0,363	0,033	0,027	0,086	0,163	0,097	0,110	0,916	0,425	0,297	0,000

Tableau A6.4 : Représentation des périodes de retour bivariées du maximum estival du niveau du lac Érié et de l'indice des précipitations liquides (mars-mai)

Niveau du lac (m)	1.7714 (T=20)	1.6099 (T=10)	1.4339 (T=5)	1.2869 (T=3)	1.1492 (T=2)
Précipitations liquides (mm)					
29,5746 (T=20)	171-218	95-113	51-58	35-39	27-29
27,2671 (T=10)	88-104	47-54	26-29	18-19	14-15
24,6345 (T=5)	49-55	26-29	14-15	10-10	7-7
22,3828 (T=3)	33-37	17-19	9-10	6-6	4-5
20,0772 (T=2)	26-28	13-14	7-7	4-5	3-3

Tableau A6.5: Représentation des périodes de retour bivariées du maximum estival du niveau du lac Érié et de l'indice du maximum de débit d'été (juillet-septembre)

Niveau du lac (m)	1.7714 (T=20)	1.6099 (T=10)	1.4339 (T=5)	1.2869 (T=3)	1.1492 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	309-435	163-206	85-100	52-59	35-39
19,1803 (T=10)	164-207	85-102	44-49	27-29	18-19
13,8431 (T=5)	90-106	46-52	23-26	14-15	9-10
10,2088 (T=3)	57-66	29-32	15-16	9-9	6-6
7,42273 (T=2)	41-46	21-23	10-11	6-6	4-4

Tableau A6.6: Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau du lac Érié à période de retour **T=2 ans** avec l'indice des précipitations liquides et l'indice du maximum de débit d'été (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) à différentes périodes de retour

Précipitations liquides (mm)	29,5746 (T=20)	27,2671 (T=10)	24,6345 (T=5)	22,3828 (T=3)	20,0772 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	373-538	198-255	101-121	62-72	44-49
19,1803 (T=10)	195-254	105-126	53-61	33-37	23-25
13,8431 (T=5)	108-130	55-63	29-32	18-19	12-13
10,2088 (T=3)	72-84	37-41	19-21	12-13	8-9
7,42273 (T=2)	54-62	28-30	14-15	9-9	6-6

Tableau A6.7: Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau du lac Érié à période de retour **T=5 ans** avec l'indice des précipitations liquides et l'indice du maximum de débit d'été (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) à différentes périodes de retour

Précipitations liquides (mm)	29,5746 (T=20)	27,2671 (T=10)	24,6345 (T=5)	22,3828 (T=3)	20,0772 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	543-847	321-450	174-223	111-134	80-94
19,1803 (T=10)	323-455	182-237	98-117	62-71	43-49
13,8431 (T=5)	207-267	108-131	56-64	35-39	24-26
10,2088 (T=3)	142-175	75-88	39-43	24-26	16-18
7,42273 (T=2)	113-137	58-67	30-33	18-20	13-13

Tableau A6.8 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau du lac Érié à période de retour **T=10 ans** avec l'indice des précipitations liquides et l'indice du maximum de débit d'été (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) à différentes périodes de retour

Précipitations liquides (mm)	29,5746 (T=20)	27,2671 (T=10)	24,6345 (T=5)	22,3828 (T=3)	20,0772 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	769-1389	463-704	291-400	189-240	141-174
19,1803 (T=10)	485-758	269-362	159-202	104-125	74-87
13,8431 (T=5)	305-427	171-216	93-110	61-69	43-47
10,2088 (T=3)	234-309	126-154	67-77	43-48	30-33
7,42273 (T=2)	188-243	100-120	54-61	34-38	23-25

Tableau A6.9 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau du lac Érié à période de retour **T=20 ans** avec l'indice des précipitations liquides et l'indice du maximum de débit d'été (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) à différentes périodes de retour

Précipitations liquides (mm)	29,5746 (T=20)	27,2671 (T=10)	24,6345 (T=5)	22,3828 (T=3)	20,0772 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	1786-4167	980-1852	549-847	352-500	251-340
19,1803 (T=10)	1000-1852	515-794	298-413	192-251	141-174
13,8431 (T=5)	581-926	311-431	175-224	113-137	81-96
10,2088 (T=3)	410-602	227-305	127-156	80-94	57-66
7,42273 (T=2)	345-495	184-237	103-124	64-74	45-51

Tableau A6.10 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Érié à période de retour **T=2 ans** avec l'indice des précipitations liquides et l'indice du maximum de débit d'été (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) à différentes périodes de retour

Précipitations liquides (mm)	29,5746 (T=20)	27,2671 (T=10)	24,6345 (T=5)	22,3828 (T=3)	20,0772 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
19,1803 (T=10)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
13,8431 (T=5)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
10,2088 (T=3)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
7,42273 (T=2)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-2

Tableau A6.11 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Érié à période de retour **T=5 ans** avec l'indice des précipitations liquides et l'indice du maximum de débit d'été (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) à différentes périodes de retour

Précipitations liquides (mm)	29,5746 (T=20)	27,2671 (T=10)	24,6345 (T=5)	22,3828 (T=3)	20,0772 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	2-2	2-2	2-2	2-3	2-3
19,1803 (T=10)	2-2	2-2	2-3	2-3	2-3
13,8431 (T=5)	2-3	2-3	2-3	2-3	3-3
10,2088 (T=3)	2-3	2-3	3-3	3-3	3-3
7,42273 (T=2)	3-3	3-3	3-3	3-3	3-3

Tableau A6.12 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Érié à période de retour **T=10 ans** avec l'indice des précipitations liquides et l'indice du maximum de débit d'été (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) à différentes périodes de retour

Précipitations liquides (mm)	29,5746 (T=20)	27,2671 (T=10)	24,6345 (T=5)	22,3828 (T=3)	20,0772 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	2-4	3-4	3-5	4-4	4-5
19,1803 (T=10)	3-4	3-4	4-4	4-5	4-5
13,8431 (T=5)	3-5	4-5	4-5	4-5	5-5
10,2088 (T=3)	4-5	4-5	5-5	5-5	5-6
7,42273 (T=2)	5-6	5-6	5-6	6-6	6-6

Tableau A6.13 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Érié à période de retour **T=20 ans** avec l'indice des précipitations liquides et l'indice du maximum de débit d'été (fenêtre mobile de moyenne de 15 jours) à différentes périodes de retour

Précipitations liquides (mm)	29,5746 (T=20)	27,2671 (T=10)	24,6345 (T=5)	22,3828 (T=3)	20,0772 (T=2)
Maximum de débit d'été (m ³ /s)					
25,106 (T=20)	6-13	6-10	6-9	6-9	7-9
19,1803 (T=10)	6-11	6-9	7-9	7-9	8-9
13,8431 (T=5)	6-10	7-9	8-10	8-10	9-10
10,2088 (T=3)	7-10	8-10	9-11	9-11	10-11
7,42273 (T=2)	8-12	9-11	10-12	10-12	11-12

Annexe 7

Résultats du lac Ontario

Tableau A7.1. Résultats de corrélations de Spearman et Kendall entre les indices développés et le maximum de niveau estival du lac Ontario

Indices	Corrélation de Spearman			Corrélation de Kendall		
	Nombre d'années	ρ	p_valeurs	Nombre d'années	ρ	p_valeurs
1	39	0,343	0,033	39	0,242	0,031
2	32	0,611	0,000	32	0,427	0,000
3	37	0,111	0,511	37	0,084	0,479
4	36	-0,091	0,599	36	-0,041	0,743
5	34	-0,240	0,171	34	-0,150	0,228
6	32	-0,157	0,391	32	-0,098	0,445
7	34	0,077	0,663	34	0,059	0,638
8	33	0,129	0,472	33	0,098	0,432
9	32	0,729	0,000	32	0,536	0,000
10	38	0,499	0,002	38	0,334	0,003
11	34	0,678	0,000	34	0,487	0,000
12	34	0,696	0,000	34	0,512	0,000
13	41	0,245	0,123	41	0,167	0,127
14	40	0,427	0,006	40	0,278	0,012
15	36	0,608	0,000	36	0,427	0,000
16	41	-0,138	0,389	41	-0,085	0,444
17	45	-0,035	0,820	45	0,004	0,977
18	41	-0,092	0,568	41	-0,043	0,702
19	44	0,004	0,982	44	-0,011	0,932
20	40	-0,134	0,410	40	-0,076	0,499
21	40	0,116	0,475	40	0,124	0,267
22	39	0,187	0,255	39	0,169	0,136
23	38	0,079	0,635	38	0,081	0,488
24	40	-0,238	0,140	40	-0,148	0,184
25	39	-0,163	0,322	39	-0,090	0,427
26	38	0,042	0,802	38	0,024	0,842
27	40	0,276	0,085	40	0,201	0,069
28	39	0,399	0,012	39	0,296	0,008
29	38	0,375	0,021	38	0,289	0,010
30	37	0,006	0,971	37	0,015	0,906
31	35	0,074	0,671	35	0,049	0,693
32	37	-0,008	0,964	37	-0,002	1,000
33	37	0,006	0,972	37	0,015	0,907
34	35	0,074	0,671	35	0,049	0,693
35	37	-0,008	0,964	37	-0,002	1,000
36	31	-0,122	0,512	31	-0,084	0,518
37	31	-0,135	0,468	31	-0,084	0,518

38	31	-0,293	0,110	31	-0,206	0,110
39	31	-0,440	0,013	31	-0,341	0,008
40	31	-0,512	0,003	31	-0,385	0,003
41	31	0,088	0,639	31	0,084	0,518
42	31	-0,021	0,911	31	-0,015	0,919
43	31	-0,170	0,360	31	-0,102	0,434
44	31	-0,134	0,472	31	-0,076	0,563
45	37	-0,126	0,457	37	-0,081	0,491
46	37	0,100	0,555	37	0,049	0,685
47	37	0,046	0,788	37	0,036	0,763
48	37	0,051	0,764	37	0,032	0,793
49	37	0,014	0,937	37	-0,005	0,979
50	37	-0,016	0,925	37	-0,002	1,000
51	50	0,214	0,136	50	0,132	0,178
52	49	0,326	0,022	49	0,232	0,019
53	49	0,521	0,000	49	0,372	0,000
54	49	0,366	0,010	49	0,253	0,011
55	50	0,280	0,049	50	0,186	0,058
56	49	0,155	0,289	49	0,106	0,285
57	49	0,387	0,006	49	0,264	0,008
58	49	0,262	0,069	49	0,174	0,079
59	50	0,139	0,336	50	0,098	0,320
60	49	0,397	0,005	49	0,283	0,004
61	49	0,322	0,024	49	0,221	0,026
62	49	0,339	0,017	49	0,229	0,021
63	50	0,260	0,069	50	0,173	0,078
64	50	0,238	0,096	50	0,150	0,126
65	50	0,161	0,264	50	0,122	0,213
66	50	0,138	0,341	50	0,103	0,296
67	49	0,218	0,133	49	0,140	0,157
68	49	0,244	0,092	49	0,178	0,073
69	49	0,335	0,018	49	0,237	0,017
70	49	0,333	0,019	49	0,232	0,019
71	49	0,310	0,030	49	0,212	0,033
72	49	0,331	0,020	49	0,227	0,022
73	49	0,297	0,038	49	0,197	0,047
74	49	0,304	0,033	49	0,200	0,044
75	49	0,286	0,046	49	0,195	0,049
76	49	0,278	0,053	49	0,197	0,047
77	49	0,417	0,003	49	0,276	0,005
78	49	0,394	0,005	49	0,275	0,006
79	49	0,145	0,321	49	0,100	0,317
80	49	0,249	0,084	49	0,176	0,076
81	49	0,387	0,006	49	0,285	0,004
82	49	0,490	0,000	49	0,333	0,001
83	49	0,000	0,998	49	-0,001	1,000
84	49	-0,029	0,842	49	-0,014	0,890
85	49	0,382	0,007	49	0,256	0,010
86	49	0,376	0,008	49	0,265	0,008

Tableau A7.2. Représentation de la corrélation entre les 24 indices les plus corrélés au niveau maximum du lac Ontario (Tableau de ρ)

	2	9	10	11	12	15	40	53	57	60	77	78	81	82	85	86	1	14	28	29	54	55	62	69
2	1,000	0,957	0,860	0,943	0,905	0,890	0,111	0,505	0,294	0,379	0,377	0,342	0,400	0,475	0,334	0,316	0,772	0,821	0,344	0,262	0,245	0,296	0,339	0,320
9	0,957	1,000	0,804	0,900	0,955	0,855	-0,040	0,471	0,322	0,306	0,395	0,351	0,329	0,425	0,376	0,347	0,710	0,776	0,455	0,355	0,331	0,238	0,326	0,255
10	0,860	0,804	1,000	0,924	0,858	0,830	0,149	0,299	0,380	0,441	0,174	0,140	0,379	0,471	0,128	0,120	0,937	0,933	0,132	0,005	0,031	0,074	0,271	0,385
11	0,943	0,900	0,924	1,000	0,945	0,944	0,106	0,384	0,410	0,443	0,338	0,291	0,430	0,503	0,280	0,262	0,853	0,879	0,318	0,210	0,181	0,157	0,357	0,367
12	0,905	0,955	0,858	0,945	1,000	0,894	0,048	0,299	0,409	0,390	0,331	0,277	0,367	0,460	0,299	0,278	0,786	0,828	0,436	0,312	0,281	0,092	0,332	0,326
15	0,890	0,855	0,830	0,944	0,894	1,000	-0,009	0,444	0,485	0,314	0,290	0,221	0,239	0,326	0,250	0,214	0,754	0,904	0,415	0,312	0,128	0,068	0,291	0,217
40	0,111	0,040	0,149	0,106	0,048	-0,009	1,000	-0,283	-0,387	-0,049	-0,509	-0,449	-0,063	-0,125	-0,530	-0,504	0,208	0,048	-0,189	-0,213	-0,354	-0,182	-0,535	0,003
53	0,505	0,471	0,299	0,384	0,299	0,444	-0,283	1,000	0,670	0,053	0,224	0,266	0,213	0,191	0,186	0,200	0,172	0,372	0,111	0,127	0,087	0,081	0,114	0,011
57	0,294	0,322	0,380	0,410	0,409	0,485	-0,387	0,670	1,000	0,133	0,116	0,124	0,046	0,129	0,078	0,086	0,360	0,462	0,062	0,044	-0,071	-0,053	0,072	0,066
60	0,379	0,306	0,441	0,443	0,390	0,314	-0,049	0,053	0,133	1,000	0,160	0,149	0,651	0,776	0,080	0,099	0,418	0,320	0,011	-0,102	0,024	0,284	0,167	0,984
77	0,377	0,395	0,174	0,338	0,331	0,290	-0,509	0,224	0,116	0,160	1,000	0,953	0,063	0,120	0,981	0,936	0,061	0,156	0,549	0,571	0,765	0,200	0,934	0,118
78	0,342	0,351	0,140	0,291	0,277	0,221	-0,449	0,266	0,124	0,149	0,953	1,000	0,119	0,138	0,948	0,973	0,031	0,106	0,460	0,478	0,800	0,193	0,879	0,107
81	0,400	0,329	0,379	0,430	0,367	0,239	-0,063	0,213	0,046	0,651	0,063	0,119	1,000	0,935	0,010	0,080	0,292	0,198	-0,008	-0,097	0,045	0,306	0,058	0,638
82	0,475	0,425	0,471	0,503	0,460	0,326	-0,125	0,191	0,129	0,776	0,120	0,138	0,935	1,000	0,052	0,098	0,407	0,300	0,026	-0,071	0,037	0,295	0,120	0,758
85	0,334	0,376	0,128	0,280	0,299	0,250	-0,530	0,186	0,078	0,080	0,981	0,948	0,010	0,052	1,000	0,964	0,024	0,129	0,492	0,515	0,791	0,196	0,938	0,040
86	0,316	0,347	0,120	0,262	0,278	0,214	-0,504	0,200	0,086	0,099	0,936	0,973	0,080	0,098	0,964	1,000	0,029	0,100	0,436	0,446	0,831	0,174	0,893	0,060
1	0,772	0,710	0,937	0,853	0,786	0,754	0,208	0,172	0,360	0,418	0,061	0,031	0,292	0,407	0,024	0,029	1,000	0,862	0,054	-0,082	-0,069	-0,094	0,210	0,383
14	0,821	0,776	0,933	0,879	0,828	0,904	0,048	0,372	0,462	0,320	0,156	0,106	0,198	0,300	0,129	0,100	0,862	1,000	0,212	0,082	-0,008	-0,024	0,231	0,241
28	0,344	0,455	0,132	0,318	0,436	0,415	-0,189	0,111	0,062	0,011	0,549	0,460	-0,008	0,026	0,492	0,436	0,054	0,212	1,000	0,931	0,460	0,126	0,441	-0,058
29	0,262	0,355	0,005	0,210	0,312	0,312	-0,213	0,127	0,044	-0,102	0,571	0,478	-0,097	-0,071	0,515	0,446	-0,082	0,082	0,931	1,000	0,468	0,043	0,478	-0,177
54	0,245	0,331	0,031	0,181	0,281	0,128	-0,354	0,087	-0,071	0,024	0,765	0,800	0,045	0,037	0,791	0,831	-0,069	-0,008	0,460	0,468	1,000	0,096	0,723	0,000
55	0,296	0,238	0,074	0,157	0,092	0,068	-0,182	0,081	-0,053	0,284	0,200	0,193	0,306	0,295	0,196	0,174	-0,094	-0,024	0,126	0,043	0,096	1,000	0,142	0,268
62	0,339	0,326	0,271	0,357	0,332	0,291	-0,535	0,114	0,072	0,167	0,934	0,879	0,058	0,120	0,938	0,893	0,210	0,231	0,441	0,478	0,723	0,142	1,000	0,120
69	0,320	0,255	0,385	0,367	0,326	0,217	0,003	0,011	0,066	0,984	0,118	0,107	0,638	0,758	0,040	0,060	0,383	0,241	-0,058	-0,177	0,000	0,268	0,120	1,000

Tableau A7.3. Représentation de la corrélation entre les 24 indices les plus corrélés au niveau maximum du lac Ontario (Tableau de p_valeurs)

	2	9	10	11	12	15	40	53	57	60	77	78	81	82	85	86	1	14	28	29	54	55	62	69
2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,468	0,002	0,087	0,027	0,028	0,048	0,019	0,005	0,058	0,073	0,000	0,000	0,004	0,038	0,163	0,090	0,050	0,065
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,793	0,005	0,064	0,084	0,023	0,045	0,061	0,014	0,031	0,048	0,000	0,000	0,000	0,004	0,060	0,183	0,064	0,153
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,288	0,052	0,012	0,004	0,271	0,378	0,013	0,002	0,425	0,456	0,000	0,000	0,265	0,966	0,846	0,641	0,082	0,012
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,470	0,016	0,009	0,005	0,038	0,076	0,007	0,001	0,094	0,117	0,000	0,000	0,006	0,088	0,276	0,348	0,028	0,023
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,743	0,068	0,011	0,017	0,046	0,097	0,025	0,004	0,072	0,096	0,000	0,000	0,000	0,010	0,092	0,589	0,045	0,049
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,950	0,003	0,001	0,046	0,066	0,164	0,132	0,038	0,119	0,185	0,000	0,000	0,000	0,008	0,425	0,673	0,065	0,174
40	0,468	0,793	0,288	0,470	0,743	0,950	0,000	0,094	0,020	0,779	0,002	0,007	0,721	0,474	0,001	0,002	0,135	0,725	0,162	0,115	0,037	0,295	0,001	0,986
53	0,002	0,005	0,052	0,016	0,068	0,003	0,094	0,000	0,000	0,701	0,100	0,050	0,119	0,163	0,179	0,147	0,263	0,011	0,467	0,419	0,527	0,555	0,409	0,937
57	0,087	0,064	0,012	0,009	0,011	0,001	0,020	0,000	0,000	0,331	0,399	0,367	0,736	0,346	0,576	0,537	0,016	0,001	0,687	0,782	0,609	0,698	0,604	0,631
60	0,027	0,084	0,004	0,005	0,017	0,046	0,779	0,701	0,331	0,000	0,243	0,279	0,000	0,000	0,565	0,478	0,005	0,032	0,943	0,521	0,864	0,036	0,224	0,000
77	0,028	0,023	0,271	0,038	0,046	0,066	0,002	0,100	0,399	0,243	0,000	0,000	0,650	0,385	0,000	0,000	0,698	0,306	0,000	0,000	0,000	0,143	0,000	0,389
78	0,048	0,045	0,378	0,076	0,097	0,164	0,007	0,050	0,367	0,279	0,000	0,000	0,386	0,314	0,000	0,000	0,845	0,489	0,002	0,001	0,000	0,158	0,000	0,435
81	0,019	0,061	0,013	0,007	0,025	0,132	0,721	0,119	0,736	0,000	0,650	0,386	0,000	0,000	0,945	0,566	0,058	0,191	0,961	0,543	0,744	0,023	0,675	0,000
82	0,005	0,014	0,002	0,001	0,004	0,038	0,474	0,163	0,346	0,000	0,385	0,314	0,000	0,000	0,709	0,479	0,007	0,045	0,866	0,655	0,787	0,029	0,382	0,000
85	0,058	0,031	0,425	0,094	0,072	0,119	0,001	0,179	0,576	0,565	0,000	0,000	0,945	0,709	0,000	0,000	0,881	0,406	0,001	0,000	0,000	0,156	0,000	0,773
86	0,073	0,048	0,456	0,117	0,096	0,185	0,002	0,147	0,537	0,478	0,000	0,000	0,566	0,479	0,000	0,000	0,857	0,517	0,003	0,003	0,000	0,208	0,000	0,667
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,135	0,263	0,016	0,005	0,698	0,845	0,058	0,007	0,881	0,857	0,000	0,000	0,652	0,512	0,661	0,550	0,177	0,011
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,725	0,011	0,001	0,032	0,306	0,489	0,191	0,045	0,406	0,517	0,000	0,000	0,064	0,497	0,957	0,875	0,127	0,111
28	0,004	0,000	0,265	0,006	0,000	0,000	0,162	0,467	0,687	0,943	0,000	0,002	0,961	0,866	0,001	0,003	0,652	0,064	0,000	0,000	0,002	0,417	0,003	0,710
29	0,038	0,004	0,966	0,088	0,010	0,008	0,115	0,419	0,782	0,521	0,000	0,001	0,543	0,655	0,000	0,003	0,512	0,497	0,000	0,000	0,002	0,786	0,001	0,262
54	0,163	0,060	0,846	0,276	0,092	0,425	0,037	0,527	0,609	0,864	0,000	0,000	0,744	0,787	0,000	0,000	0,661	0,957	0,002	0,002	0,000	0,487	0,000	0,999
55	0,090	0,183	0,641	0,348	0,589	0,673	0,295	0,555	0,698	0,036	0,143	0,158	0,023	0,029	0,156	0,208	0,550	0,875	0,417	0,786	0,487	0,000	0,302	0,048
62	0,050	0,064	0,082	0,028	0,045	0,065	0,001	0,409	0,604	0,224	0,000	0,000	0,675	0,382	0,000	0,000	0,177	0,127	0,003	0,001	0,000	0,302	0,000	0,382
69	0,065	0,153	0,012	0,023	0,049	0,174	0,986	0,937	0,631	0,000	0,389	0,435	0,000	0,000	0,773	0,667	0,011	0,111	0,710	0,262	0,999	0,048	0,382	0,000

Tableau A7.4 : Représentation des périodes de retour bivariées du maximum estival du niveau du lac Ontario et de l'indice du maximum de précipitations cumulées tous les 5 jours (mars-juin)

Niveau du lac (m)	1,3163 (T=20)	1,2566 (T=10)	1,1753 (T=5)	1,0886 (T=3)	0,9841(T=2)
Max cumulé de précipitations (mars-juin) (mm)					
7,811 (T=20)	132-164	73-84	41-46	30-33	24-26
7,202 (T=10)	70-82	38-43	22-23	15-16	12-13
6,507(T=5)	42-47	22-24	12-13	8-9	6-7
5,913 (T=3)	30-33	15-16	8-9	5-6	4-4
5,305 (T=2)	24-26	12-13	6-7	4-4	3-3

Tableau A7.5: Représentation des périodes de retour bi variées du maximum estival du niveau du lac Ontario et de l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Niveau du lac (m)	1,3163 (T=20)	1,2566 (T=10)	1,1753 (T=5)	1,0886 (T=3)	0,9841(T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier à mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	303-420	157-198	77-90	48-54	33-37
6,2510 (T=10)	154-192	79-91	40-44	24-27	17-18
5,6112 (T=5)	81-96	42-47	21-23	13-14	9-9
4,9293 (T=3)	54-61	27-30	14-15	8-9	6-6
4,1065 (T=2)	40-44	20-21	10-10	6-6	4-4

Tableau A7.6 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau du lac Ontario à période de retour **T=2 ans** avec l'indice du maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) et l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) (mm)	7,811 (T=20)	7,202 (T=10)	6,507(T=5)	5,913 (T=3)	5,305 (T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	309-431	164-208	86-101	56-63	40-44
6,2510 (T=10)	165-210	88-105	45-51	29-32	21-22
5,6112 (T=5)	93-111	48-55	25-27	16-17	11-12
4,9293 (T=3)	62-72	33-36	16-18	10-11	7-8
4,1065 (T=2)	50-57	25-28	13-14	8-8	5-6

Tableau A7.7 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau du lac Ontario à période de retour **T=5 ans** avec l'indice du maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) et l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) (mm)	7,811 (T=20)	7,202 (T=10)	6,507(T=5)	5,913 (T=3)	5,305 (T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	442-641	249-333	138-170	88-103	63-74
6,2510 (T=10)	259-347	138-171	75-88	48-54	34-38
5,6112 (T=5)	154-194	81-95	43-48	27-30	19-21
4,9293 (T=3)	115-139	60-69	31-34	19-21	14-15
4,1065 (T=2)	97-115	50-57	25-28	16-17	11-12

Tableau A7.8 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau du lac Ontario à période de retour **T=10 ans** avec l'indice du maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) et l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) (mm)	7,811 (T=20)	7,202 (T=10)	6,507(T=5)	5,913 (T=3)	5,305 (T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	704-1190	394-581	222-292	142-177	107-130
6,2510 (T=10)	420-633	229-307	123-151	80-94	59-68
5,6112 (T=5)	255-347	136-171	74-86	47-53	35-38
4,9293 (T=3)	199-259	105-128	55-64	34-38	25-27
4,1065 (T=2)	168-214	87-104	46-53	28-31	20-22

Tableau A7.9 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau du lac Ontario à période de retour **T=20 ans** avec l'indice du maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) et l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) (mm)	7,811 (T=20)	7,202 (T=10)	6,507(T=5)	5,913 (T=3)	5,305 (T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	1136-2273	714-1220	410-610	279-376	215-282
6,2510 (T=10)	685-1163	397-588	221-294	152-189	114-139
5,6112 (T=5)	463-704	250-336	142-177	93-111	69-79
4,9293 (T=3)	327-463	185-239	103-125	67-77	49-55
4,1065 (T=2)	278-382	158-199	87-103	55-63	40-45

Tableau A7.10 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Ontario à période de retour **T=2 ans** avec l'indice du maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) et l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) (mm)	7,811 (T=20)	7,202 (T=10)	6,507(T=5)	5,913 (T=3)	5,305 (T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
6,2510 (T=10)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
5,6112 (T=5)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
4,9293 (T=3)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
4,1065 (T=2)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1

Tableau A7.11: Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Ontario à période de retour **T=5 ans** avec l'indice du maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) et l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) (mm)	7,811 (T=20)	7,202 (T=10)	6,507(T=5)	5,913 (T=3)	5,305 (T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	2-2	2-2	2-2	2-2	2-2
6,2510 (T=10)	2-2	2-2	2-2	2-2	2-2
5,6112 (T=5)	2-2	2-2	2-2	2-2	2-2
4,9293 (T=3)	2-2	2-2	2-2	2-2	2-3
4,1065 (T=2)	2-3	2-3	3-3	3-3	3-3

Tableau A7.12 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Ontario à période de retour **T=10 ans** avec l'indice du maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) et l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) (mm)	7,811 (T=20)	7,202 (T=10)	6,507(T=5)	5,913 (T=3)	5,305 (T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	2-3	2-3	3-3	3-3	3-4
6,2510 (T=10)	3-4	3-4	3-4	3-4	3-4
5,6112 (T=5)	3-4	3-4	3-4	4-4	4-4
4,9293 (T=3)	4-4	4-4	4-4	4-4	4-5
4,1065 (T=2)	4-5	4-5	5-5	5-5	5-6

Tableau A7.13 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau du lac Ontario à période de retour **T=20 ans** avec l'indice du maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) et l'indice du minimum de débit d'hiver (janvier-mars)

Maximum cumulé de précipitations tous les 5 jours (mars-juin) (mm)	7,811 (T=20)	7,202 (T=10)	6,507(T=5)	5,913 (T=3)	5,305 (T=2)
Minimum de débit d'hiver (janvier-mars) (m ³ /s)					
6,7211 (T=20)	4-7	4-7	5-7	6-7	6-8
6,2510 (T=10)	4-7	5-7	5-7	6-7	6-8
5,6112 (T=5)	5-8	6-8	6-8	7-8	7-9
4,9293 (T=3)	6-8	7-8	7-9	8-9	9-10
4,1065 (T=2)	7-9	8-10	9-10	9-11	10-11

Annexe 8

Résultats du Fleuve Saint-Laurent

Tableau A8.1 : Caractéristiques de la station Upper Iroquois et des stations hydrométéorologiques pour les calcul des indices

Nom de la station	Numéro	Fonction	Source	Latitude	Longitude	Surface (km ²)	Début acquisition	Fin acquisition
Upper Iroquois, Ontario	14600	Niveau	ON MPO	44,82	75,32	-	1963	2013
Rivière des Outaouais à Sainte-Anne-de-Bellevue	02OA013	Débit	QC HyDat	45,40	73,96	146000	1921	2012
Jock River near Richmond	02LA007	Débit	ON HyDat	45,25	75,79	526,1	1971	2011
De l'Achigan	052233	Débit	QC CEHQ	45,85	73,49	641,0	1981	2013
Ottawa CDA	6105976	Météo	Envir Canada	45.38	-75.72	-	1901	2012

Tableau A8.2 : Résultats des corrélations de Spearman (rho) entre les indices les plus significativement corrélés avec le niveau à la station Upper Iroquois

Stations Débit	Niveau maximum Été-Automne			
	Indices	# données	rho	p-value
Station Hydro : 02OA013 Station Météo : Ottawa	2	42	0,13263546	0,22063521
	24	42	-0,21407828	0,04730137
	36	43	0,22011777	0,04180924
	47	43	0,24312672	0,02416709
	84	24	0,38838539	0,00853658

Tableau A8.3 : Corrélations entre les indices hydrométéorologiques retenus

Variable : Niveau maximum Été-Automne					
Indices	2	24	36	47	84
Corrélation	1	-0,28246631	-0,14130061	0,04926205	0,29696353
	-0,28246631	1	0,08469497	0,05927341	-0,13405114
	-0,14130061	0,08469497	1	0,54588275	0,05759847
	0,04926205	0,05927341	0,54588275	1	-0,2031756
	0,29696353	-0,13405114	0,05759847	-0,2031756	1
P-value	0	0,00461512	0,16518846	0,63001558	0,01717632
	0,00461512	0	0,39032874	0,54808667	0,27947619
	0,16518846	0,39032874	0	6,9322E-10	0,635771
	0,63001558	0,54808667	6,9322E-10	0	0,09161757
	0,01717632	0,27947619	0,635771	0,09161757	0

Tableau A8.4 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau à la station Upper Iroquois (Saint-Laurent) de période de retour **T=2 ans** avec l'indice Nombre de jours avec $T_{max} > 20$ et l'indice Débit maximum moyen d'été (fenêtre mobile de 30 jours) à différentes périodes de retour

Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	115.19 (T=20)	112.44 (T=10)	109.17 (T=5)	106.17 (T=3)	103.09 (T=2)
Débit maximum moyen d'été (m^3/s)					
22.850 (T=20)	170-197	107-122	69-79	51-59	43-49
22.728 (T=10)	88-101	54-62	34-40	26-30	21-25
22.580 (T=5)	54-62	31-36	19-22	14-16	11-13
22.443 (T=3)	39-45	23-26	13-16	9-11	7-9
22.300 (T=2)	33-37	18-21	10-12	7-8	5-6

Tableau A8.5 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau à la station Upper Iroquois (Saint-Laurent) de période de retour **T=5 ans** avec l'indice Nombre de jours avec $T_{max} > 20$ et l'indice Débit maximum moyen d'été (fenêtre mobile de 30 jours) à différentes périodes de retour

Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	115.19 (T=20)	112.44 (T=10)	109.17 (T=5)	106.17 (T=3)	103.09 (T=2)
Débit maximum moyen d'été (m^3/s)					
22.850 (T=20)	244-278	167-191	120-137	98-112	88-101
22.728 (T=10)	126-144	82-95	59-68	48-55	42-48
22.580 (T=5)	81-92	50-58	33-38	26-30	22-26
22.443 (T=3)	60-69	37-43	23-27	18-21	15-17
22.300 (T=2)	52-60	31-36	19-22	14-16	11-13

Tableau A8.6 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau à la station Upper Iroquois (Saint-Laurent) de période de retour **T=10 ans** avec l'indice Nombre de jours avec $T_{max} > 20$ et l'indice Débit maximum moyen d'été (fenêtre mobile de 30 jours) à différentes périodes de retour

Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	115.19 (T=20)	112.44 (T=10)	109.17 (T=5)	106.17 (T=3)	103.09 (T=2)
Débit maximum moyen d'été (m^3/s)					
22.850 (T=20)	375-427	271-310	216-247	187-214	174-200
22.728 (T=10)	193-220	133-152	104-119	88-102	80-92
22.580 (T=5)	130-149	84-97	59-69	48-56	42-49
22.443 (T=3)	98-113	63-73	42-49	32-38	28-33
22.300 (T=2)	86-99	53-62	34-40	25-30	21-25

Tableau A8.7 : Représentation des périodes de retour conjointes du maximum estival du niveau à la station Upper Iroquois (Saint-Laurent) de période de retour **T=20 ans** avec l'indice Nombre de jours avec $T_{max} > 20$ et l'indice Débit maximum moyen d'été (fenêtre mobile de 30 jours) à différentes périodes de retour

Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	115.19 (T=20)	112.44 (T=10)	109.17 (T=5)	106.17 (T=3)	103.09 (T=2)
Débit maximum moyen d'été (m^3/s)					
22.850 (T=20)	447-509	447-510	381-435	347-396	332-379
22.728 (T=10)	301-345	226-258	188-215	164-188	154-176
22.580 (T=5)	208-237	145-166	109-125	90-104	81-94
22.443 (T=3)	163-186	111-127	77-89	62-71	53-62
22.300 (T=2)	145-168	95-110	63-73	49-56	42-48

Tableau A8.8 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau à la station Upper Iroquois (Saint-Laurent) de période de retour **T=2 ans** avec l'indice Nombre de jours avec $T_{max} > 20$ et l'indice Débit maximum moyen d'été (fenêtre mobile de 30 jours) à différentes périodes de retour

Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	115.19 (T=20)	112.44 (T=10)	109.17 (T=5)	106.17 (T=3)	103.09 (T=2)
Débit maximum moyen d'été (m^3/s)					
22.850 (T=20)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
22.728 (T=10)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
22.580 (T=5)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
22.443 (T=3)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
22.300 (T=2)	1-1	1-1	1-1	1-1	1-2

Tableau A8.9 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau à la station Upper Iroquois (Saint-Laurent) de période de retour **T=5 ans** avec l'indice Nombre de jours avec $T_{max} > 20$ et l'indice Débit maximum moyen d'été (fenêtre mobile de 30 jours) à différentes périodes de retour

Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	115.19 (T=20)	112.44 (T=10)	109.17 (T=5)	106.17 (T=3)	103.09 (T=2)
Débit maximum moyen d'été (m^3/s)					
22.850 (T=20)	2-2	2-2	2-2	2-3	2-3
22.728 (T=10)	2-2	2-2	2-3	2-3	2-3
22.580 (T=5)	2-3	2-3	2-3	2-3	3-3
22.443 (T=3)	2-3	2-3	3-3	3-3	3-3
22.300 (T=2)	3-3	3-3	3-3	3-3	3-3

Tableau A8.10 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau à la station Upper Iroquois (Saint-Laurent) de période de retour **T=10 ans** avec l'indice Nombre de jours avec $T_{max} > 20$ et l'indice Débit maximum moyen d'été (fenêtre mobile de 30 jours) à différentes périodes de retour

Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	115.19 (T=20)	112.44 (T=10)	109.17 (T=5)	106.17 (T=3)	103.09 (T=2)
Débit maximum moyen d'été (m^3/s)					
22.850 (T=20)	1-3	2-4	3-5	4-4	4-5
22.728 (T=10)	2-4	2-4	4-5	4-5	4-5
22.580 (T=5)	2-4	2-4	4-5	4-5	4-5
22.443 (T=3)	2-4	2-5	5-5	4-5	4-6
22.300 (T=2)	2-5	2-5	4-5	4-5	5-7

Tableau A8.11 : Représentation des périodes de retour conditionnelles du maximum estival du niveau à la station Upper Iroquois (Saint-Laurent) de période de retour **T=20 ans** avec l'indice Nombre de jours avec $T_{max} > 20$ et l'indice Débit maximum moyen d'été (fenêtre mobile de 30 jours) à différentes périodes de retour

Nombre de jours avec $T_{max} > 20$	115.19 (T=20)	112.44 (T=10)	109.17 (T=5)	106.17 (T=3)	103.09 (T=2)
Débit maximum moyen d'été (m^3/s)					
22.850 (T=20)	3-7	3-7	4-9	6-9	7-9
22.728 (T=10)	4-9	3-8	5-9	6-9	7-9
22.580 (T=5)	4-10	4-7	5-10	7-10	8-10
22.443 (T=3)	5-11	5-8	6-11	8-11	9-11
22.300 (T=2)	5-12	6-10	7-11	8-12	10-12