UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS SAISONNIERS AU QUÉBEC MÉRIDIONAL.

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

NANAN ROMARIC KONAN

JUILLET 2026

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAITRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT (3403)

Direction de recherche :

Ali A. Assani

Prénom et nom — Directeur de recherche

Jury d'évaluation

Ali A. Assani — Université du Québec à Trois-Rivières

Prénom et nom — Directeur de recherche

Guy Samson — Université du Québec à Trois-Rivières

Prénom et nom — Membre de jury interne

Jean-François Quessy — Université du Québec à Trois-Rivières

Prénom et nom — Membre de jury département externe

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche M. Ali A. Assani, sans qui cette recherche n'aurait jamais été possible. Son incroyable expertise et connaissance en hydro-climatologie m'ont été d'une aide précieuse afin de mener à terme le présent mémoire. Sa patience et sa disponibilité hors du commun ont également rendu ma tâche des plus agréables et des plus enrichissantes.

Je remercie également l'Université du Québec à Trois-Rivières d'avoir cru en ma candidature et de m'avoir ainsi permis de réaliser un aussi beau projet qui s'inscrit dans mon champ d'intérêt de longue date, soit les changements climatiques. Je remercie particulièrement le professeur Christophe Kinnard, directeur du programme de maîtrise en sciences de l'environnement, qui a accepté, malgré ses multiples occupations, de dépouiller les données climatiques et de nous communiquer les données des caractéristiques physiographiques des bassins versants.

Je remercie aussi les professeurs Guy Samson et Jean-François Quessy d'avoir accepté d'évaluer le mémoire.

Finalement, un grand merci à ma famille, ma conjointe et à mes ami(e)s qui ont su me supporter dans cette aventure, m'encourageant dans les moments difficiles et me félicitant dans les meilleurs. Tout au long de ces trois années, plusieurs obstacles se sont dressés dans ma vie personnelle et scolaire et sans leur aide précieuse, je ne déposerais peut-être pas mon mémoire aujourd'hui.

Merci!

RÉSUMÉ

Cette étude avait pour objectif d'analyser la variabilité spatio-temporelle de deux indices de la variabilité des débits journaliers saisonniers au Québec méridional, qui sont le coefficient d'immodération (CI) et le coefficient de variation (CV). Alors que la plupart des recherches hydroclimatiques réalisées au Québec et ailleurs ont été principalement portées sur la magnitude, la fréquence, la durée ou la période d'occurrence des débits, la cinquième caractéristique « variabilité » des écoulements demeure encore très peu étudiée, malgré son importance pour la compréhension des régimes hydrologiques. L'objectif principal de ce mémoire est donc d'identifier les facteurs qui contrôlent la variabilité spatiale et temporelle de cette caractéristique des débits journaliers saisonniers dans les rivières naturelles du Québec méridional. Cette variabilité est étudiée à travers deux indices, à savoir : les coefficients d'immodération (CI, rapport entre le débit le plus élevé et le débit le plus faible mesurés durant une saison) et de variation (CV, rapport entre l'écart type et la moyenne des débits journaliers durant une saison).

L'étude s'est basée sur les données de débits journaliers mesurés dans 17 rivières réparties dans trois régions hydroclimatiques homogènes du Québec méridional sur la période allant de 1930 à 2020 durant les quatre saisons (hiver, printemps, été et automne). L'application de plusieurs tests statistiques a révélé que la variabilité spatiale des indices CI et CV dépend principalement des caractéristiques du couvert et de l'utilisation des sols, notamment de l'importance relative des superficies agricoles et des milieux humides. Leur variabilité temporelle est influencée principalement par l'indice de réchauffement climatique. Durant les quatre saisons, la tendance à long terme de cette variabilité temporelle, analysée au moyen des plusieurs tests statistiques de Mann-Kendall, est caractérisée globalement par une hausse significative des moyennes de ces deux indices. Ainsi, les impacts des changements climatiques se traduisent par une variabilité de plus en plus forte des niveaux d'eau des rivières au Québec méridional. L'application de l'analyse de redondance a révélé que les deux indices (CI et CV) sont corrélés positivement à l'indice climatique Nord Américain-Océan Pacifique (PNA) en hiver. En automne, ils sont corrélés négativement aux indices d'Oscillation Atlantique Multi-

décennale (AMO) et aux températures moyennes globales des continents et des océans (GMLOT). Au printemps, CI est corrélé positivement à GMLOT et CV, négativement à NINO3.4. Enfin, en été, CI est corrélé positivement à GMLOT et CV l'est aux indices AMO, NAO (Oscillation Nord Atlantique) et GMLOT.

Cette étude met ainsi en évidence l'importance de la variabilité des débits journaliers comme composante fondamentale des régimes hydrologiques et souligne la nécessité d'intégrer cette dimension dans le cadre de la gestion et de l'aménagement des écosystèmes fluviaux afin de conserver leur intégrité écologique dans le contexte de réchauffement climatique actuel au Québec méridional.

Mots-clés : variabilité des débits, coefficient d'immodération, coefficient de variation, régime hydrologique, changements climatiques, indices climatiques, Québec méridional.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS ..... **III**

RÉSUMÉ ..... **IV**

TABLE DES MATIÈRES ..... **VI**

LISTE DES TABLEAUX ..... **IX**

LISTE DES FIGURES ..... **X**

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES ..... **XII**

CHAPITRE I **1**

INTRODUCTION **1**

I.1. MISE EN CONTEXTE **1**

I.2. CADRE CONCEPTUEL DU PROJET DE RECHERCHE **2**

I.2.1. Définition du concept de régime hydrologique en hydrologie et en éco-hydrologie. 2

I.2.2. Définitions des concepts de la pondération et de la modération des régimes hydrologiques 6

I.3. REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES CONCEPTS DES REGIMES ECOHYDROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES AU QUEBEC MERIDIONAL **7**

I.3.1. L'utilisation des cinq caractéristiques fondamentales des débits dans les études hydroclimatiques au Québec méridional en rivières naturelles 8

I.3.2. Classification des régimes hydrologiques au Québec méridional 9

I.3.3. Relation entre les indices climatiques et les débits au Québec 11

I.5. MATÉRIELS ET MÉTHODES **14**

I.5.1. Justification de choix et description des bassins versants analysés. 14

I.5.2. Définition des indices de la variabilité des débits journaliers 17

I.5.3. Sources de données 19

I.5.4. Analyses statistiques de données 20

I.5.4.1. Constitution des séries hydroclimatiques 20

I.5.4.2. Analyse de la variabilité spatiale de deux indices hydrologiques de la variabilité des débits journaliers 20

I.5.4.3. Analyse de la variabilité temporelle de deux indices hydrologiques de la variabilité des débits journaliers 21

CHAPITRE II 24

RESULTATS 24

II.1. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES MOYENNES SAISONNIÈRES DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS 24

II.1.1. Variabilité spatiale des moyennes saisonnières des coefficients d'immodération (CI) 24

II.1.2. Variabilité spatiale des moyennes saisonnières des coefficients de variation (CV) 27

II.2. ANALYSE DE LA RELATION ENTRE LES MOYENNES SAISONNIÈRES DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS ET LES FACTEURS PHYSIO-CLIMATIQUES 29

II.2.1. Corrélation entre les moyennes saisonnières des coefficients d'immodération et les facteurs physio-climatiques 29

II.2.2. Corrélation entre les moyennes saisonnières des coefficients de variation et les facteurs physio-climatiques 31

II.3. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS 32

II.3.1. Interprétation de la variabilité spatiale des moyennes des coefficients d'immodération (CI) des débits journaliers saisonniers 32

II.3.2. Interprétation des coefficients de corrélation entre les coefficients d'immodération (CI) et les facteurs physiographiques et climatiques 34

II.3.3. Interprétation des coefficients de corrélation entre les coefficients de variation (CV) et les facteurs physiographiques et climatiques 36

CHAPITRE III 39

VARIABILITÉ TEMPORELLE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS 39

III.1. RELATION ENTRE LES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS ET LA MAGNITUDE DES DÉBITS MAXIMUMS, MOYENS ET MINIMUMS JOURNALIERS SAISONNIERS 39

III.2. TENDANCE À LONG TERME DE LA VARIABILITÉ TEMPORELLE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS 41

III.2.1. Tendance à long terme de la variabilité temporelle des coefficients d'immodération (CI) 41

III.2.2. Tendance à long terme de la variabilité temporelle des coefficients de variation (CV) 47

III.3. RELATION ENTRE LES INDICES CLIMATIQUES ET LES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS 53

III.3.1. Relation entre les indices climatiques et les coefficients d'immodération (CI) des débits journaliers saisonniers 53

III.3.2. Relation entre les indices climatiques et les coefficients de variation des débits journaliers saisonniers 56

III.4. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION SUR LA VARIABILITÉ TEMPORELLE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS 58

III.4.1. Interprétation de la tendance à long-terme de la variabilité temporelle des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV) 58

III.4.2. Interprétation de la relation entre les indices climatiques et les indices de la variabilité des débits journaliers saisonniers 61

CHAPITRE IV 64

CONCLUSION 64

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Exemples de certains impacts des cinq caractéristiques des débits sur certains processus écologiques (Richter et al., 1996). 5
Tableau 2. Quelques caractéristiques des rivières analysées. 16
Tableau 3. Comparaison des moyennes saisonnières des coefficients d'immodération (1930-2020). Résultats de l'analyse de variance ... 26
Tableau 4. Comparaison des moyennes saisonnières des coefficients de variation (1930-2020). Résultats de l'analyse de variance 29
Tableau 5. Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération (CI) et les facteurs physio-climatiques. 30
Tableau 6. Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation (CV) et les facteurs physio-climatiques. 31
Tableau 7. Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération (CI) et la magnitude des débits maximums et minimums journaliers saisonniers pendant la période 1950-2023. 40
Tableau 8. Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation (CV) et la magnitude des débits maximums, minimums et moyens journaliers saisonniers pendant la période 1950-2023. 40
Tableau 9. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux indices des coefficients d'immodération (CI) en hiver et au printemps pendant la période 1930-2023. 42
Tableau 10. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux indices des coefficients d'immodération (CI) en été et en automne pendant la période 1930-2023. 43
Tableau 11. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux indices des coefficients de variation (CV) en hiver et au printemps pendant la période 1930-2023. 47
Tableau 12. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux indices des coefficients de variation (CV) en été et en automne pendant la période 1930-2023. 48
Tableau 13. Relation entre les indices climatiques, les indices de la variabilité et les magnitudes des débits journaliers (1950-2020). 54

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les cinq composantes fondamentales des débits (écoulement) des rivières selon le concept de « régime des débits naturels » et leur hiérarchisation (adapté d'Assani *et al.,* 2010a) 4
Figure 2. La définition de la pondération et de la modération des régimes hydrologiques 7
Figure 3. Les 13 régions hydrographiques du Québec. 01 = Baie des Chaleurs et Percé; 02 = Saint-Laurent sud-est; 03 = Saint-Laurent sud-ouest ; 04 = Outaouais et Montréal; 05 = Saint-Laurent nord-ouest; 06 = Saguenay et lac Saint-Jean; 07 = Saint-Laurent nord-est ; 08 = Baies de Hannah et de Rupert; 09 = Baies James et d'Hudson; 10 = Baie d'Ungava; 11 = Mer du Labrador; 12 = Îles du fleuve Saint-Laurent; 13 = Îles du golfe du Saint-Laurent. Source : https://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/default.asp (consulté le 27 - 10-2024) 9
Figure 4. Les trois régions hydrologiques homogènes des débits de crues définies par Anctil et al. (1998) au Québec méridional. 10
Figure 5. Les huit régions hydrologiques homogènes définies au moyen des plusieurs indices des débits d'étiages au Québec méridional au moyen de l'analyse en composantes principales (Berthot et al., 2020). 11
Figure 6. Localisation de 17 rivières analysées. SW = Région hydroclimatique du sud-ouest (rive nord) ; SE = Région hydroclimatique du sud-est (rive sud au sud du 47°N); E = Région hydroclimatique d'Est (rive sud au nord du 47°N). 16
Figure 7. Exemple fictif de la variabilité des débits journaliers au cours d'un mois. La courbe rouge illustre le cas d'un régime hydrologique de type impondéré (fortes variations des débits journaliers) et immodéré (écart relativement élevé entre les débits maximum et minimum journaliers). La courbe bleue illustre le cas d'un régime hydrologique de type modéré (faibles variations des débits journaliers) et pondéré (faible écart entre les débits maximum et minimum journaliers). 18
Figure 8. Comparaison des moyennes des coefficients d'immodération des rivières en hiver 25
Figure 9. Comparaison des moyennes des coefficients d'immodération des rivières au printemps 25
Figure 10. Comparaison des moyennes des coefficients d'immodération des rivières en été 26
Figure 11. Comparaison des moyennes des coefficients d'immodération des rivières en automne 26
Figure 12. Comparaison des moyennes des coefficients de variation des rivières en hiver 27

Figure 13. Comparaison des moyennes des coefficients de variation des rivières au printemps 28
Figure 14. Comparaison des moyennes des coefficients de variation des rivières en été 28
Figure 15. Comparaison des moyennes des coefficients de variation des rivières en automne 28
Figure 16. Variabilité temporelle des coefficients d'immodération hivernaux, printaniers, estivaux et automnaux dans la région hydroclimatique du sud-est (1930-2020). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage bleu ; rivière Du Sud : gris. 44
Figure 17. Variabilité temporelle des coefficients d'immodération hivernaux, printaniers, estivaux et automnaux dans la région hydroclimatique d'est (1930-2020). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Matane : gris ; rivières Beaurivage : bleu 45
Figure 18. Variabilité temporelle des coefficients d'immodération hivernaux, printaniers, estivaux et automnaux dans la région hydroclimatique du sud-ouest (1930-2020). Rivière Petite Nation : bleu ; rivière Du Nord : rouge ; rivière L'Assomption : gris ; rivière Matawin : jaune ; rivière Vermillon : noir 46
Figure 19. Variabilité temporelle des coefficients de variation hivernaux, printaniers, estivaux et automnaux dans la région hydroclimatique du sud-est (1930-2020). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris. 50
Figure 20. Variabilité temporelle des coefficients de variation hivernaux, printaniers, estivaux et automnaux dans la région hydroclimatique d'est (1930-2020). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivières Blanche : bleu 51
Figure 21. Variabilité temporelle des coefficients de variation hivernaux, printaniers, estivaux et automnaux dans la région hydroclimatique du sud-ouest (1930-2020). Rivière Petite Nation : bleu ; rivière Du Nord : rouge ; rivière L'Assomption : gris ; rivière Matawin : jaune ; rivière Vermillon : noir 52
Figure 22. Résultat de l'analyse de redondance. Relation entre les coefficients d'immodération et les indices climatiques en hiver, printemps, été et en automne. E2 = stations hydrologiques ; points gris = années. 55
Figure 23. Résultat de l'analyse de redondance. Relation entre les coefficients de variation et les indices climatiques en hiver, printemps, été et en automne. E2 = stations hydrologiques ; points gris = années. 57

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CV	Coefficient de Variation.
CI	Coefficient d'Immodération.
ANOVA	Analyse de variance.
AMO	Oscillation Atlantique Multi-décennale (Atlantic Multidecadal Oscillation).
AO	Oscillation Arctique (Arctic Oscillation).
GMLOT	Températures moyennes globales des continents et des océans (Global Mean Land and Ocean Temperature).
NAO	Oscillation Nord Atlantique (North Atlantic Oscillation).
NINO3.4	Niño3.4 (Températures de surface de l'océan Pacifique dans la zone 3.4).
PDO	Oscillation Pacifique Décennale (Pacific Decadal Oscillation).
PNA	Oscillation Nord-Américain-Océan Pacifique (Pacific-North American index).
SOI	Oscillation Australe (Southern Oscillation).
NOAA	Administration Nationale des Océans et de l'Atmosphère (National Oceanic and Atmospheric Administration).

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1. MISE EN CONTEXTE

Il est de plus en plus établi que le réchauffement climatique actuel affecte de manière significative le cycle de l'eau à la surface de la terre. Sur le plan climatique, la hausse de la température a provoqué des changements plus ou moins profonds des régimes des précipitations. Dans les régions tempérées froides caractérisées par des précipitations solides (neiges) et liquides (pluies), cette hausse des températures se traduit par une tendance marquée de la baisse significative de la quantité de neige pendant la saison froide hivernale mais, en revanche, par une hausse de la quantité de pluies pendant la saison chaude.

Sur le plan hydrologique, ces changements des régimes de précipitations se sont traduits par la tendance à l'amplification des événements hydrologiques extrêmes (crues et étiages) (Aygün et al., 2020; Huang et al., 2018). Cette amplification fait l'objet de nombreux travaux dans ces régions tempérées froides (Berghuijs *et al.,* 2017; Blöschl et al., 2019; Dudley et al., 2020; Hammond and Fleming, 2021; Hodgkins et al., 2017; Kay et al., 2018; Najibi and Devineni, 2018; Roudier et al., 2016; Tabari, 2020; Tellman et al., 2021). Mais peu d'attention a été accordée aux impacts de cette amplification sur les régimes hydrologiques. Il s'ensuit que les conséquences de la hausse de l'intensité, de la fréquence et de la durée des crues et des étiages sur la variabilité des débits journaliers aux échelles saisonnières et annuelles ne sont pas encore documentées.

Pourtant, cette variabilité des débits constitue une dimension écologique fondamentale des hydrosystèmes fluviaux. En effet, les communautés biologiques aquatiques (poissons), invertébrés et macrophytes sont adaptées aux conditions naturelles des fluctuations des débits à différentes échelles temporelles (heure, jour, semaine, mois, saison et année), au point que toute modification durable de ces fluctuations perturbe les cycles de reproduction, les stratégies de colonisation et la structure des communautés (Poff et al.,

1997 ; Bunn et Arthington, 2002). Sur le plan des habitats, la variabilité des débits conditionne directement la disponibilité et la diversité des microhabitats aquatiques : des débits trop réguliers réduisent l'hétérogénéité hydraulique, appauvrissant ainsi la diversité spécifique, tandis que des débits excessivement variables peuvent dépasser les capacités d'adaptation des organismes et entraîner des pertes de biodiversité significatives (Lytle et Poff, 2004 ; Beche et al., 2006). Par ailleurs, la variabilité hydrologique joue un rôle structurant dans les processus géomorphologiques fluviaux : elle gouverne le transport des sédiments, le remodelage du lit et des berges, ainsi que le maintien des zones de plaines inondables, lesquelles constituent des milieux d'une productivité écologique exceptionnelle (Wohl et al., 2015 ; Gurnell et al., 2016). Dans un contexte de changements climatiques amplifiant à la fois les crues et les étiages, une hausse de la variabilité des débits pourrait donc compromettre simultanément l'intégrité des habitats, la résilience des communautés biologiques et l'équilibre morphodynamique des rivières.

I.2. CADRE CONCEPTUEL DU PROJET DE RECHERCHE

I.2.1. Définition du concept de régime hydrologique en hydrologie et en éco-hydrologie.

Le régime hydrologique définit l'état et les réponses d'un système fluvial par rapport au système climatique et les caractéristiques physico-géographiques du bassin hydrographique (Wrzesiński, 2005). Le régime hydrologique en hydrologie se réfère aux variations temporelles du débit des cours d'eau, résultant de l'interaction complexe entre les processus hydrologiques tels que les précipitations, l'évaporation, l'infiltration et l'écoulement des eaux de surface. La caractérisation du régime hydrologique est essentielle pour comprendre et prévoir les variations des débits des cours d'eau, ainsi que pour évaluer leur disponibilité en eau et leur impact sur l'environnement. La caractérisation du régime hydrologique implique l'analyse de plusieurs paramètres clés tels que les débits, les volumes d'eau, la durée et la fréquence des crues et des étiages. La variation des débits au fil du temps, à la fois sur une base journalière, saisonnière et annuelle, permet d'identifier les différentes composantes du régime hydrologique. La distribution saisonnière des débits est l'un des aspects importants de la caractérisation du

régime hydrologique. Certains cours d'eau peuvent présenter des régimes hydrologiques pluviaux, avec des débits dominés par les précipitations saisonnières, tandis que d'autres peuvent avoir des régimes de type nival ou glaciaire, où les débits sont influencés par la fonte des neiges ou de glace. Il existe également des régimes mixtes, où les débits sont influencés à la fois par les précipitations et la fonte des neiges et/ou la fonte de glace.

L'objectif de la caractérisation des débits a été de développer des indices hydrologiques qui tiennent compte des caractéristiques de la variabilité des débits. Cependant, étant donné la multitude de façons différentes de caractériser l'écoulement fluvial, les chercheurs ont adopté diverses approches. Les premières études se sont concentrées sur les conditions de débit moyen (Hawkes *et al*., 1986 ; Moss *et al*., 1987 ; Townsend *et al*., 1987), la variation du débit quotidien moyen (Horwitz, 1978), la prévisibilité des débits (e.g., Bunn *et al*. 1986 ; Colwell 1974; Resh *et al*. 1991), l'asymétrie des débits de pointe (Jowett et Duncan, 1990), la fréquence des crues (Cushing *et al*., 1983 ; Meffe, 1987), les pentes des courbes de fréquence des crues (Farquharson *et al*., 1992), les distributions saisonnières des débits mensuels (Haines *et al*., 1988), les courbes de débit et de durée de fréquence des crues et les séries chronologiques des débits annuels (McMahon *et al*., 1992). Des recherches plus récentes ont commencé à se concentrer sur l'examen simultané de séries d'indices hydrologiques (par exemple Hughes et James, 1989 ; Poff et Ward, 1989 ; Poff et Allan, 1995 ; Poff, 1996 ; Richter *et.*, 1996, 1997, 1998 ; Clausen et Biggs, 1997, 2000 ; Puckridge *et al*., 1998 ; Extence *et al*., 1999 ; Wood *et al*., 2000 ; Pettit *et al*., 2001), adoptant ainsi une approche multivariable pour quantifier le régime hydrologique. Ces recherches ont conduit à la formulation du concept de « régime des débits naturels » par Poff et al. (1997).

Selon ce concept, l'écoulement fluvial est composé de cinq caractéristiques ou composantes fondamentales suivantes : la magnitude, la durée, la période d'occurrence, la fréquence et la variabilité. Ces cinq caractéristiques ont été schématisées par Assani et al. (2010a) (figure 1). Elles peuvent être utilisées pour caractériser l'ensemble des débits et des phénomènes hydrologiques spécifiques, tels que les crues ou les étiages qui sont critiques pour l'intégrité des écosystèmes fluviaux.

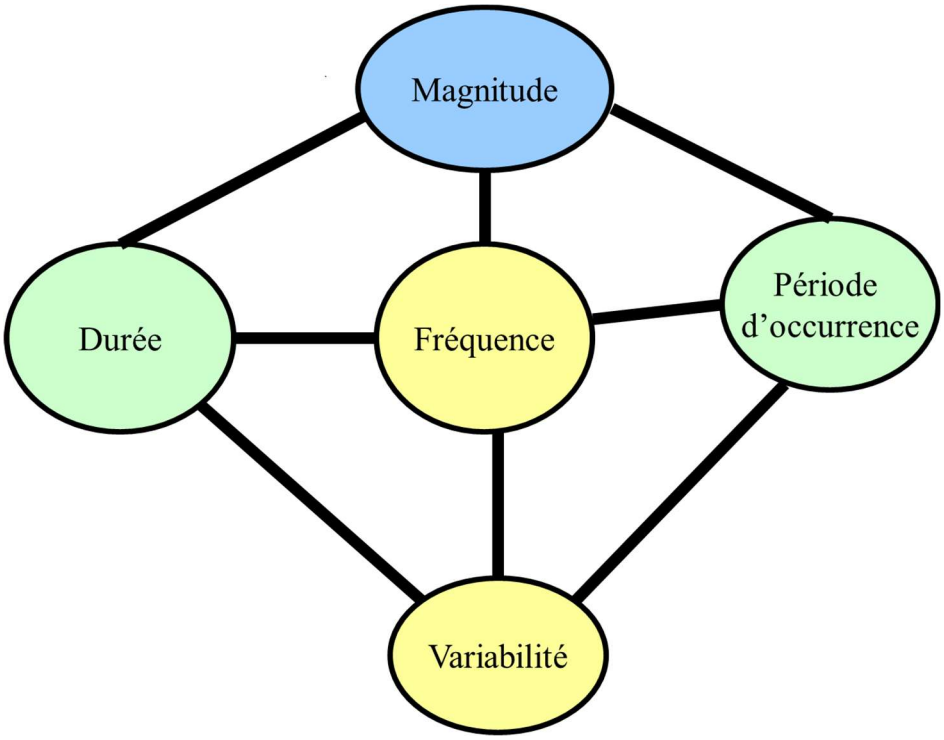


Figure 1. Les cinq composantes fondamentales des débits (écoulement) des rivières selon le concept de « régime des débits naturels » et leur hiérarchisation (adapté d'Assani *et al.,* 2010a)

- La magnitude du débit ou de l'écoulement est la quantité ou le volume d'eau (débit) qui s'écoule dans un chenal à un endroit donné et à un moment donné. Elle s'exprime en m^3/s ou l/s.
- La fréquence de l'écoulement définit le nombre de fois qu'un débit donné survient pendant un intervalle de temps donné. La fréquence d'apparition est inversement proportionnelle à l'ampleur du débit. Par exemple, une crue centennale est égale ou dépassée en moyenne une fois tous les 100 ans (c'est-à-dire une probabilité de 1% qu'elle se produise au cours d'une année donnée).
- La durée est la période (nombre d'heures, de jours ou de mois) associée à une condition d'écoulement spécifique. La durée peut être définie par rapport à un événement d'écoulement particulier (par exemple, une plaine inondable peut être inondée pendant un nombre spécifique de jours par une crue), ou elle peut être définie sur une période

spécifiée (par exemple, le nombre de jours dans une année pendant lesquels le débit dépasse une certaine valeur).

- La période d'occurrence d'un écoulement (débit) donné est définie par la date calendaire à laquelle cet écoulement a été mesuré. Elle s'exprime en jour calendaire ou jour julien. Un écoulement mesuré le 30 janvier a comme date d'occurrence le 30 janvier ou 30 en jour julien. Elle peut aussi être exprimée en degré (°) lorsqu'on ramène les 365 jours d'une année à 360° d'un cercle. Ainsi, chaque jour représente un degré de ce cercle.
- La variabilité de l'écoulement définit les fluctuations des volumes d'eau du chenal à des différentes échelles temporaires (horaire, journalière, mensuelle, annuelle, etc.). Il existe plusieurs indices pour caractériser cette caractéristique (e.g., Richter et al., 1996)

Selon Poff et al. (1997), chaque caractéristique impacte le fonctionnement des écosystèmes fluviaux (tableau 1) à travers les processus hydrologiques, biologiques, écologiques et biochimiques pour assurer leur intégrité écologique. Les exemples de certains de ces impacts avaient déjà été décrits par Richter et al. (1996).

Tableau 1. Exemples de certains impacts des cinq caractéristiques des débits sur certains processus écologiques (Richter et al., 1996).

Caractéristiques	Exemples d'impacts écologiques
Magnitude	Mesure la disponibilité ou de la pertinence de l'habitat et définit les attributs de l'habitat comme la zone humide ou le volume de l'habitat, ou la position de la nappe phréatique par rapport aux zones humides ou aux zones d'enracinement des plantes riveraines.
Durée	Détermine si une phase particulière du cycle de vie peut être achevée ou dans quelle mesure les effets stressants tels que l'inondation ou le dessèchement peuvent s'accumuler.
Fréquence	Peut-être lié à des événements de reproduction ou de mortalité pour diverses espèces, influençant ainsi la dynamique des populations.
	Détermine si certaines exigences du cycle de vie sont satisfaites ou peuvent influencer le degré de stress ou de mortalité associé à

Période d'occurrence	des conditions hydriques extrêmes telles que les inondations ou les sécheresses.
Variabilité	Peut-être lié à l'échouage de certains organismes au bord de l'eau ou dans des dépressions, ou à la capacité des racines des plantes à maintenir le contact avec les réserves d'eau phréatique.

I.2.2. Définitions des concepts de la pondération et de la modération des régimes hydrologiques

Pour caractériser la variabilité à des différentes échelles temporelles de ces cinq caractéristiques, deux concepts ont été proposés : la pondération et la modération (figure 2). La pondération définit la variation des niveaux d'eau (débits) d'un instant à l'autre dans un intervalle de temps donné (heure, jour, semaine, mois, saison, année). Ainsi, on distingue des écoulements pondérés caractérisés par des fluctuations temporelles des niveaux d'eau relativement faibles et des écoulements impondérés caractérisés par des fluctuations des niveaux d'eau relativement fortes. Quant à la modération, elle définit la variation entre les niveaux d'eau extrêmes (maximums et minimums) pendant un intervalle de temps donné. De fait, elle mesure le plus grand écart entre le niveau d'eau le plus élevé et le niveau d'eau le plus bas dans un intervalle de temps donné. Ainsi, on parle des écoulements modérés lorsque cet écart est relativement faible et des écoulements immodérés lorsque cet écart est relativement grand.

Ces deux concepts pondération et modération correspondent respectivement à deux dimensions complémentaires et non redondantes de la variabilité des débits, chacune quantifiée par un indice statistique distinct. La pondération rend compte de l'ensemble des fluctuations temporelles, qu'elles soient faibles ou fortes, en leur accordant un poids proportionnel à leur fréquence d'occurrence (Richter et al., 1996 ; Clausen et Biggs, 2000). Ainsi, il fournit une mesure, bien connue dans la littérature hydrologique, de la variabilité générale d'un régime d'écoulement. La modération ne capture que l'amplitude maximale des variations, c'est-à-dire la différence entre les conditions hydrologiques les plus extrêmes, contrairement au CV. Elle traduit ainsi la capacité d'un cours d'eau à passer d'un état de crue à un état d'étiage au sein d'une même période d'analyse (Assani et al., 2010a).

Ces deux indices couvrent donc des dimensions fondamentalement différentes de la variabilité : là où le CV intègre l'ensemble de la distribution des débits, le CI en révèle les pôles extrêmes. Utilisés conjointement, ils permettent une caractérisation plus complète de la variabilité hydrologique que ne le permettrait chacun pris isolément. Il convient cependant de souligner une limite inhérente au CI : en tant que rapport entre deux valeurs ponctuelles le maximum et le minimum, il est structurellement sensible aux valeurs extrêmes atypiques, notamment aux crues exceptionnelles ou aux étiages sévères qui peuvent survenir de manière isolée sans refléter le comportement hydrologique habituel d'un cours d'eau (Poff et al., 1997).

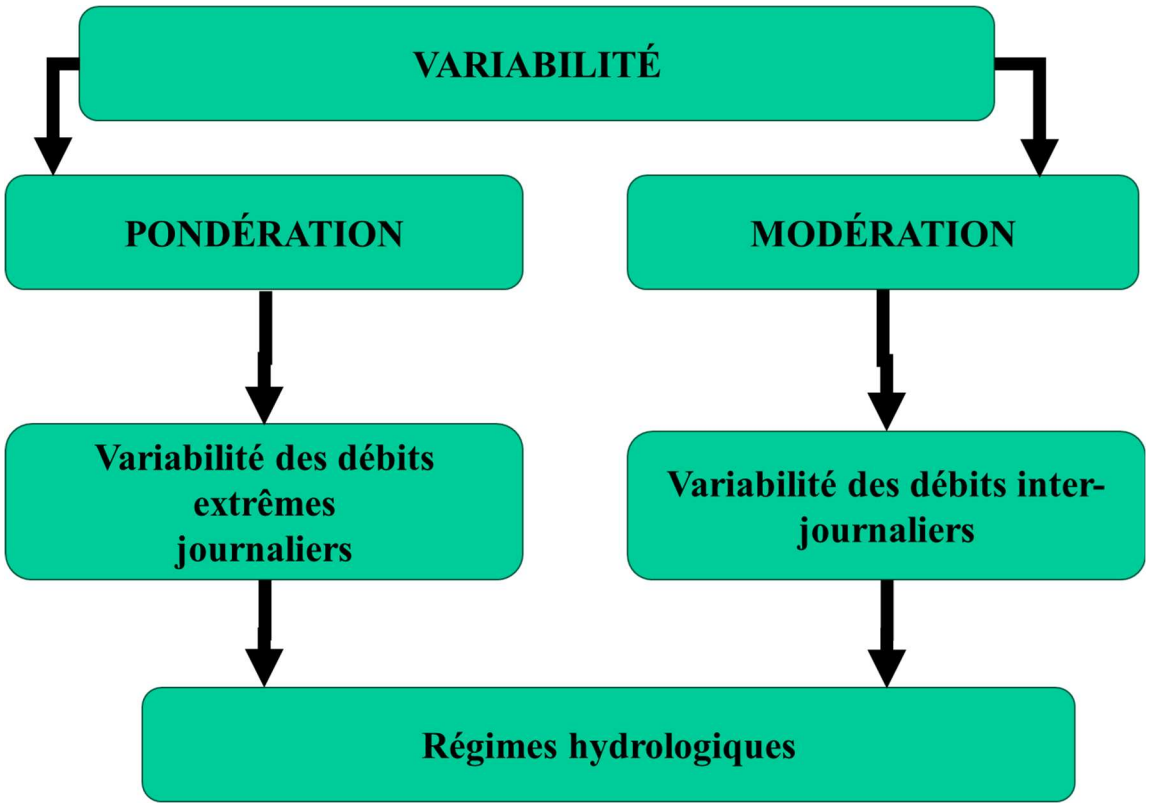


Figure 2. La définition de la pondération et de la modération des régimes hydrologiques

I.3. REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES CONCEPTS DES REGIMES ECOHYDROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES AU QUEBEC MERIDIONAL

Cette revue de littérature se penchera sur l'utilisation de cinq caractéristiques fondamentales des débits définies par le concept de régime des débits naturels, d'une part, et la classification des régimes hydrologiques, d'autre part, au Québec méridional.

I.3.1. L'utilisation des cinq caractéristiques fondamentales des débits dans les études hydroclimatiques au Québec méridional en rivières naturelles

À l'instar des autres régions du monde, la magnitude des débits est la caractéristique la plus étudiée dans les études hydroclimatiques au Québec. Ces différentes études portent sur des thématiques très variées dont la synthèse dépasse largement le cadre de ce projet d'étude. C'est la raison pour laquelle on ne procédera pas par la recension de ces travaux, car la magnitude n'est pas l'objet de notre projet de recherche.

La seconde caractéristique des débits la plus étudiée au Québec est la fréquence de la magnitude des débits. Mais, contrairement à la magnitude, la fréquence a été étudiée surtout dans les études consacrées à la régionalisation des débits de crues et des étiages.

Après ces deux caractéristiques, la période d'occurrence des crues et des étiages est la troisième caractéristique qui a déjà fait l'objet de quelques études au Québec méridional. Mais on a recensé moins de dix articles qui portent sur cette caractéristique. Ces études ont porté sur l'analyse des facteurs de la variabilité spatiale et temporelle des débits de crues et d'étiages (Assani, 2022a, 2022b ; Assani *et al.,* 2010a, Assani *et al.,*2006 ; Kinnard et al., 2022, 2024 ; Mazouz *et al.,* 2012, 2013).

La durée des débits est moins étudiée au Québec. À notre connaissance, trois études lui ont été consacrées pour déterminer les facteurs de sa variabilité spatio-temporelle (Assani, 2022a, 2022b ; Assani *et al.,* 2023).

Enfin, la variabilité des débits journaliers qui définit les concepts de pondération et de modération n'a jamais fait l'objet d'aucune étude en rivières naturelles. Néanmoins, il existe une seule étude sur les impacts des barrages et réservoirs sur les coefficients d'immodération et de pondération au Québec méridional (Delisle et Assani, 2021).

I.3.2. Classification des régimes hydrologiques au Québec méridional

Plusieurs classifications des régimes hydrologiques ont été déjà proposées au Québec méridional. Mais toutes ces classifications sont fondées sur les approches déductives.

La première approche utilisée pour classifier les régimes hydrologiques est celle fondée sur la régionalisation environnementale. Elle est utilisée par le Centre d'expertise hydrique du ministère de l'environnement. Cette approche a regroupé les rivières du Québec en 13 régions hydrographiques en fonction des caractéristiques physiographiques et climatiques des bassins versants (figure 3).

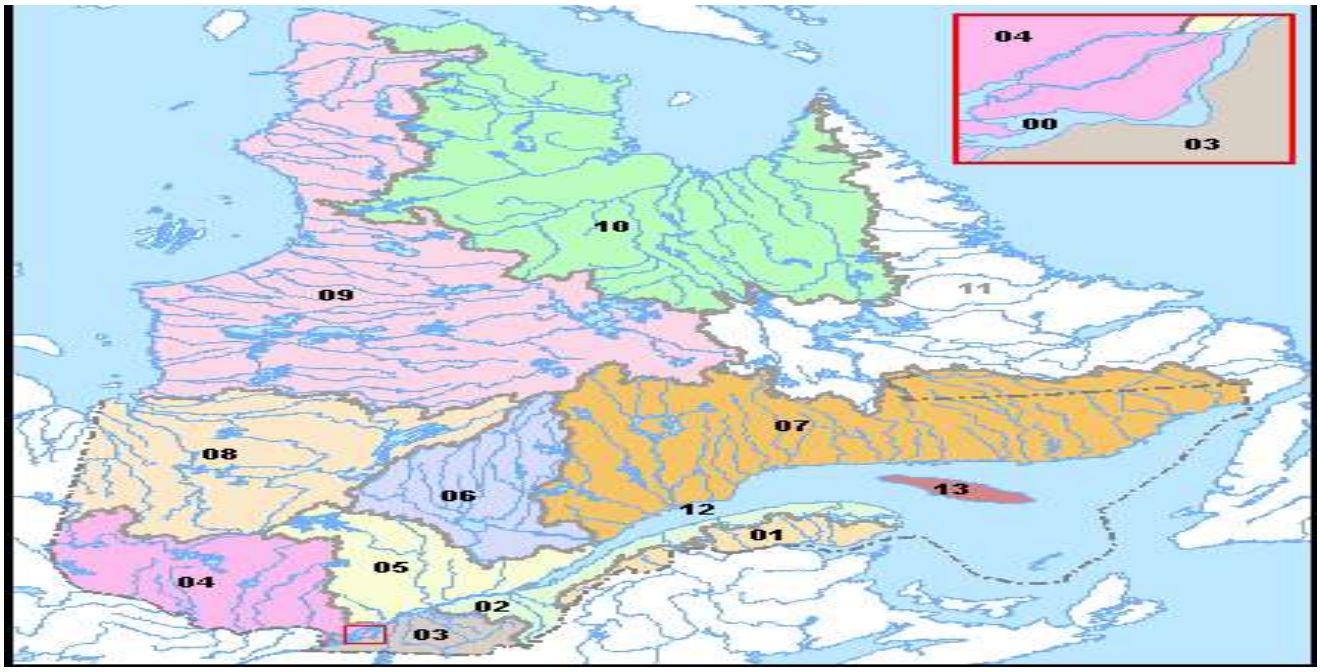


Figure 3. Les 13 régions hydrographiques du Québec. 01 = Baie des Chaleurs et Percé; 02 = Saint-Laurent sud-est; 03 = Saint-Laurent sud-ouest ; 04 = Outaouais et Montréal; 05 = Saint-Laurent nord-ouest; 06 = Saguenay et lac Saint-Jean; 07 = Saint-Laurent nord-est ; 08 = Baies de Hannah et de Rupert; 09 = Baies James et d'Hudson; 10 = Baie d'Ungava; 11 = Mer du Labrador; 12 = Îles du fleuve Saint-Laurent; 13 = Îles du golfe du Saint-Laurent. Source : https://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/default.asp (consulté le 27 -10-2024)

La seconde approche la plus couramment utilisée est la Régionalisation hydrologique. Celle-ci a fait l'objet de nombreuses publications dans la littérature scientifique (Anctil et al., 1998; Belzile et al., 1997). Il faut rappeler que cette approche vise à estimer des débits des rivières non jaugées à partir des données des débits mesurées dans d'autres rivières. Ce transfert d'informations est réalisé à travers l'ajustement des lois statistiques dites régionalisées ajustées sur les données des débits mesurés regroupés en régions hydrologiques homogènes au moyen des tests statistiques. Au Québec, Anctil et al. (1998) ont appliqué la loi des Valeurs Extrêmes Généralisées (GEV), après avoir regroupé les rivières en trois régions hydrologiques homogènes (figure 4), pour estimer les débits de crues de différentes périodes de retour. Quant aux débits d'étiage, les mêmes auteurs avaient proposé l'utilisation de la loi statistique Lognormale type III pour estimer ces débits de différentes périodes de retour après avoir regroupé les rivières en six régions hydrologiques homogènes en hiver et en été.

365

tion des trois régions homogènes proposées pour la province de Québec.

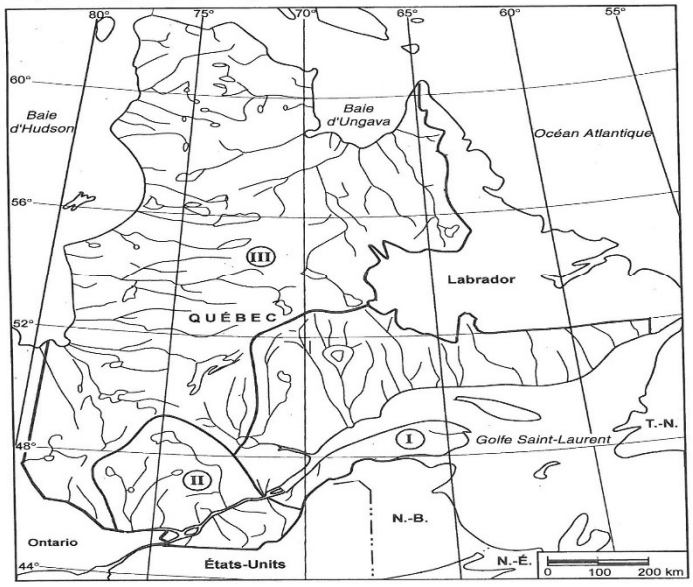


Figure 4. Les trois régions hydrologiques homogènes des débits de crues définies par Anctil et al. (1998) au Québec méridional.

La troisième approche utilisée pour regrouper les rivières en régions hydrologiques homogènes est l'approche inductive. Elle est fondée sur l'utilisation

exclusive des caractéristiques des débits. Plusieurs auteurs ont déjà utilisé cette approche pour regrouper les rivières en régimes hydrologiques homogènes. Cependant tous ces auteurs ont utilisé seulement la magnitude des débits de crues ou d'étiages pour cette régionalisation (e.g., Assani et al., 2010a, 2011 ; Berthot et al., 2020). Cette régionalisation est généralement fondée sur l'analyse en composantes principales des débits. Un exemple de ce type de classification est illustré à la figure 5.

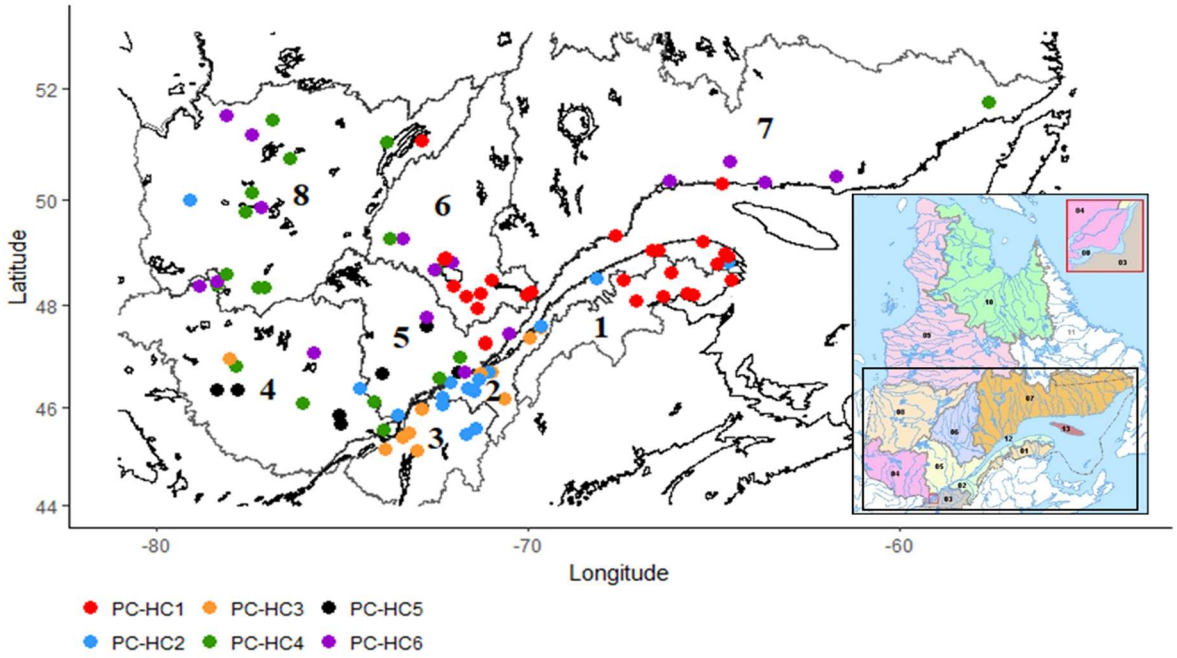


Figure 5. Les huit régions hydrologiques homogènes définies au moyen des plusieurs indices des débits d'étiages au Québec méridional au moyen de l'analyse en composantes principales (Berthot et al., 2020).

I.3.3. Relation entre les indices climatiques et les débits au Québec

Outre les facteurs physico-géographiques des bassins versants, la variabilité temporelle des régimes hydrologiques est également influencée par des forçages climatiques de grande échelle, communément désignés sous le terme d'indices climatiques ou téléconnexions climatiques. Ces indices traduisent des modes de variabilité naturelle du système climatique océan-atmosphère qui se manifestent à des échelles interannuelles à multidécennales. Ils influencent les variables climatiques (précipitations,

températures, humidité, vents, etc.) et hydrologiques (débits) dans le cadre de la circulation générale des masses d'air.

De nombreux travaux sont consacrés à l'analyse de la relation entre ces indices climatiques et les variables hydroclimatiques dans de nombreuses régions de la planète. Au Québec, plusieurs travaux sont déjà publiés sur ce sujet (e.g., Anctil et Coulibaly, 2004 ; Assani et al., 2010b ; 2011a, 2011b ; Biron et al., 2014 ; Déry et al., 2004, 2005 ; Shabbar, 2006). Ces travaux ont démontré l'existence de liens entre les débits de rivières du Québec avec les indices climatiques d'oscillations Atlantique Multi-décennales (AMO), Nord Atlantique (NAO), Australe/El Niño (ENSO) et Pacifique décennale (PDO). Néanmoins, il est important de souligner que tous ces travaux ne reposent pas sur les mêmes méthodes d'analyse ni ne couvrent les périodes temporelles. Cependant, il n'existe encore aucune étude sur la relation entre les indices de réchauffement global (GMLOT) et les débits de rivières naturelles au Québec méridional.

I.4. Problématique, objectifs et hypothèses du projet de recherche

À l'instar des autres régions de la planète, au Québec, l'analyse de la revue de la littérature sur l'application du concept de régime des débits naturels a révélé que la caractéristique de l'écoulement fluvial la plus étudiée est, sans le moindre doute, la magnitude. D'autres caractéristiques sont accessoirement étudiées en relation avec cette magnitude. Cependant, il n'existe encore aucune étude consacrée spécifiquement à la caractéristique « variabilité » de l'écoulement des rivières naturelles même dans la littérature scientifique mondiale. Pourtant, cette variabilité inclut directement et indirectement toutes les quatre autres caractéristiques de l'écoulement (voir figure 1). Sur le plan hydrologique, il est important de combler cette lacune en analysant les facteurs qui influencent la variabilité spatiale et temporelle des débits.

En raison de l'inclusion des autres caractéristiques, la variabilité des débits est la caractéristique qui permet de définir les régimes hydrologiques. Au Québec, ces régimes hydrologiques, à travers les travaux de régionalisation par différentes approches, sont définis et caractérisés exclusivement au moyen de la magnitude de l'écoulement. Même dans la littérature internationale, la variabilité des débits n'a jamais

été utilisée pour la régionalisation et la caractérisation des régimes hydrologiques à travers les concepts de la modération et de la pondération. C'est une autre lacune qu'il est important de combler au Québec.

Par ailleurs, à l'instar des autres régions de la planète, le Québec est confronté aux impacts des changements climatiques sur les ressources hydriques. Du point de vue climatique, ces impacts induits par la hausse de la température se traduisent par une baisse généralisée de la quantité de neige mais, en revanche, par une hausse généralisée de la quantité de pluies (e.g., Assani, 2024; Brown, 2010; Guerfi *et al.,* 2015). Les impacts de ces changements des régimes de précipitations ont été largement analysés sur la variabilité temporelle de la magnitude (e.g., Assani, 2022, 2023; 2024a, 2024b; Assani *et al.,* 2022, 2023; Kinnard *et al.,* 2022; 2024), les périodes d'occurrence des débits de crues et d'étiages (Kinnard *et al.,* 2022, 2024) et de la durée des crues (Assani *et al.,* 2023). Il n'existe encore aucune étude sur ces impacts sur la pondération et la modération des régimes hydrologiques au Québec ni dans le monde. C'est une autre lacune qu'il est important de combler sur les impacts des changements climatiques sur la variabilité des débits au Québec.

À la lumière de ces considérations et de trois lacunes relevées ci-dessus, notre projet de recherche poursuit les objectifs suivants :

1. **Analyser les facteurs qui influencent la variabilité spatiale de la pondération et de la modération des régimes hydrologiques saisonniers au Québec méridional**. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : la pondération et la modération des régimes hydrologiques au Québec méridional varient principalement en fonction du couvert et de l'utilisation des sols dans les bassins versants. Les bassins versants agricoles sont caractérisés par des indices de pondération et de modération plus élevés (variabilité relativement forte de l'écoulement) que les bassins versants non agricoles en raison de l'augmentation du processus de ruissellement dans les premiers bassins versants.

2. **Analyser les facteurs de la variabilité temporelle de la pondération et de la modération des régimes hydrologiques saisonniers au Québec méridional en relation avec les changements des régimes de précipitations induits par le réchauffement climatique.** L'hypothèse qui sous-tend cet objectif est la suivante : en raison de

l'augmentation de la quantité de pluies durant toutes les saisons au Québec méridional, la variabilité de l'écoulement des rivières (pondération et modération) augmente dans le temps modifiant ainsi les régimes hydrologiques des rivières du Québec méridional.

3. Analyser la relation entre les indices climatiques et les indices de la pondération et de la modération des régimes hydrologiques au Québec méridional. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : les indices de la pondération et de la modération des régimes hydrologiques sont corrélés aux mêmes indices climatiques qui influencent la magnitude des débits au Québec méridional. Il s'agit des indices d'oscillation atlantique multi-décennale (AMO), arctique (AO), nord atlantique (NAO) et l'oscillation australe/El Niño (ENSO).

I.5. MATÉRIELS ET MÉTHODES

I.5.1. Justification de choix et description des bassins versants analysés.

Pour pouvoir comparer la variabilité spatio-temporelle des indices hydrologiques de la variabilité des débits et les facteurs qui l'influencent, on a choisi les mêmes bassins versants qui ont déjà fait l'objet d'études fouillées sur la variabilité spatio-temporelle de la magnitude des débits maximums, minimums et moyens journaliers aux échelles annuelle et saisonnières. En effet, le choix de ces bassins versants était justifié par les trois critères suivants :

- L'existence de mesures continues des débits sur une longue période de plus de 80 ans. Cette longue période permet d'appliquer des tests statistiques dont l'objectif est de mettre en évidence l'existence de la persistance à long terme susceptible d'affecter la tendance à long terme de la variabilité des caractéristiques des débits.
- L'existence de données des facteurs naturels et anthropiques qui peuvent expliquer la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques des débits au Québec méridional. Il s'agit des facteurs liés aux climats, aux caractéristiques physiographiques des bassins versants, au couvert et à l'utilisation des sols.
- Leur appartenance aux trois régions hydroclimatiques définies au Québec méridional (e.g., Assani *et al.,* 2010).

Sur la base de ces critères, 17 bassins versants furent retenus (e.g., Assani *et al.,* 2010). Ceux-ci sont regroupés en trois régions hydroclimatiques homogènes. Comme le montrent la figure 6 et le tableau 2, la première région hydroclimatique homogène sud-ouest est située en rive nord du fleuve Saint-Laurent. Elle est représentée par cinq bassins versants. Sur le plan géologique, les rivières de cette région drainent les formations géologiques du Bouclier canadien dont le sous-bassement est constitué principalement des roches magmatiques et métamorphiques recouvertes par des dépôts meubles d'origine fluvio-glacio-marine. Ainsi, sur le plan morphologique, les rivières de cette région sont caractérisées par une alternance quasi régulière des tronçons de sédiments meubles (sables, limons et argiles) à écoulement relativement lent et des tronçons rocheux ou caillouteux à écoulement relativement rapide. Les sols étant très peu propices à la mise en valeur, l'agriculture y est, par conséquent, presqu'inexistante. Le couvert naturel des sols est caractérisé par un couvert forestier dense, qui fait l'objet d'exploitation, et par des milieux humides qui occupent des superficies plus étendues que dans les deux autres régions hydroclimatiques. Le climat est de type tempéré continental caractérisé par des hivers très froids et des étés très chauds. La seconde région hydroclimatique du sud-est, représentée par six bassins versants, est située en rive sud au sud du 47°N. Ces bassins versants sont presqu'entièrement circonscrits dans les Basses Terres de Saint-Laurent, une formation géologique constituée des roches sédimentaires recouvertes par un épais manteau des sédiments meubles de diverses origines. Ce qui se traduit par une topographie relativement plane. C'est la région hydroclimatique qui est caractérisée par un développement important de l'agriculture. Il en résulte une diminution significative des superficies du couvert forestier et des milieux humides. Le climat est de type froid tempéré mixte défini par un mélange des caractéristiques des climats tempérés froids continental et maritime (océanique). Les températures hivernales sont relativement plus clémentes que celles observées en rive nord aux mêmes latitudes. Enfin, la dernière région hydroclimatique d'est, représentée aussi par six bassins versants, est située aussi en rive sud mais au nord du 47°N. Les rivières de cette région entaillent principalement les formations géologiques des Appalaches, ancienne chaîne de montagne plissée, constituées principalement des roches sédimentaires. Le plissement confère à ces rivières un profil longitudinal plus incliné que celui des rivières des Basses Terres de Saint-

Laurent. L'agriculture est moins développée qu'au sud du 47°N permettant ainsi un maintien des superficies du couvert forestier et des milieux humides relativement plus étendues. Le climat est de type tempéré froid maritime en raison de l'influence du Golfe de Saint-Laurent et de la proximité de l'océan Atlantique. Mais cette influence s'étiole progressivement vers le sud. En raison de cette influence maritime, les amplitudes thermiques annuelles et saisonnières sont moins importantes que celles observées dans les deux autres régions hydroclimatiques.

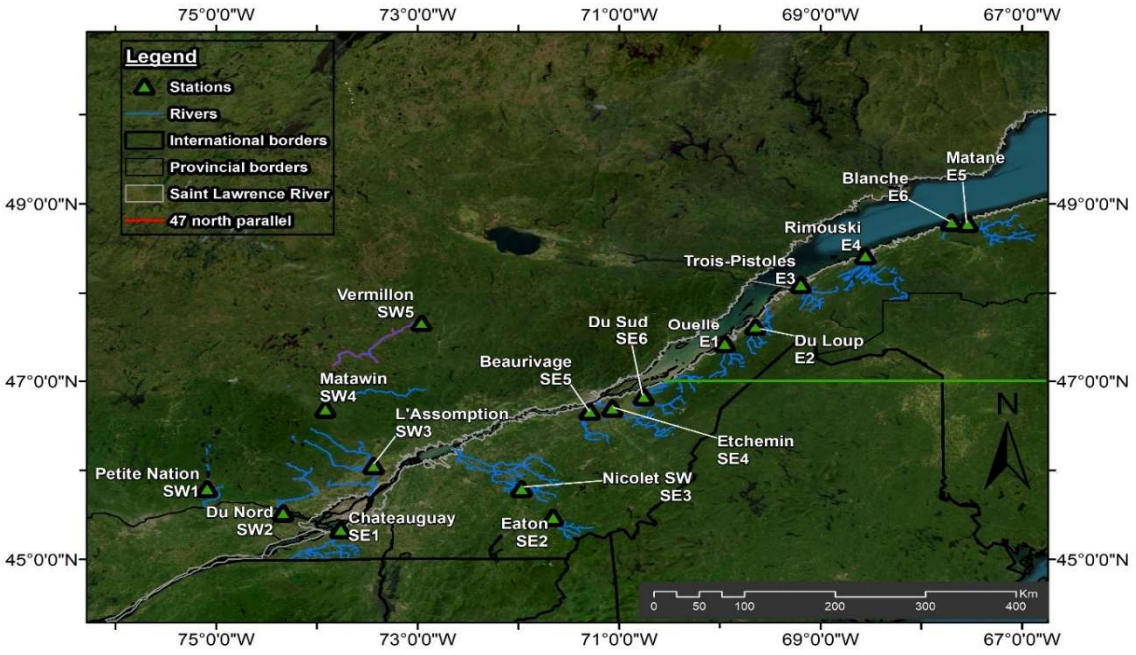


Figure 6. Localisation de 17 rivières analysées. SW = Région hydroclimatique du sud-ouest (rive nord) ; SE = Région hydroclimatique du sud-est (rive sud au sud du 47°N); E = Région hydroclimatique d'Est (rive sud au nord du 47°N).

Tableau 2. Quelques caractéristiques des rivières analysées.

Rivières	Code	ID	Superficies des bassins versants (Km²)	Latitude (°N)	Longitude (°O)
Région Hydroclimatique du Sud-ouest					
Petite Nation	SW1	040406	1331	45°47'27''	75°05'22''

Du Nord	SW2	040110	1163	45°31’08’’	74°20’11’’
L’Assomption	SW3	052219	1286	46°02’45’’	73°26’19’’
Matawin	SW4	050119	1387	46°40’50’’	73°55’00’
Vermillon	SW5	050142	2662	47°39’20’’	72°57’44’’
Région hydroclimatique du sud-est					
Châteaugay	SE1	030905	2492	45°19’49’’	73°45’44’’
Eaton	SE2	030234	646	45°28’05’’	71°39’18’’
Nicolet SW	SE3	030101	562	45°47’30’’	71°58’05’’
Beaurivage	SE4	023401	1152	46°39’25’’	71°39’18’’
Etchemin	SE5	023303	708	46°39’25’’	71°17’20’’
Du Sud	SE6	023106	821	46°49’22’’	70°45’22’’
Région hydroclimatique d’est					
Ouelle	E1	022704	796	47°22’52’’	67°57’14’’
Du Loup	E2	022513	1042	47°36’43’’	69°38’41’’
Trois-Pistoles	E3	022301	930	48°05’21’’	69°11’43’’
Rimouski	E4	022003	1615	48°24’46’’	68°33’18’’
Matane	E5	021601	1655	48°46’25’’	67°32’25’’
Blanche	E6	021702	223	48°47’20’’	67°41’51’’

I.5.2. Définition des indices de la variabilité des débits journaliers

Dans la littérature scientifique, il existe de nombreux indices pour caractériser la variabilité des débits à toutes les échelles temporelles. Dans une revue de littérature sur le choix des indices les plus pertinents pour caractériser cette variabilité, Olden et Poff (2003) avaient démontré que la plupart de ces indices étaient corrélés, c’est-à-dire redondants sur le plan hydrologique. À la lumière de cette conclusion, Delisle et Assani (2021) ont proposé d’utiliser deux indices non redondants pour définir entièrement la variabilité des débits aux échelles journalière, mensuelle, saisonnière et annuelle. L’avantage de ces deux indices est d’intégrer la variabilité de quatre autres caractéristiques fondamentales des débits (magnitude, période d’occurrence, durée et fréquence). Il s’agit

des indices suivants : le coefficient de variation (CV) et le coefficient d'immodération (CI).

Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart type et la moyenne arithmétique des débits, exprimé en %. Il définit la variabilité des débits journaliers d'un jour à un autre aux échelles saisonnières et annuelles (Figure 7). Il définit la caractéristique « pondération » du régime hydrologique d'une rivière. Si les débits journaliers d'une rivière varient fortement d'un jour à un autre, on parle d'un régime hydrologique impondéré.

Le coefficient d'immodération est le rapport entre le débit journalier le plus élevé et le débit journalier le plus faible mesurés durant une saison ou une année (Figure 7). En effet, il définit l'amplitude maximale de la variabilité des débits journaliers aux échelles saisonnières ou annuelle. Il définit la caractéristique « modération » du régime hydrologique d'une rivière. Si l'écart entre les débits maximum et minimum journaliers durant une saison ou une année est relativement grand, on parle d'un régime hydrologique immodéré.

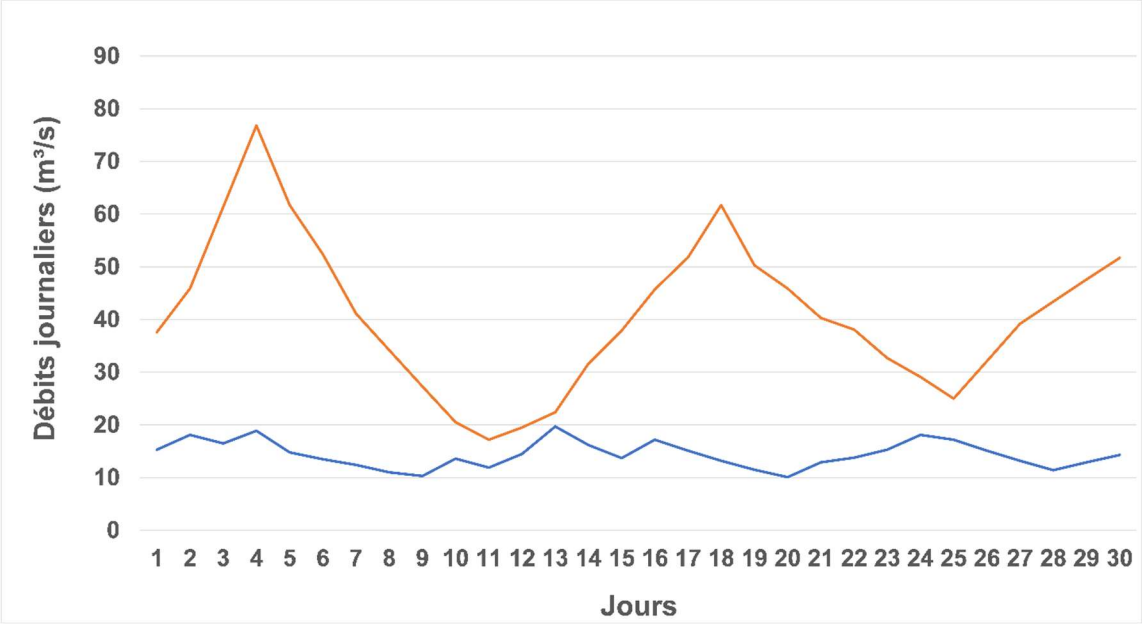


Figure 7. Exemple fictif de la variabilité des débits journaliers au cours d'un mois. La courbe rouge illustre le cas d'un régime hydrologique de type impondéré (fortes variations des débits journaliers) et immodéré (écart relativement élevé entre les débits maximum et minimum journaliers). La courbe bleue illustre le cas d'un régime hydrologique de type

modéré (faibles variations des débits journaliers) et pondéré (faible écart entre les débits maximum et minimum journaliers).

I.5.3. Sources de données

Les données des débits journaliers de 17 rivières analysées ont été extraites du site internet du Centre d'expertise hydrique du Québec géré par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (https://www.cehq.gouv.qc.ca, consulté le 20 mai 2024). Les données des variables climatiques proviennent de données de la réanalyse d'ERA5-Land produites par Copernicus Climate Data Store couvrant la période 1950 à 2020 (Muñoz-Sabater, 2019). Pour tous les bassins versants qui seront analysés, ces données journalières concerneront les variables climatiques suivantes : les températures (maximales, moyennes et minimales), les pluies, la quantité de neige, la quantité de l'équivalence en eau de la neige, les précipitations totales (neige et pluies) et l'évapotranspiration totale.

Pour les données physiographiques des bassins versants, elles nous ont été aimablement communiquées par le laboratoire de glaciologie de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Il s'agit des données suivantes : la pente moyenne exprimée en %, la densité de drainage exprimée en km/km, ainsi que les superficies des forêts, de l'agriculture, des milieux humides, des villes. Ces superficies ont été exprimées en pourcentage des superficies totales des bassins versants. Il importe de préciser que les milieux humides incluent les superficies des petits lacs (plans d'eau). Ces dernières données ont été extraites de l'ouvrage de Belzile *et al.* (1997). Il importe de préciser aussi que les données physiographiques ne sont pas mesurées chaque année comme les données hydro-climatiques. Toutefois, il existe des données mesurées presque tous les dix ans sur l'évolution des superficies agricoles depuis 1950 (Ruiz, 2019).

Enfin, en ce qui concerne les indices climatiques, les données moyennes mensuelles ont été extraites du site web de l'agence américaine NOAA (https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/). Au Québec méridional, les indices climatiques suivants sont utilisés pour analyser leur influence sur la variabilité temporelle des variables climatiques et hydrologiques (e.g., Assani *et al.,* 2010a, 2010b, 2011; 2019; Beauchamp et al., 2015; Guerfi et al., 2015): AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation),

AO (Arctic Oscillation), Indice de Réchauffement climatique Global (Global Mean Land/Ocean Temperature, GMLOT), NAO (North Atlantic Oscillation), Niño3.4, PDO (Pacific Decadal Oscillation) et PNA (Pacific North American index). Mais aucune des études précédentes n'a jamais analysé la relation entre l'indice de réchauffement climatique global (Global Mean Land/Ocean Temperature, GMLOT) et ces variables hydro-climatiques. Toutefois, il vient d'être utilisé pour la première fois au Québec par Goulet *et al.,* (2024) dans le bassin versant de la rivière Chaudière.

I.5.4. Analyses statistiques de données

I.5.4.1. Constitution des séries hydroclimatiques

En ce qui concerne les deux indices hydrologiques de la variabilité des débits journaliers (CV et CI), pour chacune de 17 rivières analysées et pour chacune des quatre saisons, on a constitué les deux séries de ces indices pendant la période 1930-2023. Les quatre saisons sont les suivantes : hiver (de janvier à mars), printemps (d'avril à juin), été (de juillet à septembre) et automne (d'octobre à décembre). De même, pour les mêmes saisons, on a constitué aussi des séries saisonnières synchrones des indices climatiques pendant la période 1950-2020. Il n'existe pas de données pour les six indices avant 1950. Pour les variables climatiques, on a constitué six séries saisonnières synchrones suivantes : séries des températures moyennes journalières, séries des précipitations totales (neige et pluies), séries des coefficients d'immodération des températures moyennes journalières et des précipitations totales et, enfin, séries des coefficients de variation des températures moyennes journalières et des précipitations totales pendant la période 1950-2020. Mentionnons que pour les coefficients d'immodération des précipitations totales, on a remplacé les valeurs nulles par 1mm d'eau.

I.5.4.2. Analyse de la variabilité spatiale de deux indices hydrologiques de la variabilité des débits journaliers

Pour comparer la variabilité spatiale des indices CV et CI et déterminer les facteurs qui les influencent spatialement, on a procédé par les deux étapes suivantes :

À la première étape, on a comparé saison par saison les moyennes arithmétiques de ces deux indices de 17 rivières analysées. Rappelons que ces moyennes ont été calculées sur la période de 1930 à 2023. Cette comparaison a été effectuée au moyen de l'analyse de variance (ANOVA) à 3 facteurs.

Avant d'appliquer l'ANOVA, les deux conditions préalables à son utilisation ont été vérifiées de façon visuelle. La normalité de la distribution des données a été examinée visuellement à l'aide des graphiques quantile-quantile (Q-Q plots), qui permettent de comparer la distribution empirique des résidus à celle d'une loi normale théorique. L'homogénéité des variances entre les groupes a quant à elle été évaluée visuellement au moyen des graphiques des résidus en fonction des valeurs ajustées. Ces deux vérifications ont confirmé la satisfaction des conditions d'application d'une ANOVA à trois facteurs. Ceux-ci sont les rivières (17 rivières), les années (70 ans) et les régions hydroclimatiques (3 régions).

Les hypothèses du test sont les suivantes :

H0 : les moyennes des indices CV et CI sont égales pour l'ensemble des 17 rivières

H1 : au moins deux rivières présentent des moyennes significativement différentes.

H0 est rejetée lorsque la statistique de Fisher calculée dépasse la valeur critique au seuil $\alpha = 0,05$. Il est important de souligner que le rejet de H0 signifie uniquement que les moyennes ne sont pas toutes égales entre les 17 rivières. Pour identifier les paires des rivières dont les moyennes sont significativement différentes, on a appliqué le test post-hoc de Tukey.

À la seconde étape, on a corrélé ces mêmes moyennes aux variables climatiques (température et précipitations), physiographiques (superficies, pentes moyennes et densités de drainage des bassins versants) et à celles de l'utilisation/couvert des sols (pourcentages de forêts, de l'agriculture et des milieux humides dans les bassins versants). Deux méthodes de corrélations furent appliquées : la corrélation linéaire, test paramétrique, et la corrélation de rang de Spearman, test non paramétrique.

I.5.4.3. Analyse de la variabilité temporelle de deux indices hydrologiques de la variabilité des débits journaliers

Cette analyse a été aussi effectuée en deux étapes.

À la première étape, on a analysé la tendance à long terme des séries des indices CV et CI. On a d'abord appliqué le test classique de tendance de Mann-Kendall (Sneyers, 1975). Cependant, ce test ne permet pas d'éliminer les effets de persistance à court et à long terme qui peuvent affecter les résultats de ce test. Pour éliminer ces deux types de persistance, on a appliqué deux autres tests dérivés du test de Mann-Kendall.

Le test de Mann-Kendall est un test statistique non paramétrique conçu pour détecter la présence d'une tendance temporelle monotone (croissance ou décroissance) dans une série chronologique, sans présupposer de distribution particulière des données (Man, 1945 ; Kendall, 1975 ; Sneyers, 1975). Il repose sur le calcul d'une statistique S, définie comme la somme des signes des différences entre toutes paires d'observations successives de la série. Une valeur positive de S indique une tendance à la hausse, une valeur négative de S indique une tendance à la baisse, et une valeur proche de zéro suggère l'absence de tendance.

Le test de Mann-Kendall requiert trois conditions : l'indépendance des observations, l'absence de saisonnalité non corrigée et un échantillon suffisamment grand ($n \geq 10$). Or les séries hydrologiques présentent souvent une autocorrélation positive qui gonfle artificiellement la statistique S, augmentant ainsi le risque de faux positifs (Hamed et Rao, 1998 ; Yue et Wang, 2004). Pour pallier cette limite, deux tests dérivés du test de Mann-Kendall ont été appliqués afin d'éliminer respectivement les effets de persistance à court et à long terme.

Hypothèse :

H0 : il n'existe aucune tendance monotone dans la série temporelle (les observations sont indépendantes et identiquement distribuées.

H1 : il existe une tendance monotone significative, croissance ou décroissance dans la série temporelle.

H0 est rejetée lorsque la valeur de p-value associée à la statistique S standardisée est inférieure au seuil de significativité retenu.

À la seconde étape, on a analysé la relation entre les deux indices hydrologiques de la variabilité des débits aux indices climatiques au moyen de l'analyse multidimensionnelle fondée sur l'analyse de redondance (e.g., Mazouz et al., 2014). Celle-ci a été appliquée aux matrices composées des indices climatiques (variables

indépendantes) et les deux indices de la variabilité des débits de 17 rivières (variables dépendantes) pendant la période 1950-2020. Il importe de noter qu'en raison des contraintes imposées par la structure matricielle des données, l'analyse de redondance n'a pas été appliquée pour analyser simultanément la relation entre les variables hydrologiques (CI et CV) et les variables climatiques (températures et précipitations). Il s'ensuit que les deux indices hydrologiques ont été corrélés séparément aux indices climatiques. Les séries corrélées étaient synchrones, c'est-à-dire que les séries des indices climatiques hivernaux étaient corrélées à celles des variables hydrologiques hivernales, etc.

La RDA est une méthode d'ordination multivariée sous contrainte combinant régression linéaire multiple et analyse en composantes principales (ACP). Elle identifie les axes canoniques qui maximisent la variance commune entre la matrice des variables réponses (CI et CV des 17 rivières) et la matrice des variables explicatives (indices climatiques AMO, AO, NAO, etc…). La significativité du modèle est évaluée par un test de permutation de Monte Carlo, qui ne requiert aucune hypothèse de normalité multivariée (Legendre et al., 2011 ; Braak, 1994). Les résultats sont représentés sous forme d'un diagramme (plan cartésien) canonique et les variables réponses ont été préalablement centrées et réduites pour assurer leur comparabilité (Legendre et Legendre, 2012). La matrice des variables dépendantes était composée de 17 colonnes (17 rivières) et de 50 lignes (nombre années d'observation). Celle des variables indépendantes était constituée de 8 colonnes (indices climatiques) et 50 lignes.

CHAPITRE II

RESULTATS

II.1. ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES MOYENNES SAISONNIÈRES DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS

II.1.1. Variabilité spatiale des moyennes saisonnières des coefficients d'immodération (CI)

Les moyennes saisonnières des indices d'immodération (CI) sont présentées aux figures 8 (hiver), 9 (printemps), 10 (été) et 11 (automne). Durant les quatre saisons, la variabilité spatiale de cet indice présente les mêmes caractéristiques. En effet, on note une différence significative entre les rivières, les saisons et les régions hydroclimatiques.

En ce qui concerne les rivières, en hiver, la plus faible valeur de l'indice appartient à la rivière Petite Nation (SW1) et la plus forte valeur, à la rivière Eaton (SE2). Au printemps, la plus faible valeur appartient à la même rivière mais la plus forte, à la rivière Beaurivage (SE5). En été, la plus faible valeur appartient aussi à la même rivière et la plus forte, à la rivière Nicolet du sud- ouest (SE3). Mais en automne, la plus faible valeur de l'indice appartient à la rivière Vermillon et la plus forte à la rivière Châteaugay (SE2).

Quant aux saisons, globalement, les valeurs moyennes les plus élevées de l'indice surviennent au printemps et en été alors que les plus faibles, en hiver et, dans une moindre mesure, en automne. Pour les régions hydroclimatiques, durant les quatre saisons, les plus faibles valeurs surviennent dans la région hydroclimatique du sud-ouest en rive nord et les valeurs les plus élevées en rive sud. Sur cette dernière rive, elles sont plus élevées au sud du 47°N (région hydroclimatique du sud-est) qu'au nord de ce parallèle (région hydroclimatique d'est). Toutes ces différences ont été confirmées par l'analyse de variance dont les résultats sont présentés au tableau 3 et le test post-hoc de Tukey appliqué aux différentes paires de rivières.

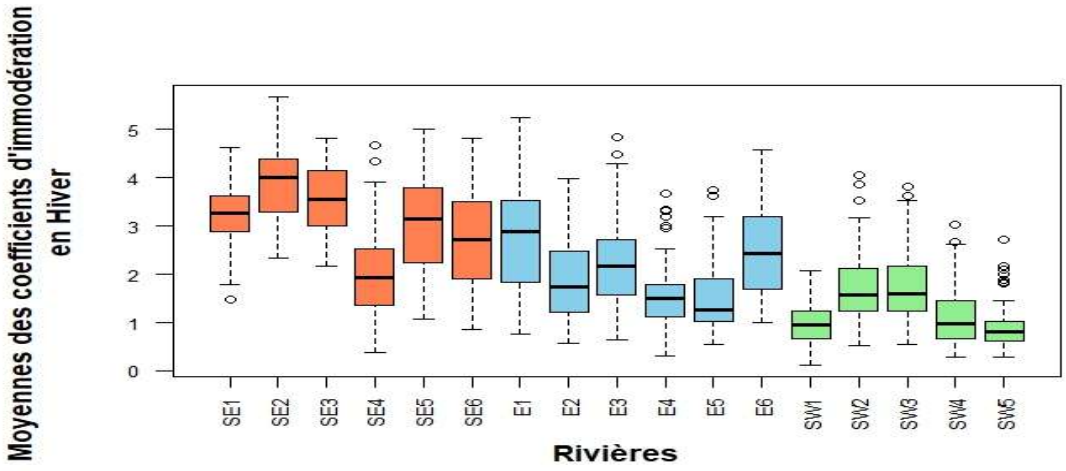


Figure 8. Comparaison des moyennes des coefficients d'immodération des rivières en hiver

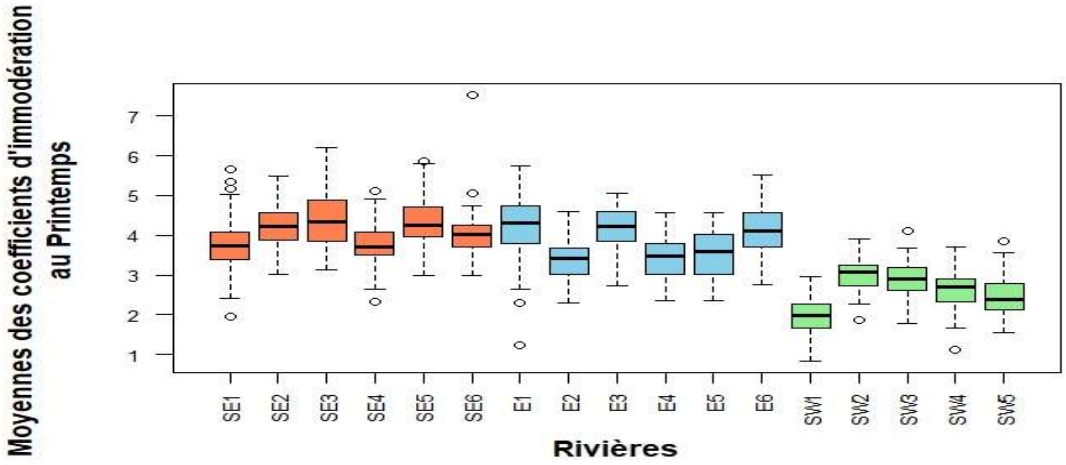


Figure 9. Comparaison des moyennes des coefficients d'immodération des rivières au printemps

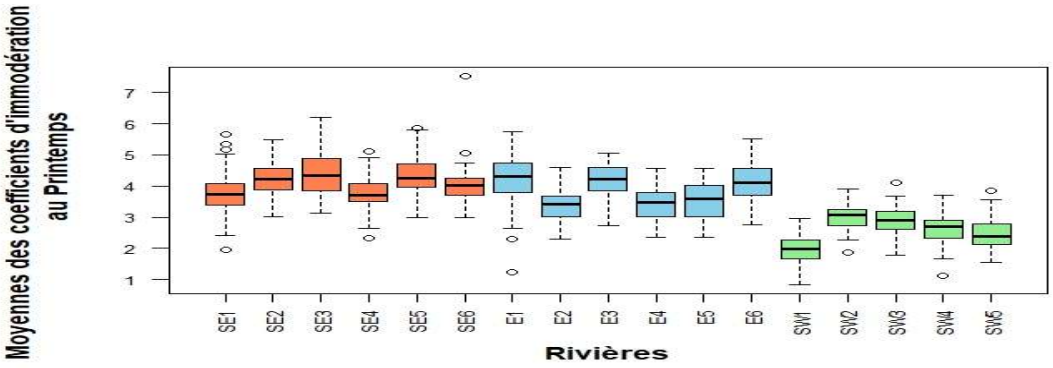


Figure 10. Comparaison des moyennes des coefficients d'immodération des rivières en été

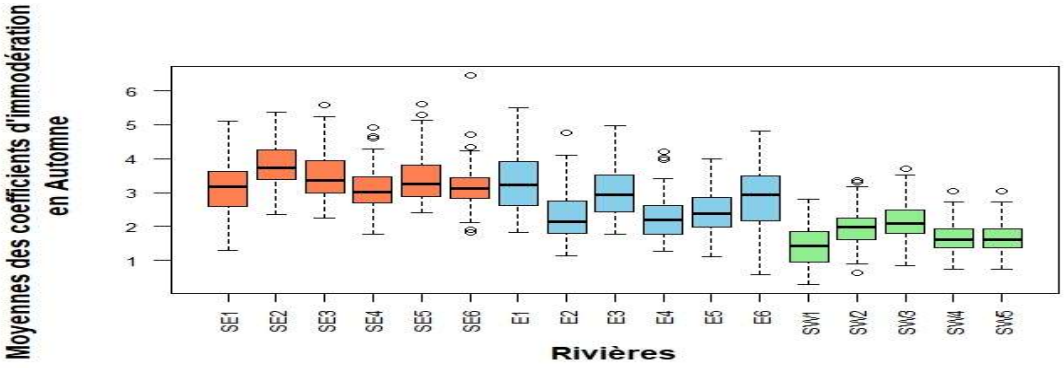


Figure 11. Comparaison des moyennes des coefficients d'immodération des rivières en automne

Tableau 3. Comparaison des moyennes saisonnières des coefficients d'immodération de 17 rivières pendant la période 1930-2020. Résultats de l'analyse de variance

Sources de variabilité	Nombre de degrés de liberté	Sommes des carrés	Moyennes des carrés	Statistique de Fisher	p-value
Rivières	16	2875,2466	179,7029103	350,648506	0,0000
Saisons	3	1117,7695	372,5898479	727,022579	0.0000
Années	69	204,3778	2,9619977	5,779651	0,0000
Résidus	4637	2376,4037	0,5124873	-	-

II.1.2. Variabilité spatiale des moyennes saisonnières des coefficients de variation (CV)

Les figures 12 (hiver), 13 (printemps), 14 (été) et 15 (automne) présentent les moyennes des coefficients de variation des débits journaliers saisonniers. La variabilité spatiale de cet indice est comparable à celle de CI déjà décrite. En effet, on observe aussi une différence significative des valeurs moyennes de cet indice entre les rivières, les saisons et les régions hydroclimatiques. Cette différence a été confirmée aussi par l'analyse de la variance (tableau 4).

En ce qui concerne les rivières, en hiver, la plus faible valeur de l'indice a été observée dans le bassin versant de la rivière Petite Nation (SW1) et la plus forte dans celui de la rivière Eaton (SE2). Au printemps, la plus faible valeur a été observée dans le premier bassin versant et la plus forte dans celui de la rivière Châteaugay (SE2). En été et en automne, la plus faible valeur fut observée dans le bassin versant de la rivière Nicolet du sud-ouest (SE3) et la plus forte dans celui de la rivière Châteaugay. Quant aux saisons, les valeurs les plus élevées ont été observées globalement au printemps et les plus faibles en hiver.

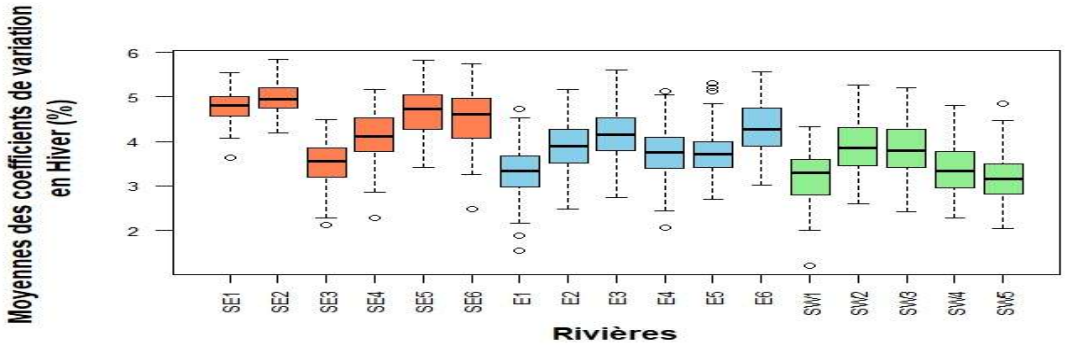


Figure 12. Comparaison des moyennes des coefficients de variation des rivières en hiver

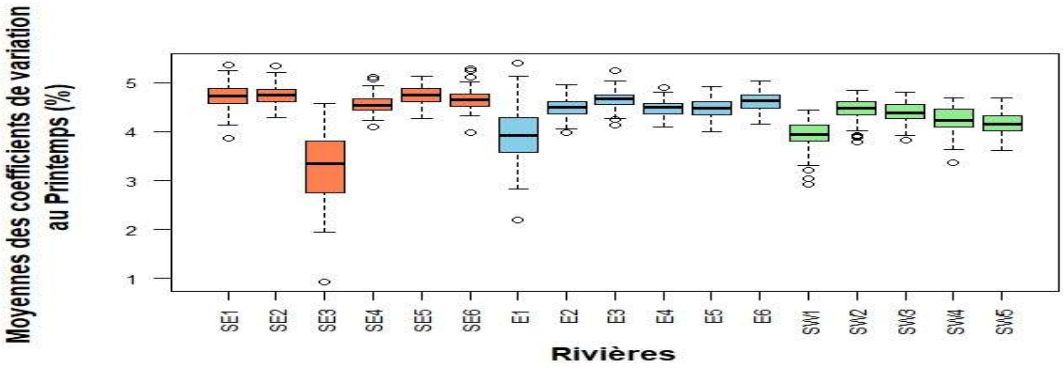


Figure 13. Comparaison des moyennes des coefficients de variation des rivières au printemps

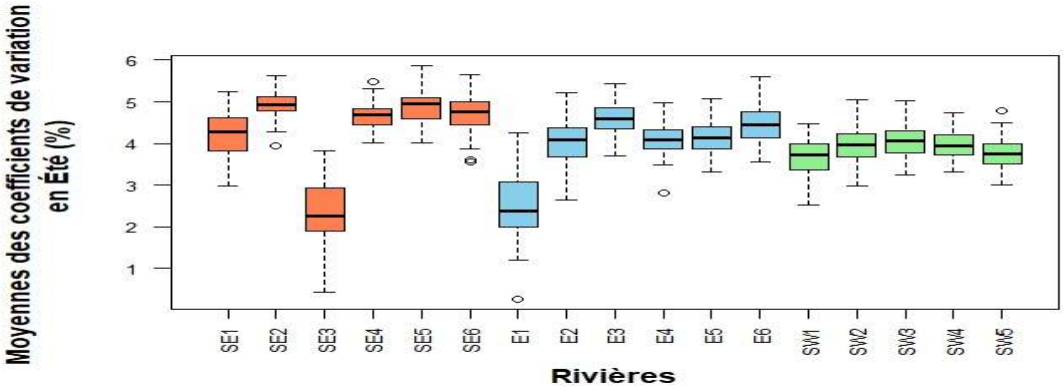


Figure 14. Comparaison des moyennes des coefficients de variation des rivières en été

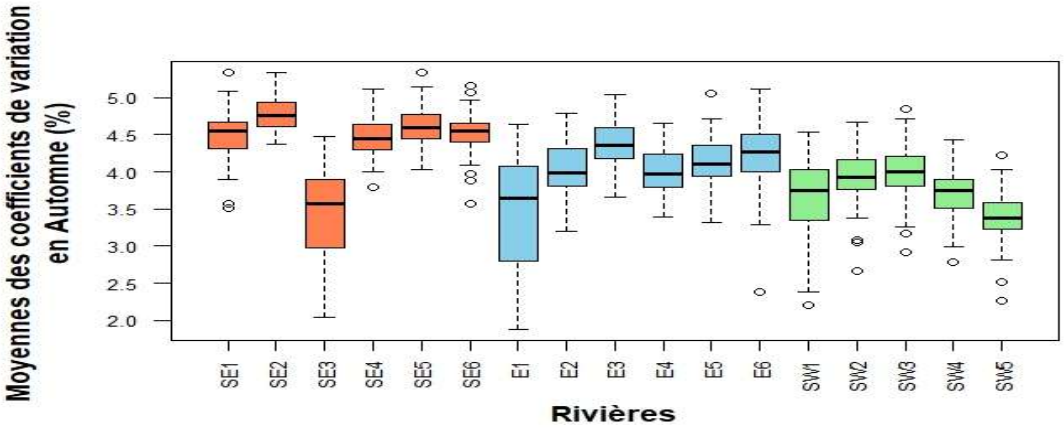


Figure 15. Comparaison des moyennes des coefficients de variation des rivières en automne

Tableau 4. Comparaison des moyennes saisonnières des coefficients de variation (1930-2020). Résultats de l'analyse de variance

Sources de variabilité	Nombre de degrés de liberté	Sommes des carrés	Moyennes des carrés	Statistique de Fisher	p-value
Rivières	16	1059,54410	66,2215060	288,619889	.0.0000
Saisons	3	124,95321	41,6510695	181,532070	0,0000
Années	69	61,33387	0,8888967	3,874168	0,0000
Résidus	4636	1063,69281	0,2294419	-	-

II.2. ANALYSE DE LA RELATION ENTRE LES MOYENNES SAISONNIÈRES DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS ET LES FACTEURS PHYSIO-CLIMATIQUES

II.2.1. Corrélation entre les moyennes saisonnières des coefficients d'immodération et les facteurs physio-climatiques

Le tableau 5 présente les valeurs des coefficients de corrélation entre les facteurs physio-climatiques et les moyennes saisonnières des coefficients d'immodération. En ce qui concerne les facteurs physiographiques, aucun n'est corrélé significativement aux moyennes saisonnières des coefficients d'immodération durant les quatre saisons. En hiver, les moyennes sont corrélées négativement à la superficie des bassins versants et à la longueur des cours d'eau. Au printemps, outre ces deux facteurs, elles sont corrélées aussi négativement aux superficies des milieux humides mais positivement aux superficies agricoles. En été, les moyennes sont corrélées seulement positivement à la densité de drainage. Enfin, en automne, elles sont corrélées seulement positivement aux superficies agricoles.

Quant aux facteurs climatiques, seules les précipitations totales sont corrélées positivement aux moyennes pendant les quatre saisons. Au printemps, elles sont en outre corrélées mais négativement aux coefficients d'immodération des températures moyennes saisonnières. En automne, elles sont corrélées positivement aux moyennes des températures moyennes journalières saisonnières.

Tableau 5. Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération (CI) et les facteurs physio-climatiques.

Facteurs	Hiver	Printemps	Été	Automne
Facteurs physiographiques				
Superficies des bassins versants (km²)	**-0,4459***	**-0,6024****	-0,2940	-0,3007
Densité de drainage (Km/Km)	-0,0132	0,3733	**0,5357****	0,3936
Pente moyenne des bassins versants (°)	-0,3914	**-0,4530***	-0,1137	-0,2404
Superficies des forêts (%)	-0,2691	0,2965	-0,2171	-0,3757
Superficies agricoles (%)	0,4124	**0,6101****	0,3884	**0,5171****
Superficies des milieux humides (%)	-0,3748	**-0,5817****	-0,2419	-0,3913
Longueur totale du cours d'eau (km)	**-0,5492**	**-0,4891**	-0,2757	-0,3618
Facteurs climatiques				
Moyennes des températures moyennes journalières saisonnières (°)	0,3494	0,2385	0,1705	**0,4608***
Coefficients d'immodération des températures moyennes journalières saisonnières (°)	0,2383	**-0,7016****	-0,3512	-0,2672
Moyennes des précipitations totales saisonnières (mm)	**0,6926****	**0,6410****	**0,5661****	**0,7404****
Coefficients d'immodération des précipitations totales saisonnières (mm)	-0,1650	-0,2320	-0,2168	-0,2315

** = Coefficients de corrélations significatifs au seuil de 5%; * = Coefficients de corrélations significatifs au seuil de 10%; Couleur rouge = corrélation positive; couleur bleue= corrélation négative.

II.2.2. Corrélation entre les moyennes saisonnières des coefficients de variation et les facteurs physio-climatiques

Les valeurs de coefficients de corrélation calculées entre les facteurs physio-climatiques et les moyennes saisonnières des coefficients de variation (CV) sont consignées dans le tableau 6. En ce qui concerne les facteurs physiographiques, les superficies agricoles sont corrélées significativement positivement aux moyennes durant trois saisons, à l'exception de la saison estivale. En hiver, elles sont aussi corrélées négativement à la superficie des forêts. En été, elles sont corrélées positivement à la densité de drainage des bassins versants. Quant aux facteurs climatiques, contrairement aux coefficients d'immodération, les précipitations totales sont corrélées positivement aux coefficients de variation seulement en hiver et en automne. Pour la première saison, ces coefficients sont corrélés aussi positivement aux moyennes des températures moyennes journalières saisonnières. Au printemps, ils deviennent significativement corrélés négativement aux coefficients de variation de ces mêmes températures. Enfin, en été, ils ne sont corrélés significativement à aucun facteur climatique contrairement aux coefficients d'immodération.

Tableau 6. Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation (CV) et les facteurs physio-climatiques.

Facteurs	Hiver	Printemps	Été	Automne
Facteurs physiographiques				
Superficies des bassins versants (km²)	-0,2212	-0,0890	-0,2940	-0,3007
Densité de drainage (Km/Km)	0,1769	0,3200	**0,5357****	0,3936
Pente moyenne des bassins versants (°)	-0,3675	-0,2495	-0,1137	-0,2404
Superficies des forêts (%)	**-0,5155****	-0,3852	-0,2171	-0,3757
Superficies agricoles (%)	**0,5607****	**0,4352***	0,3884	**0,5171****
Superficies des milieux humides (%)	-0,3188	-0,3623	-0,2419	-0,3913

Longueur totale du cours d'eau (km)	-0,3683	-0,1787	-0,2757	-0,3618
Facteurs climatiques				
Moyennes des températures moyennes journalières saisonnières (°)	**0,4857***	-0,0292	-0,0563	0,3156
Coefficients de variation des températures moyennes journalières saisonnières (°)	0,0238	**-0,6479****	-0,2337	-0,1769
Moyennes des précipitations totales saisonnières (mm)	**0,5846****	0,2117	0,4182	**0,6754****
Coefficients de variation des précipitations totales saisonnières (mm)	-0,3889	-0,1398	-0,2957	-0,2659

** = Coefficients de corrélations significatifs au seuil de 5%; * = Coefficients de corrélations significatifs au seuil de 10%. Couleur rouge = corrélation positive; couleur bleue= corrélation négative.

II.3. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS

II.3.1. Interprétation de la variabilité spatiale des moyennes des coefficients d'immodération (CI) des débits journaliers saisonniers

La comparaison des moyennes de deux indices de la variabilité des débits journaliers saisonniers a révélé trois niveaux de différence sur le plan spatial. Le premier niveau de différence concerne les rivières entre elles (test post-hoc de Tukey). Cependant, les facteurs physiographiques et climatiques analysés dans le cadre de cette étude ne

permettent pas d'expliquer clairement cette différence. Il importe de souligner que certains facteurs physiographiques qui influencent les débits minimums et maximums comme les caractéristiques géologiques des bassins versants n'ont pas pu être analysés en raison de l'absence de données. Il en est de même de l'humidité préalable des sols qui influencent à des degrés divers la genèse des crues au printemps, en été et en automne.

Le second niveau de différence a été observé entre les saisons. En effet, il ressort de cette étude que les deux indices de la variabilité des débits journaliers saisonniers sont systématiquement plus faibles en hiver que durant les trois autres saisons dans les trois régions hydroclimatiques. Ces faibles valeurs hivernales s'expliquent principalement par le stockage des précipitations sous forme de neige limitant ainsi tout processus de ruissellement de surface à l'origine des variations des niveaux d'eau dans les cours d'eau. De plus, en raison de ce stockage de précipitations sous forme de neige, les débits de rivières hivernaux proviennent principalement (si on exclut des épisodes de pluies générant le ruissellement de surface) des nappes aquifères dont les fluctuations journalières sont relativement lentes réduisant ainsi les variations inter-journalières des niveaux d'eau dans les rivières.

Le troisième niveau de différence s'observe entre les trois régions hydroclimatiques. Cette différence est surtout marquée entre les rivières de la région hydroclimatique du sud-ouest situées en rive nord et celles de la région hydroclimatique du sud-est situées en rive sud au sud du 47°N. Les rivières de la rive nord sont caractérisées par des coefficients d'immodération et de variation globalement plus faibles que ceux des rivières de la rive sud. Cette différence peut être expliquée par l'utilisation et le couvert des sols. En effet, les bassins versants de la région hydroclimatique du sud-est sont les bassins versants les plus agricoles au Québec. Ils sont ainsi dépourvus des milieux humides. Ceux-ci sont répandus en rive nord sur le Bouclier canadien. Il est en effet connu que les superficies agricoles favorisent le ruissellement de surface alors que les milieux humides ont tendance à l'inhiber en stockant l'eau en surface ou en profondeur (effet d'éponge) (e.g., Assani, 2022, 2024; Assani et al., 2023; Blanchette et al., 2019; Fossey et al., 2015; Fossey et Rousseau, 2016a, 2016b).

II.3.2. Interprétation des coefficients de corrélation entre les coefficients d'immodération (CI) et les facteurs physiographiques et climatiques

Pour déterminer l'influence d'autres facteurs susceptibles d'expliquer la variabilité spatiale des moyennes des indices de la variabilité des débits journaliers saisonniers, on a calculé les coefficients de corrélation entre les facteurs physiographiques et climatiques, dont les données étaient disponibles, et ces moyennes.

En ce qui concerne les coefficients d'immodération, leurs moyennes sont négativement corrélées aux superficies des bassins versants et à la longueur des cours d'eau en hiver et au printemps. Cette corrélation traduit la réaction plus rapide des petits bassins versants que celle des grands bassins versants aux processus de ruissellement de surface, qui influencent les niveaux d'eau des cours d'eau. Il importe de mentionner que la longueur des cours d'eau est fortement corrélée à la superficie des bassins versants. Plus un bassin versant est grand, long sera son cours d'eau principal. Il s'ensuit que la corrélation observée entre la longueur des cours d'eau et les moyennes des indices d'immodération est une simple covariation due à la taille des bassins versants. L'absence de corrélation entre les deux facteurs (superficie des bassins versants et longueur de cours d'eau) en été et en automne pourrait s'expliquer par la forte variabilité spatiale des épisodes orageux qui génèrent le ruissellement de surface. En effet, les pluies orageuses estivales et automnales peuvent varier beaucoup spatialement dans un même bassin versant peu importe sa taille. Cette variabilité spatiale de ces pluies résulte de celle des mouvements convectifs causés par le réchauffement différentiel des sols qui les génèrent. Outre ce facteur, la forte variabilité spatiale de l'évapotranspiration totale peut aussi expliquer cette absence de corrélation durant les deux saisons.

En été, les moyennes des coefficients d'immodération sont corrélées positivement à la densité de drainage. Les rivières ayant un réseau de drainage relativement dense sont caractérisées par des coefficients d'immodération relativement élevés en raison d'un acheminement rapide des eaux de ruissellement aux chenaux augmentant ainsi les pics de crues. Mais ce facteur semble jouer un rôle très négligeable en hiver, car le sol étant gelé, le ruissellement de surface peut se produire de manière quasi généralisée à l'échelle du bassin versant s'émancipant ainsi des réseaux de drainage.

Au printemps et en automne, les coefficients de corrélation sont relativement élevés (>0.35) mais non statistiquement significatifs au seuil de 5%. Durant ces deux saisons, les moyennes des coefficients d'immodération sont corrélées positivement aux superficies agricoles qui favorisent une réaction rapide aux processus de ruissellement de surface par la diminution de la perméabilité des sols. Quoique non statistiquement significatifs en hiver et en été, ces coefficients de corrélation sont relativement élevés (>0.35). Enfin, au printemps, les moyennes des coefficients d'immodération sont corrélées négativement aux superficies des milieux humides. En effet, ces milieux humides stockent les eaux de fonte de neige et de pluies retardant ainsi les processus de ruissellement de surface en écrêtant les pics de crues (e.g., Assani, 2022; Assani et al., 2023) mais en augmentant la magnitude des débits minimums. Il en résulte ainsi un faible écart entre les débits maximums et minimums (faibles valeurs des coefficients d'immodération).

Quant aux facteurs climatiques, les moyennes des coefficients d'immodération sont corrélées positivement aux températures moyennes journalières saisonnières en automne. Cette corrélation positive traduit tout simplement l'influence des températures sur la nature physique des précipitations durant cette saison. Si les températures saisonnières sont élevées en automne, les précipitations tombent principalement sous forme de pluie générant ainsi un ruissellement de surface important avec conséquence des pics de crues relativement élevés. En revanche, si les températures saisonnières sont basses, les précipitations automnales (novembre à décembre) tomberont principalement sous forme de neige inhibant ainsi les processus de ruissellement de surface avec comme conséquence des pics de crues relativement modestes.

Au printemps, les moyennes des coefficients d'immodération sont corrélées négativement aux coefficients d'immodération des températures moyennes journalières saisonnières. Rappelons que les coefficients d'immodération mesurent l'écart des températures extrêmes (maximums et minimums). Les bassins versants qui sont caractérisés par des faibles écarts des températures extrêmes ont des coefficients d'immodération relativement élevés et, inversement, ceux qui sont caractérisés par des grands écarts de températures ont des faibles coefficients d'immodération des débits journaliers saisonniers. Les bassins versants de la rive nord (région hydroclimatique du

sud-ouest), caractérisés par un climat de type tempéré continental, ont des écarts des températures extrêmes printanières (amplitudes thermiques) plus grands que ceux des bassins versants de la rive sud (région hydroclimatiques du sud-est et d'est), caractérisés par un climat tempéré moins continental (maritime et mixte). Ainsi, les coefficients d'immodération des débits journaliers printaniers sont plus faibles en rive nord qu'en rive sud. C'est ce qui explique une corrélation négative entre les coefficients d'immodération des débits journaliers et ceux des températures moyennes journalières printanières.

Cette relation semble s'atténuer durant les trois autres saisons. Enfin, durant les quatre saisons, les moyennes des coefficients d'immodération des débits journaliers sont corrélées positivement aux précipitations totales. Les bassins versants de la rive sud reçoivent plus des précipitations soit sous forme de pluies (région hydroclimatique du sud-est) soit sous forme de neige (région hydroclimatique d'est) que ceux de la rive nord (région hydroclimatique du sud-ouest). C'est ce qui explique cette corrélation positive. Elle traduit aussi l'importance des pics de crues générés par ces précipitations printanières. De fait, les pics de crues printanières sont plus élevés en rive sud qu'en rive nord (e.g., Anctil *et al.,* 1998; Assani *et al.,* 2023).

II.3.3. Interprétation des coefficients de corrélation entre les coefficients de variation (CV) et les facteurs physiographiques et climatiques

Les coefficients de variation sont corrélés presque aux mêmes facteurs physiographiques et climatiques que les coefficients d'immodération. En été, ils sont corrélés positivement aux densités de drainage des bassins versants. Comme on l'a déjà mentionné, un réseau de drainage relativement dense facilite le transfert rapide des eaux de ruissellement de surface des versants vers les vallées lors des épisodes pluvieux ou lors de la fonte de neige provoquant ainsi une variation rapide des niveaux dans les chenaux.

En hiver, ils sont corrélés négativement aux superficies forestières mais positivement aux superficies agricoles. Il faut préciser tout de suite que ces deux facteurs varient spatialement dans le sens inverse. En effet, les bassins versants les plus agricoles possèdent les plus faibles superficies forestières comparativement aux bassins versants les moins agricoles. L'influence de la superficie agricole sur la variation des niveaux d'eau dans les chenaux a été déjà décrite en détail au point consacré aux coefficients

d'immodération. Notons par ailleurs que l'agriculture, en réduisant la perméabilité du sol, favorise le ruissellement de surface, c'est-à-dire une réponse relativement rapide des cours d'eau aux épisodes pluvieux et à la fonte de neige. Quant aux forêts, leur influence sur les débits journaliers hivernaux n'est pas documentée au Québec. Précisons qu'en hiver, au Québec, les débits proviennent presqu'exclusivement des nappes aquifères, hormis des épisodes de pluies. Cependant, il n'existe aucun lien bien établi entre les forêts et les nappes aquifères en hiver contrairement à la saison estivale. On peut donc considérer que la corrélation positive observée entre les coefficients de variation et les superficies forestières est due tout simplement au fait que les bassins versants les plus agricoles possèdent moins de superficies forestières. Ainsi, cette corrélation négative ne doit pas être interprétée comme un lien de causalité mais plutôt un lien de covariation associé aux superficies agricoles. C'est ce dernier facteur qui est corrélé positivement aux coefficients de variation en hiver, au printemps et en automne. En été, la valeur du coefficient de corrélation reste, malgré tout, élevée (>0.38) même si elle n'est pas statistiquement significative.

En ce qui concerne les facteurs climatiques, en hiver, contrairement aux coefficients d'immodération, les coefficients de variation sont corrélés positivement aux températures moyennes journalières. Cette corrélation positive est aussi observée avec les précipitations totales aussi bien en hiver qu'en automne. Les différences climatiques entre la rive nord (climat tempéré continental) et la rive sud (climat tempéré mixte et maritime) expliquent aussi ces corrélations positives. Il en est de même de la corrélation négative observée entre les coefficients de variation des débits journaliers et les coefficients de variation des précipitations totales au printemps. Il convient de mentionner qu'en hiver, les températures journalières sont globalement plus élevées en rive sud au sud du 47°N (région hydroclimatique du sud-est) qu'en rive nord (région hydroclimatique du sud-ouest). Enfin, au printemps, les coefficients de variation des débits journaliers sont corrélés négativement aux coefficients de variation des températures journalières. En raison de son caractère climatique plus continental, la rive nord (région hydroclimatique du sud-ouest) connaît une variation inter-journalière plus forte de la température que la rive sud. Néanmoins, ce facteur ne semble se manifester qu'au printemps. Durant les trois

autres saisons, la corrélation calculée entre les coefficients de variation des débits journaliers et ceux des températures journalières n'est pas statistiquement significative.

En conclusion, la variabilité spatiale des moyennes des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV) est principalement influencée par les différences de l'utilisation des sols (agriculture versus milieux humides) et des caractéristiques climatiques (continentalité versus maritime) entre la rive nord (région hydroclimatique du sud-ouest) et la rive sud (région hydroclimatique du sud-est en particulier).

CHAPITRE III

RÉSULTATS

VARIABILITÉ TEMPORELLE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS

III.1. RELATION ENTRE LES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS ET LA MAGNITUDE DES DÉBITS MAXIMUMS, MOYENS ET MINIMUMS JOURNALIERS SAISONNIERS

Notons que les coefficients d'immodération sont influencés par la magnitude des débits maximums et minimums journaliers d'une part, et les coefficients de variation par la magnitude de tous les débits journaliers incluant celle des débits maximums et minimums, d'autre part. Afin de déterminer lesquels de ces débits influencent principalement la variabilité temporelle des coefficients d'immodération et de variation, on a ainsi corrélé ces deux coefficients aux magnitudes des débits maximums, moyens et minimums journaliers saisonniers.

En ce qui concerne les coefficients d'immodération, les coefficients de corrélation calculés entre cet indice et la magnitude des débits maximums et minimums journaliers sont présentés au tableau 7. Il ressort de ce tableau que les coefficients d'immodération sont majoritairement et principalement corrélés positivement à la magnitude des débits maximums journaliers saisonniers en hiver, en été et en automne. En hiver, les valeurs de ces coefficients de corrélation sont globalement plus élevées en rive nord qu'en rive sud. En revanche, au printemps, les coefficients d'immodération sont majoritairement et principalement corrélés négativement aux débits minimums journaliers saisonniers. Il importe de noter que les coefficients d'immodération de plusieurs rivières de la rive sud (région hydroclimatique du sud-est et d'est) sont corrélés négativement aux débits minimums journaliers en automne.

Tableau 7. Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients d'immodération (CI) et la magnitude des débits maximums et minimums journaliers saisonniers pendant la période 1950-2023.

Rivières	Hiver		Printemps		Été		Automne	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Région hydroclimatique du sud-est								
SE1	**0,609***	**-0,588***	**0,456***	**-0,490***	**0,785***	-0,129	0,371	-0,330
SE2	0,119	**-0,500***	0,148	**-0,446***	0,328	-0.267	**0,561***	**-0,437***
SE3	**0,743***	-0,038	**0,462***	**-0,620***	0,395	-0,355	**0,479***	**-0,549***
SE4	**0,733***	-0,170	**0,491***	**-0,645***	**0,648***	-0,272	**0,785***	-0,435*
SE5	**0,858***	-0,187	0,269	**-0,677**	**0,524***	-0,082	**0,536***	**-0,521***
SE6	**0,891***	-0,187	0,338	-0.319	**0,771***	-0,082	0,1254	-0,3601
Région hydroclimatique de l'Est								
E1	**0,804***	-0,377	**0,589***	**-0,670***	**0,409***	-0,252	**0,569***	**-0,551***
E2	**0,360***	-0,351	0,376	-0,394	**0,581***	-0,251	0,360	-0,351
E3	**0,892***	-0,137	**0,456***	**-0,713***	**0,711***	-0,082	**0,528***	**-0,437***
E4	**0,915***	-0,216	**0,421***	**-0,709***	**0,543***	-0,206	0,387	**-0,407***
E5	**0.919***	-0,124	**0,491***	**-0,756***	**0,705***	-0,254	**0,818***	-0,276
E6	**0,720***	-0,208	0,376	-0,330	**0,593***	-0,089	**0,552***	-0,175
Région Hydroclimatique du sud-ouest								
SW1	**0,763***	-0,188	**0,475***	**-0,624**	0,178	**-0,427***	0,395	**-0,456***
SW2	**0,950***	-0,193	**0,551***	-0,371	**0,849**	**-0,477***	**0,692***	-0,291
SW3	**0,943***	-0,070	**0,547***	**-0,647**	**0,756**	-0,237	**0,527***	-0,395
SW4	**0,909***	-0,049	**0,467***	**-0,671**	**0,646**	-0,357	**0,531***	-0,340
SW5	**0,960***	0,058	**0,482***	**-0,573**	**0,532**	-0,336	**0,602***	-0,281

Les valeurs des coefficients de corrélation significatives au seuil de 5% apparaissent en gras et en couleur. Couleur rouge : coefficient de corrélation positif; couleur bleue : coefficient de corrélation négatif. Max = débits maximums journaliers saisonniers; Min = débits minimums journaliers saisonniers; Moy = débits moyens journaliers saisonniers.

Quant aux coefficients de variation, ils sont majoritairement et principalement corrélés aux débits maximums durant les quatre saisons (tableau 8). Mais contrairement aux coefficients d'immodération, les coefficients de variation ne sont pas corrélés négativement aux débits minimums.

Tableau 8. Coefficients de corrélation calculés entre les coefficients de variation (CV) et la magnitude des débits maximums, minimums et moyens journaliers saisonniers pendant la période 1950-2023.

Rivières	Hiver			Printemps			Été			Automne		
	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy
Région Hydroclimatique du sud-est												
SE1	-0,205	-0,372	-0,130	**0,623***	-0,299	0,143	**0,827***	0,072	**0,586***	**0,585***	-0,062	0,233
SE2	**0,539***	-0,256	-0,267	**0,628***	-0,248	-0,020	**0,671***	-0,130	0,305	**0,736***	-0,053	0,227

SE3	**0,665***	-0,213	0,122	**0.488***	-0,166	**0,589***	**0,589***	-0,095	0,243	**0,614***	-0,341	0.062
SE4	-0,076	-0,180	0,355	-0.266	-0,090	**0,647***	**0,648***	-0,286	0,183	**0,731***	**-0,441***	0.050
SE5	**0,837***	-0,047	0,397	**0.681***	-0,195	-0,037	**0,514***	-0,240	0,120	**0,667***	**-0,413***	0.127
SE6	**0,845***	-0,1130	0,315	-0.063	-0,120	**0,754***	**0,754***	-0,017	0,325	**0,765***	-0.160	0.044
Région hydroclimatique d'Est												
E1	**0,680***	**-0,400***	0,264	**0,774***	**-0,451***	-0,160	**0,697***	-0,164	0,216	**0,687***	-0,394	0,162
E2	**0,693***	-0,166	0,317	**0,685***	-0,179	0,184	**0,821***	0,092	**0,488***	**0,693***	-0,166	0,316
E3	**0,774***	-0,175	**0,443***	**0,645***	-0,269	0,070	**0,630***	0,311	**0.692***	**0,692***	-0,230	0,331
E4	**0,881***	-0,164	**0,478***	**0.662***	-0,321	0,038	**0,578***	-0,166	0,139	**0,537***	-0,266	0,217
E5	0,143	**0,819***	**0,727***	-0,174	**0,937***	0,325	0,290	**0,951***	**0,761***	0,130	**0,905***	**0,629***
E6	**0,656***	-0,246	0,209	**0,475***	-0,052	0,231	**0,711***	0,070	**0,463***	**0,545***	-0,039	0,393
Région Hydroclimatique du sud-ouest												
SW1	0,086	-0,098	0,349	**0,631***	**-0,409***	0,255	0,344	**-0,533***	-0,162	0,026	**-0,440**	-0,156
SW2	-0,036	-0,059	**0,579***	**0,594***	-0,020	**0,771***	**0,771***	**-0,425***	0,042	**0,723***	-0,215	0,299
SW3	**0,917***	0,031	**0,611***	**0,612***	-0,318	**0,697***	**0,697***	-0,207	0,123	**0,710***	-0,101	0,336
SW4	**0,939***	0,098	**0,581***	**0,620***	-0,373	**0,614***	**0,614***	-0,351	0,061	**0,571***	-0,233	0,175
SW5	**0,925***	0,062	**0,529***	**0,550***	-0,271	0.104	**0,416***	**-0,461***	-0,064	**0,705***	-0,073	0,366

Les valeurs des coefficients de corrélation significatives au seuil de 5% apparaissent en gras et en couleur. Couleur rouge : coefficient de corrélation positif; couleur bleue : coefficient de corrélation négatif. Max = débits maximums journaliers saisonniers; Min = débits minimums journaliers saisonniers; Moy = débits moyens journaliers saisonniers.

III.2. TENDANCE À LONG TERME DE LA VARIABILITÉ TEMPORELLE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS

III.2.1. Tendance à long terme de la variabilité temporelle des coefficients d'immodération (CI)

Le tableau 9 présente les résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux coefficients d'immodération en hiver et au printemps et les figures 16, 17 et 18 présentent la variabilité temporelle des coefficients d'immodération dans les trois régions hydro-climatiques durant cette saison en hiver. En hiver, on observe une hausse significative quasi généralisée de ces coefficients, à l'exception de quatre rivières situées toutes en rive sud. Au printemps, on observe aussi la même tendance à la hausse des coefficients d'immodération (figure 18). Mais elle est moins généralisée qu'en hiver. Dans la région hydroclimatique la plus agricole du sud-est par exemple, une seule rivière (rivière Beaurivage) est caractérisée par cette tendance à la hausse (tableau 9). Les figures de la tendance à long terme des deux autres régions hydroclimatiques sont présentées en annexe.

En été, la tendance à long terme est significativement différente de celle observée durant les deux saisons précédentes, en particulier dans la région du sud-est (tableau 10). Dans cette dernière région, cette tendance à long terme devient négative,

c'est-à-dire que les moyennes des coefficients d'immodération diminuent globalement dans le temps (figure 18). Quant à la région hydroclimatique d'est en rive sud, une seule rivière (rivière Matane) est caractérisée par une tendance à long terme à la hausse (tendance positive). C'est seulement dans la région du sud-ouest, en rive nord, que toutes les rivières sont affectées par une hausse significative (tendance positive) des coefficients d'immodération dans le temps. En automne, la majorité des rivières des régions hydroclimatiques du sud-ouest et d'est sont caractérisées par une tendance à long terme à la hausse (tendance significative positive). En revanche, dans la région hydroclimatique du sud-est, cette tendance à la hausse n'est observée que pour une seule rivière (rivière Châteaugay). Les figures de la tendance à long terme en été et en automne sont présentées en annexe.

Tableau 9. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux indices des coefficients d'immodération (CI) en hiver et au printemps pendant la période 1930-2023.

	Hiver						Printemps					
Rivières	MK		STP		LTP		MK		STP		LTP	
	Z	P-values	Z	P-values		P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values
Région hydroclimatique du sud-est												
SE1	**2,3281****	**0,0199**	**2,0731****	**0,0382**	1,5992	0,1098	-0,6413	0,5213	-0,7832	0,4335	-0,6726	0,5058
SE2	0,5829	0,5600	0,3730	0,7092	0,3860	0,6995	-0,4505	0,6523	-0,5646	0,5724	-0,4315	0,6711
SE3	**-1,8054***	**0,0710**	**-1,7542**	**0,0794**	-1,4524	0,1480	-0,8045	0,4211	-0,6668	0,5049	-0,8236	0,4141
SE4	**2,6260****	**0,0086**	**2,5265****	**0,0115**	**2,6436****	**0,0082**	0,6771	0,4858	0,4784	0,6324	0,7986	0,4245
SE5	**2,8529****	**0,0043**	**2,8508****	**0,0044**	**2,8550****	**0,0043**	**-3,8167****	**0,0001**	**-3,4131****	**0,0006**	**-3,4680****	**0,0005**
SE6	**2,8021****	**0,0051**	**2,8315****	**0,0046**	**2,5641****	**0,0103**	0,6971	0,4858	0,4784	0,6324	0,7986	0,4245
Région hydroclimatique d'Est												
E1	**4,2845****	**0,0000**	**4,0474****	**0,0001**	**2,9122****	**0,0036**	**5,4161****	**0,0000**	**5,3547****	**0,0000**	**5,0183****	**0,0000**
E2	0,8922	0,3723	0,5706	0,5683	0,5405	0,5888	-0,0592	0,9528	-0,2162	0,8289	-0,0356	0,9746
E3	**2,5024****	**0,0123**	**2,4842****	**0,0130**	**2,0293****	**0,0424**	**2,7603****	**0,0058**	**2,5268****	**0,0115**	**2,2183****	**0,0265**
E4	**4,3426****	**0,0000**	**4,1640****	**0,0000**	**2,6886****	**0,0072**	0,9271	0,3539	1,1163	0,2643	0,9702	0,3319
E5	**2,8718****	**0,0041**	**2,9308****	**0,0034**	**2,7755****	**0,0055**	**3,0322****	**0,0024**	**3,1221****	**0,0019**	**4,4962****	**0,0000**
E6	0,3991	0,6898	0,0268	0,9788	0,3288	0,7423	**2,9093****	**0,0036**	**2,7821****	**0,0054**	**2,8476****	**0,0044**
Région hydroclimatique du sud-ouest												
SW1	**3,1019****	**0,0019**	**2,867****	**0,0041**	**2,5421****	**0,0110**	**2,4188****	**0,0156**	**2,2078****	**0,0273**	**2,3922****	**0,0167**
SW2	**3,4127****	**0,0006**	**3,3266****	**0,0009**	**2,8633****	**0,0042**	0,8009	0,4232	0,6235	0,5330	0,5909	0,5546
SW3	**3,2134****	**0,0013**	**2,9308****	**0,0034**	**3,2695****	**0,0011**	**2,4048****	**0,0162**	**2,2787****	**0,0227**	**2,1549****	**0,0312**
SW4	**3.4343****	**0,0006**	**3,2012****	**0,0014**	**4,4305****	**0,0000**	**1,6571***	**0,0975**	**1.671***	**0,0947**	0,9575	0,3383
SW5	**2,5268****	**0,0115**	**2,7283****	**0,0064**	**3,0614****	**0,0022**	0,5019	0,6158	0,6414	0,5221	0,3242	0,7458

** = valeurs de Z significatives au seuil de 5%; * = valeurs de Z significatives au seuil de 10%. Rouge : tendance positive; bleue : tendance négative. MT = Test originel de Mann-Kendall; STP = Test de Mann-Kendall modifié à persistance à court terme; LTP = test de Mann-Kendall modifié à persistance à long-terme.

Tableau 10. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux indices des coefficients d'immodération (CI) en été et en automne pendant la période 1930-2023.

	Été						Automne					
Rivières	MK		STP		LTP		MK		STP		LTP	
	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values
Région hydroclimatique du sud-est												
SE1	**3,9941****	**0.0001**	**3,9514****	**0,0001**	**3,3860****	**0,0007**	**2,9166****	**0,0035**	**2,8725****	**0,0041**	**2,5674****	**0,0102**
SE2	1,0776	0.2812	1,5324	0,1254	0,7811	0,4347	-0,0073	0,9941	-0,1567	0,8755	-0,0130	0,9948
SE3	**-1,9169***	**0.0553**	**-1,7471***	**0,0806**	**-2,7318****	**0,0065**	-0,4217	0,6732	-1,0128	0,3112	-0,3363	0,7406
SE4	**-2,3003****	**0.0214**	**2,3637****	**0,0181**	-1,5947	0,1119	-1,2581	0,2084	-1,2002	0,2301	-0,5481	0,5857
SE5	**-4,1753****	**0.0000**	**-4,1569****	**0,0000**	**-4,9434****	**0,0000**	**-1,8534***	**0,0638**	-1,6038	0,1088	-1,1203	0,2644
SE6	**-2,3142****	**0.0207**	**-2,5835****	**0,0098**	-1,5220	0,1291	0,1524	0,8789	-0,1189	0,9053	0,1034	0,9177
Région hydroclimatique d'Est												
E1	0,3416	0,7327	0,3934	0,6940	0,1974	0,8435	1,3573	0,1747	1.7408	0,0817	0,6651	0,5060
E2	-0,7877	0,4309	-0,8541	0,3931	-0,3246	0,7476	0,7407	0.4580	0,9623	0,3359	0,5749	0.5654
E3	0,5507	0,5819	0,0602	0,9520	0,3575	0,7207	**2,4204****	**0.0155**	**2,0940****	**0,0363**	**1,7224***	**0,0850**
E4	**2,0981****	**0,0359**	**1,8109***	**0,0702**	1,1286	0,2591	**2,6756****	**0.0075**	**2,4256****	**0,0153**	**1,5376**	**0,1242**
E5	0,1394	0,8891	-0,0319	0,9746	0,1192	0,9051	**3,5474****	**0.0004**	**3,2977****	**0,0010**	**2,7701****	**0,0056**
E6	1,6038	0,1088	1,1121	0,2661	0,6430	0,5202	**1,7232***	**0.0849**	**1,7577***	**0,0788**	0,8479	0,3965
Région hydroclimatique du sud-ouest												
SW1	**2,6349****	**0,0084**	**2,6827****	**0,0073**	**2,5002****	**0,0124**	**3,6112****	**0,0003**	**3,4779****	**0,0005**	**2,6294****	**0,0086**
SW2	**5,8296****	**0,0000**	**5,4314****	**0,0000**	**4,8959****	**0,0000**	**2,6274****	**0,0086**	**2,5076****	**0,0122**	**3,7756****	**0,0002**
SW3	**2,8300****	**0,0047**	**2,7536****	**0,0059**	**1,9196***	**0,0549**	**2,0590****	**0,0395**	**1,8633***	**0,0624**	1,3033	0,1925
SW4	**2,6139****	**0,0090**	**2.4468****	**0,0144**	1,3280	0,1842	**3,5667****	**0,0004**	**3,1844****	**0,0015**	**1,9143***	0,0555
SW5	-0,5576	0,5771	-0,4075	0,6836	-0,3987	0,6937	**2.1582****	**0,0309**	**1,8201***	**0,0687**	1,5078	0,.1317

** = valeurs de Z significatives au seuil de 5%; * = valeurs de Z significatives au seuil de 10%. Rouge : tendance positive; bleue : tendance négative. MT = Test originel de Mann-Kendall; STP = Test de Mann-Kendall modifié à persistance à court terme; LTP = test de Mann-Kendall modifié à persistance à long-terme.

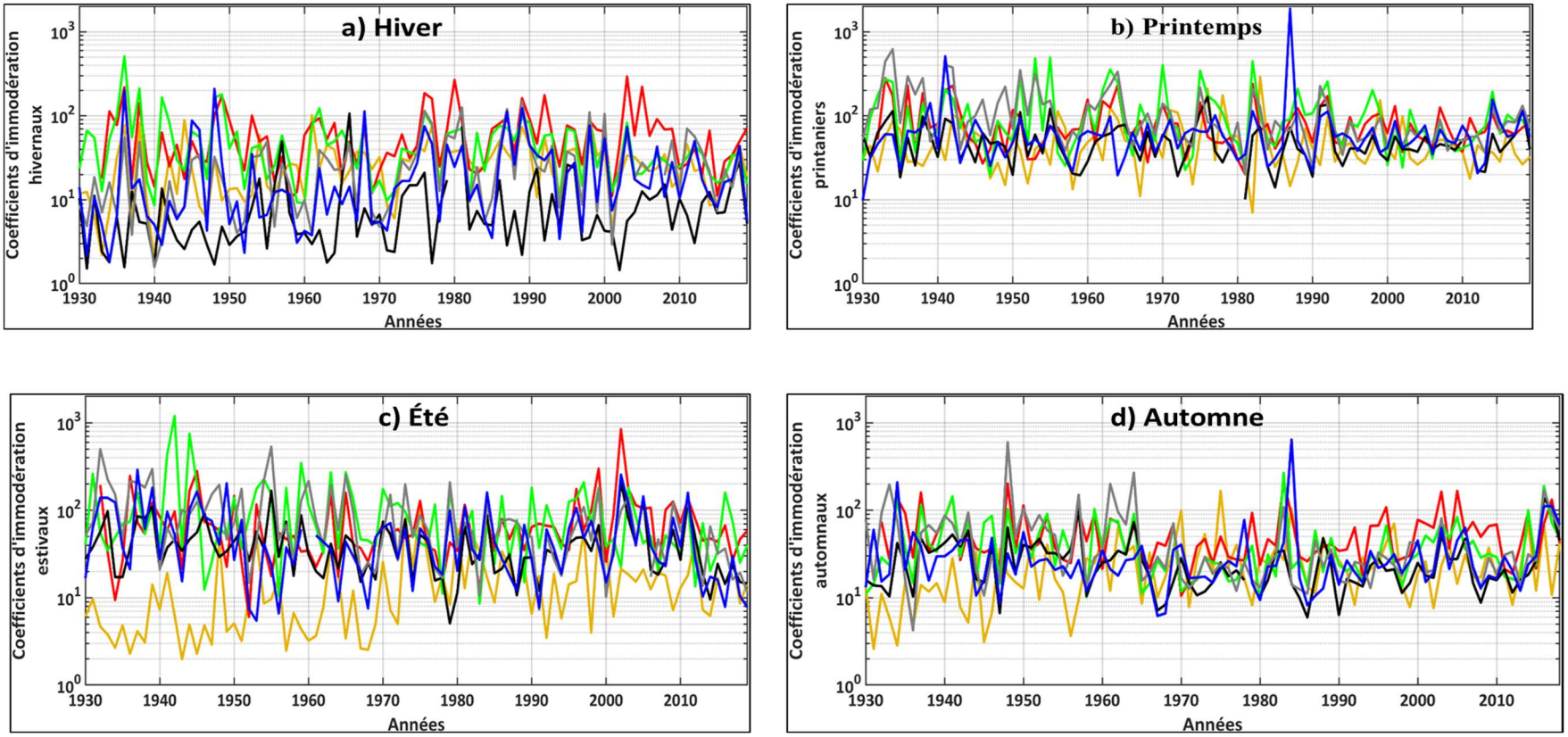


Figure 16. Variabilité temporelle des coefficients d'immodération (a) hivernaux, (b) printaniers, (c) estivaux et (d) automnaux dans la région hydroclimatique du sud-est (1930-2020). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage bleu ; rivière Du Sud : gris.

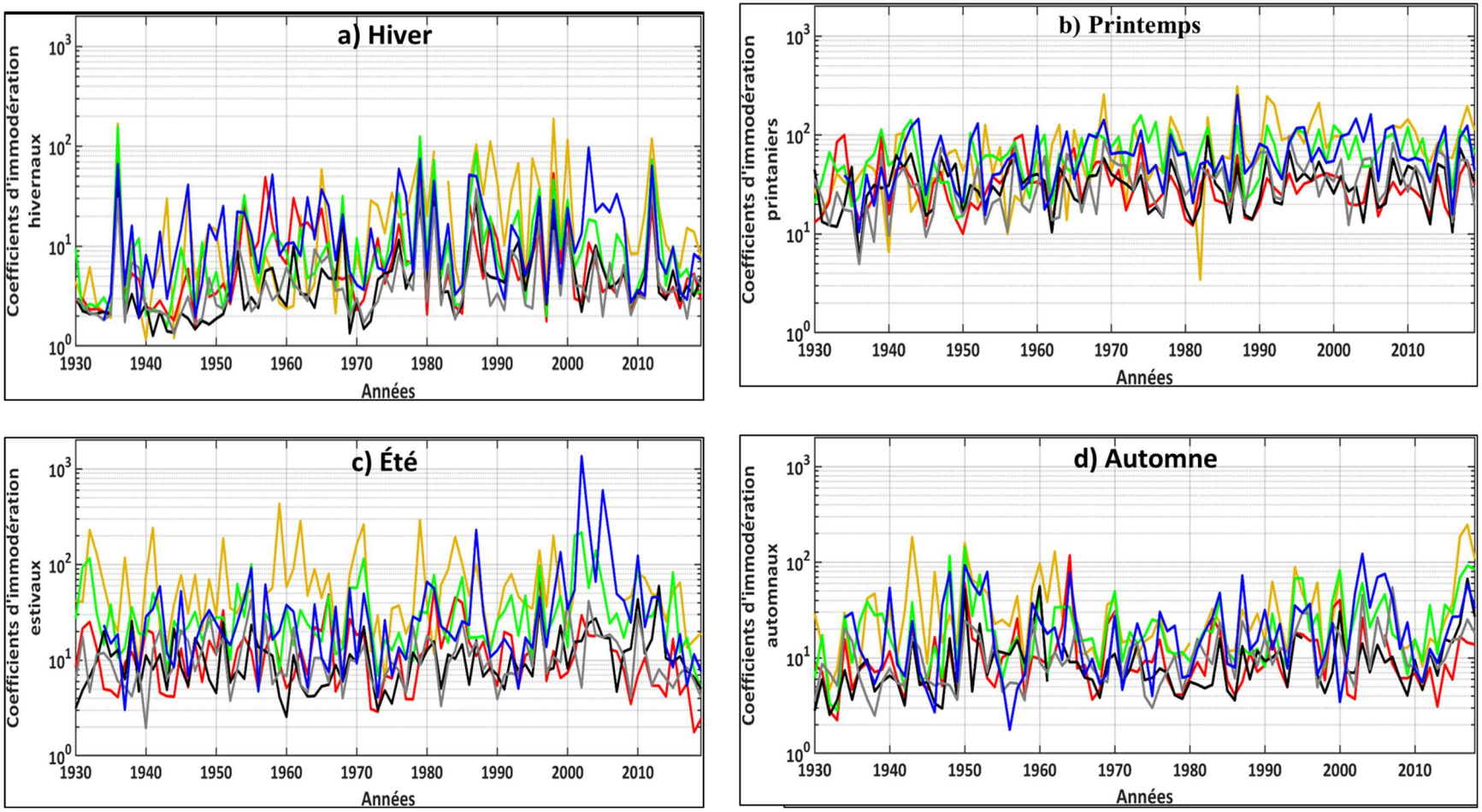


Figure 17. Variabilité temporelle des coefficients d'immodération (a) hivernaux, (b) printaniers, (c) estivaux et (d) automnaux dans la région hydroclimatique d'est (1930-2020). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Matane : gris ; rivières Beaurivage : bleu

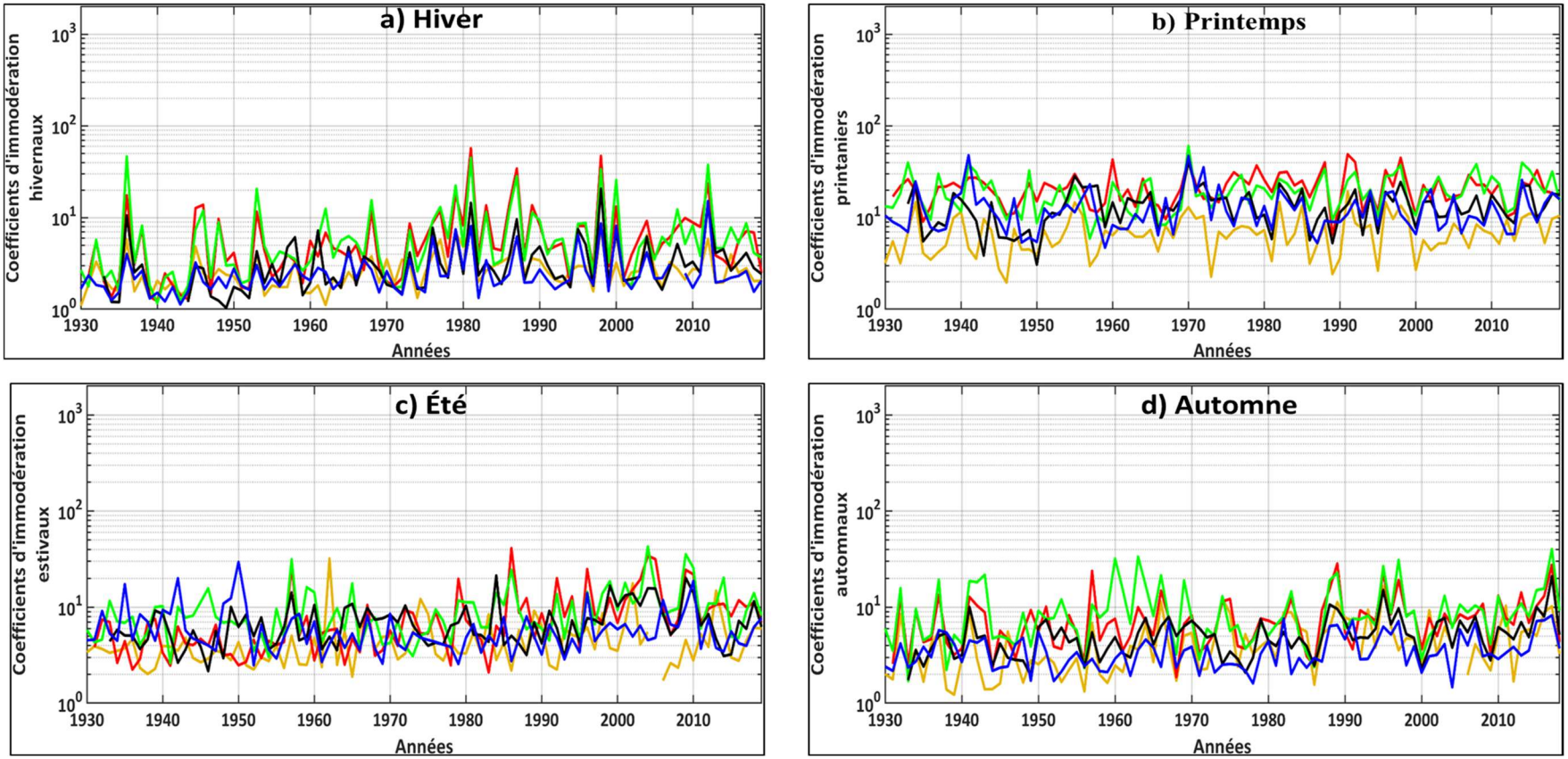


Figure 18. Variabilité temporelle des coefficients d'immodération (a) hivernaux, (b) printaniers, (c) estivaux et (d) automnaux dans la région hydroclimatique du sud-ouest (1930-2020). Rivière Petite Nation : bleu ; rivière Du Nord : rouge ; rivière L'Assomption : gris ; rivière Matawin : jaune ; rivière Vermillon : noir

III.2.2. Tendance à long terme de la variabilité temporelle des coefficients de variation (CV)

Les résultats de trois tests de Mann-Kendall sont consignés dans le tableau 11 pour l'hiver et le printemps. En hiver, contrairement aux coefficients d'immodération, c'est environ la moitié des rivières qui sont caractérisées par une tendance à la hausse des coefficients de variation (figures 19, 20 et 21). Néanmoins, presque toutes les rivières de la région hydroclimatique du sud-ouest en rive nord sont affectées par cette tendance. Au printemps, cette tendance à la hausse devient plus généralisée aussi pour les rivières de la région hydroclimatique d'est en rive sud. Quant à la région hydroclimatique du sud-est, seulement un de trois tests appliqués révèle cette tendance à la hausse. En été et en automne (tableau 12), cette tendance à la hausse se maintient seulement dans la région hydroclimatique du sud-ouest. Toutefois, en automne, un seul de trois tests révèle aussi cette tendance dans la région hydroclimatique d'est.

Tableau 11. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux indices des coefficients de variation (CV) en hiver et au printemps pendant la période 1930-2023.

	Hiver						Printemps					
Rivières	MK		STP		LTP		MK		STP		LTP	
	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values
Région hydroclimatique du sud-est												
SE1	1,1920	0,2333	1,0781	0,2810	0,7293	0,4658	-1,0386	0,2990	**-3,363****	**0,0010**	-0,9726	0,3340
SE2	1,1951	0,2320	1,0390	0,3026	0,7616	0,4463	0,6379	0,5235	**1,9860****	**0,0470**	0,5761	0,5646
SE3	**4,6424****	**0,0000**	**4,7761****	**0,0000**	**3,9334****	**0,0001**	0,5995	0,5489	1,5060*	0,1320	0,6880	0,4915
SE4	1,3174	0,1877	1,4227	0,1548	**1,6917***	**0,0907**	0,6971	0,4858	**1,9950****	**0,0480**	0,7383	0,4604
SE5	**2,0424****	**0,0411**	**2,0804****	**0,0375**	**1,9291***	**0,0537**	**1,9866****	**0,0470**	**5,7800****	**0,0000**	**2,6051****	**0,0092**
SE6	**2,1887****	**0,02686**	**2,1821****	**0,0291**	**2,0423****	**0,0411**	1,2895	0,1972	**2,8750****	**0,0040**	0,9758	0,3292
Région hydroclimatique d'Est												
E1	**-1,8472***	**0,0647**	-1,5990	0,1098	-1,0594	0,2912	**-4,4332****	**0,0000**	**-10,065****	**0,0000**	**-3,9961****	**0,0001**
E2	-0,1812	0,8562	-0,2037	0,8386	-0,1667	0,8725	**1,6729***	**0,0943**	**3,8600****	**0,0000**	**1,1390**	**0,2547**
E3	1,5475	0,1218	**1,6732***	**0,0943**	1,5998	0,1096	0,9828	0,3257	**3,0420****	**0,0020**	**0,6182**	**0,5365**
E4	**3,6804****	**0,0002**	**3,7335****	**0,0002**	**2,4272****	**0,0152**	-0,0279	0,9778	-0,0890	0,9290	-0,0351	0,9776
E5	0,8434	0,3990	0,8951	0,3707	0,7961	0,4260	**3,3528****	**0,0008**	**8,3240****	**0,0000**	**3,0314****	**0,0024**
E6	-0,2387	0,8113	0,2286	0,8191	-0,2139	0.8357	1,1040	0,2696	**3,1220****	**0,0020**	**0,8315**	**0,4057**
Région hydroclimatique du sud-ouest												
SW1	**3,3110****	**0,0009**	**3,5310****	**0,0004**	**2,8360****	**0,0046**	**2,7882****	**0,0053**	**5,9110****	**0,0000**	**2,2105***	**0.0271**
SW2	**2,6969****	**0,0070**	**2,8870****	**0,0039**	**2,3576****	**0,0184**	-0,7548	0,4503	**-1,9140***	**0,0560**	-0,4611	0.6478
SW3	**2,6976****	**0,0070**	**3,1302****	**0,0017**	**2,6821****	**0,0073**	**1,9230***	**0,0544**	**5,1110****	**0,0000**	**1,33816**	**0,1671**
SW4	**3,1455****	**0,0017**	**3,6153****	**0,0003**	**3,6903****	**0,0002**	**2,0530****	**0,0401**	**5,2890****	**0,0000**	**1.7226***	**0,0850**
SW5	1,4917	0,1358	**1,7150***	**0,0863**	**2,2035****	**0,0276**	**1,9587***	**0,0501**	**5,9330****	**0,0000**	1.6205	0,1051

** = valeurs de Z significatives au seuil de 5%; * = valeurs de Z significatives au seuil de 10%. Rouge : tendance positive; bleue : tendance négative.

Tableau 12. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux indices des coefficients de variation (CV) en été et en automne pendant la période 1930-2023.

	Summer						Fall					
Rivers	MK		STP		LTP		MK		STP		LTP	
	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values	Z	P-values
Région hydroclimatique du sud-est												
SE1	**3.8198****	**0.0001**	**8.5130****	**0.0000**	**3.7732****	**0.0002**	**2.8882****	**0.0039**	**4.0650****	**0.0000**	**2.2775****	**0.0228**
SE2	1.3804	0.1675	2.2220	0.0263	1.0655	0.2866	-0.1760	0.8603	-0.3120	0.7550	-0.1518	0.8841
SE3	**4.1474****	**0.0000**	**11.8300****	**0.0000**	**3.2617****	**0.0011**	**2.6685****	**0.0078**	**4.0340****	**0.0000**	**1.6699***	**0.0949**
SE4	-1.5196	0.1286	-2.4420	0.0146	-1.0176	0.3111	**-1.7259***	**0.0844**	**-2.3210****	**0.0200**	-0.8369	0.4046
SE5	-0.5646	0.5723	-1.2310	0.2182	-0.4972	0.6233	-0.7123	0.4763	-1.0240	0.3060	-0.3869	0.7017
SE6	-0.6971	0.4858	-1.2130	0.2250	-0.4138	0.6820	-0.8682	0.3853	-1.1450	0.2520	-0.5344	0.5961
Région hydroclimatique d'Est												
E1	**-2.0563****	**0.0398**	**-4.2260****	**0.0000**	-1.5491	0.1225	-0.8682	0.3853	-1.1450	0.2520	-0.5344	0.5961
E2	-0.4879	0.6256	-1.0530	0.2923	0.3290	0.7457	1.0029	0.3159	**2.7220****	**0.0060**	0.7070	0.4796
E3	0.9271	0.3539	**2.0010****	**0.0453**	06205	0.5349	1.5912	0.1116	**5.7620****	**0.0000**	1.3904	0.1644
E4	**2.4885****	**0.01280**	**5.5040****	**0.0000**	1.7570	0.0789	1.6302	0.1031	**3.0380****	**0.0020**	0.9513	0.3415
E5	0.0488	0.9611	0.1120	0.9106	0.0468	0.9627	**2.8457****	**0.0044**	**7.6020****	**0.0000**	**1.8582***	**0.0631**
E6	1.5665	0.1172	**2.2970****	**0.0216**	0.7947	0.4268	**1.7118***	**0.0869**	**5.7080****	**0.0000**	1.0780	0.2810
Région hydroclimatique du sud-ouest												
SW1	**2,5442****	**0,0110**	**6,5860****	**0,0000**	**2.4306****	**0,0151**	**3,6608****	**0,0003**	**6,8190****	**0,0000**	**3,2728***	**0,0000**
SW2	**5,3335****	**0,0000**	**10,416****	**0,0000**	**4,4135****	**0,0000**	**1,7119***	**0,0869**	**5,3870****	**0,0000**	**1,9904***	**0,0466**
SW3	**3,6874****	**0,0002**	**4,9680****	**0,0000**	**3,0302****	**0,0024**	**1,8393***	**0,0659**	**5,9910****	**0,0000**	**1,6746***	**0,0940**
SW4	**2,5589****	**0,0105**	**7,8290****	**0,0000**	1,3024	0,1928	**2,7601****	**0,0058**	**5,8090****	**0,0000**	1,3223	0,1861
SW5	0,5576	0.5771	0,8650	0,3873	0,3490	0,7271	1,3998	0,1616	2,5500	0,0110	0,9448	0,3448

** = valeurs de Z significatives au seuil de 5%; * = valeurs de Z significatives au seuil de 10%. Rouge : tendance positive; bleue : tendance négative.

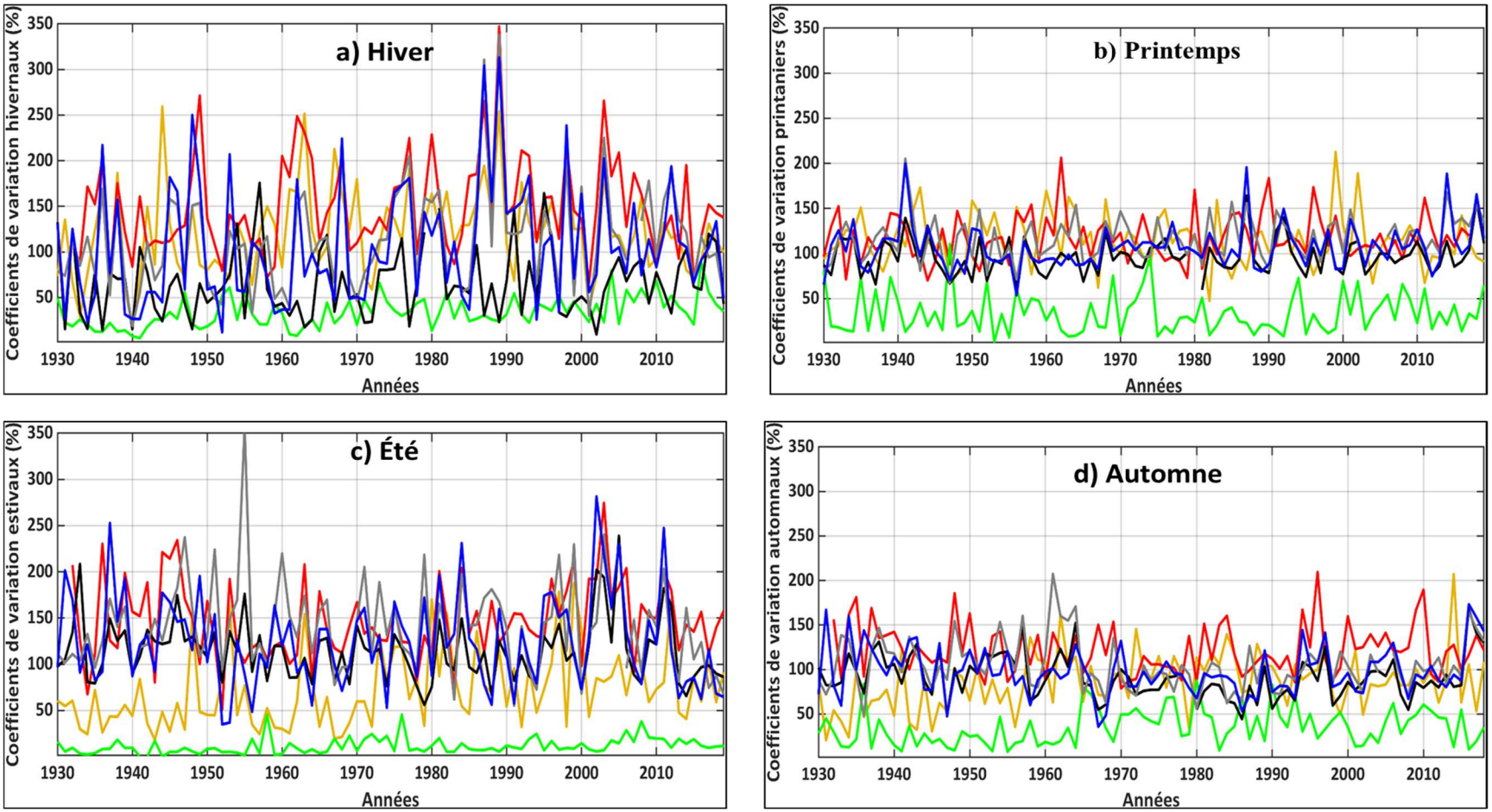


Figure 19. Variabilité temporelle des coefficients de variation (a) hivernaux, (b) printaniers, (c) estivaux et (d) automnaux dans la région hydroclimatique du sud-est (1930-2020). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.

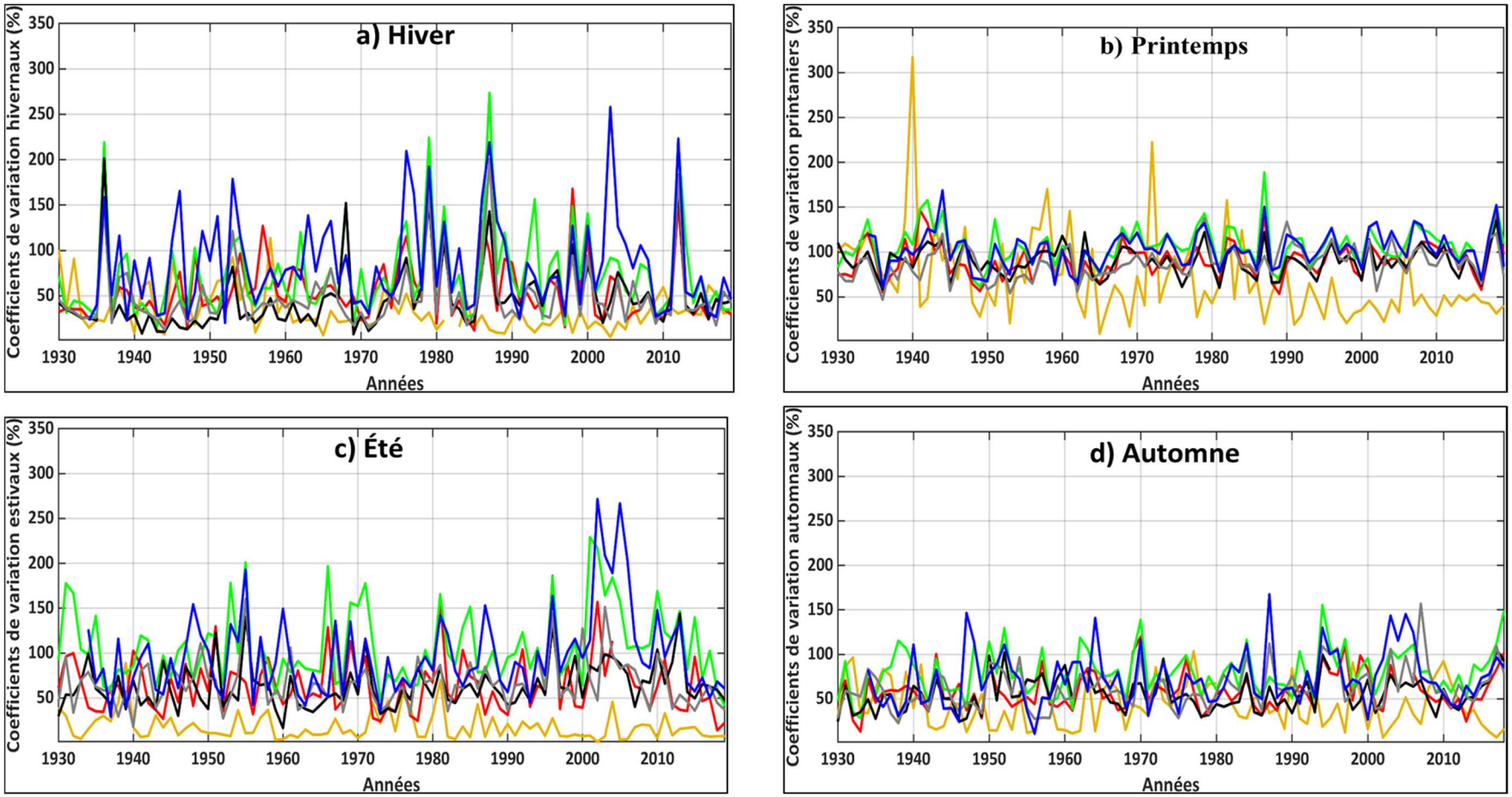


Figure 20. Variabilité temporelle des coefficients de variation (a) hivernaux, (b) printaniers, (c) estivaux et (d) automnaux dans la région hydroclimatique d'est (1930-2020). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivières Blanche : bleu

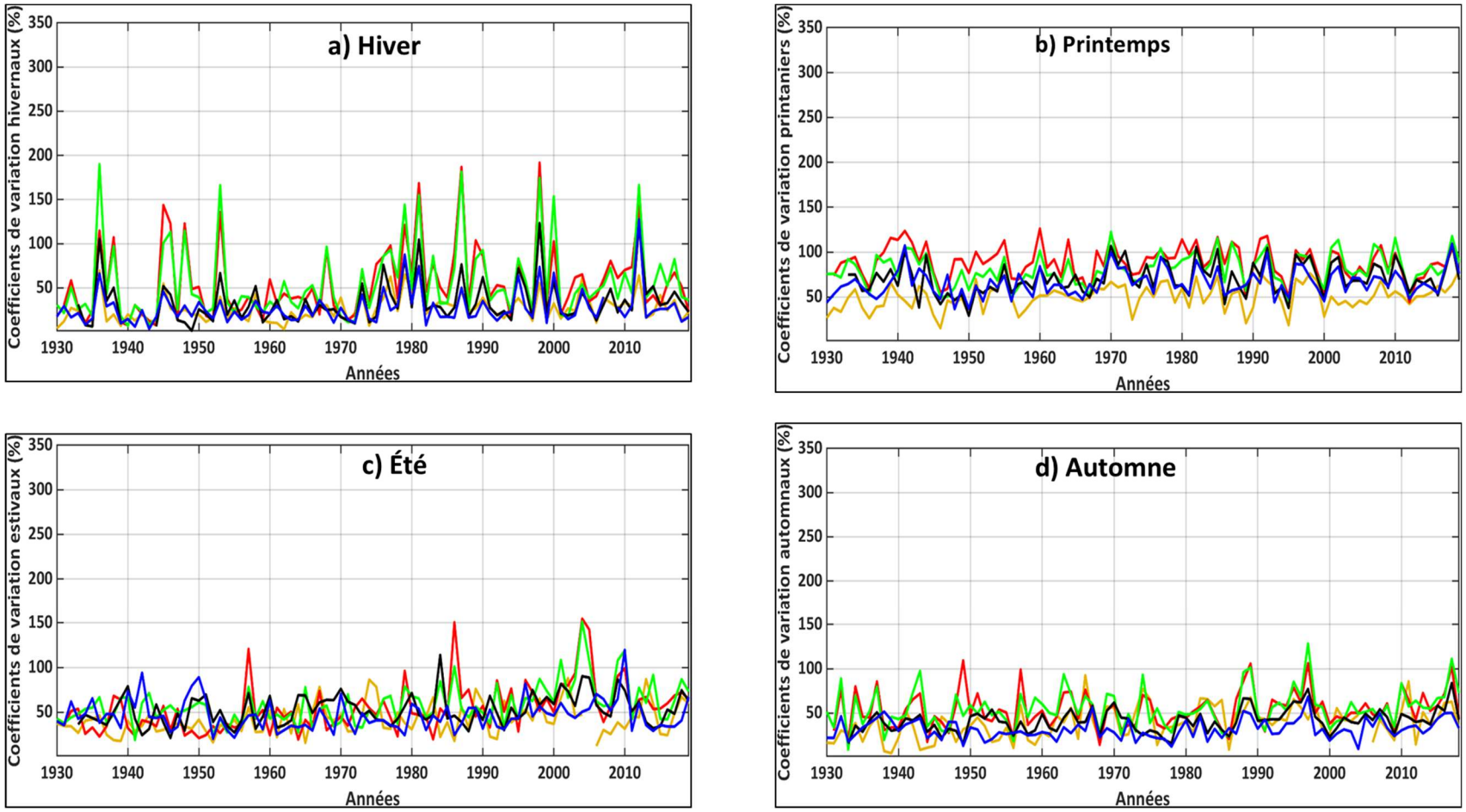


Figure 21. Variabilité temporelle des coefficients de variation (a) hivernaux, (b) printaniers, (c) estivaux et (d) automnaux dans la région hydroclimatique du sud-ouest (1930-2020). Rivière Petite Nation : bleu ; rivière Du Nord : rouge ; rivière L'Assomption : gris ; rivière Matawin : jaune ; rivière Vermillon : noir

III.3. RELATION ENTRE LES INDICES CLIMATIQUES ET LES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS SAISONNIERS

III.3.1. Relation entre les indices climatiques et les coefficients d'immodération (CI) des débits journaliers saisonniers

Les relations entre les indices climatiques et les indices de la variabilité des débits journaliers calculés au moyen de l'analyse de redondance sont résumés au tableau 13 et à la figure 22. Pour le besoin d'interprétation ultérieure, on a ajouté aussi les relations entre les indices climatiques et les magnitudes des débits maximums, minimums et moyens journaliers. En hiver, les coefficients d'immodération sont corrélés positivement à l'indice PNA (indice climatique Nord-Américain-Océan Pacifique). Au printemps et en été, ils le sont positivement à l'indice de réchauffement global (GMLOT). Enfin, en automne, ils sont corrélés négativement aux indices d'Oscillation Atlantique Multi-Décennale (AMO) et du réchauffement climatique global (GMLOT). Il importe de noter que la part de la variance expliquée par le premier axe significatif est inférieure à 15%. Cette part est donc relativement faible.

Tableau 13. Relation entre les indices climatiques, les indices de la variabilité et les magnitudes des débits journaliers (1950-2020).

Saisons	Indices de variabilité des débits journaliers		Magnitudes des débits journaliers		
	CI	CV	MAX	MIN	MOY
Hiver	PNA (+)	PNA (+)	PNA (+), GMLOT (+), PDO (+), AMO (-)	PNA (+), PDO (+) AMO (-)	GMLOT (+), PDO (+), PNA (+)
Printemps	GMLOT (+)	NINO3.4 (-)	GMLOT (+), AMO (-) AO (-)	GMLOT (+), AMO (-)	AMO (-)
Été	GMLOT (+)	AMO (+), NAO (+) GMLOT (+)	Aucun indice	GMLOT (-), AMO (-) NAO (-)	AO (+), PNA (+)
Automne	AMO (-) GMLOT (-)	AMO (-) GMLOT (-)	GMLOT (+)	GMLOT (+), AMO-	GMLOT (+)

(+) = corrélation positive significative; (-) = corrélation négative significative. Max = débits maximums journaliers saisonniers; Min = débits minimums journaliers saisonniers; Moy = débits moyens journaliers saisonniers.

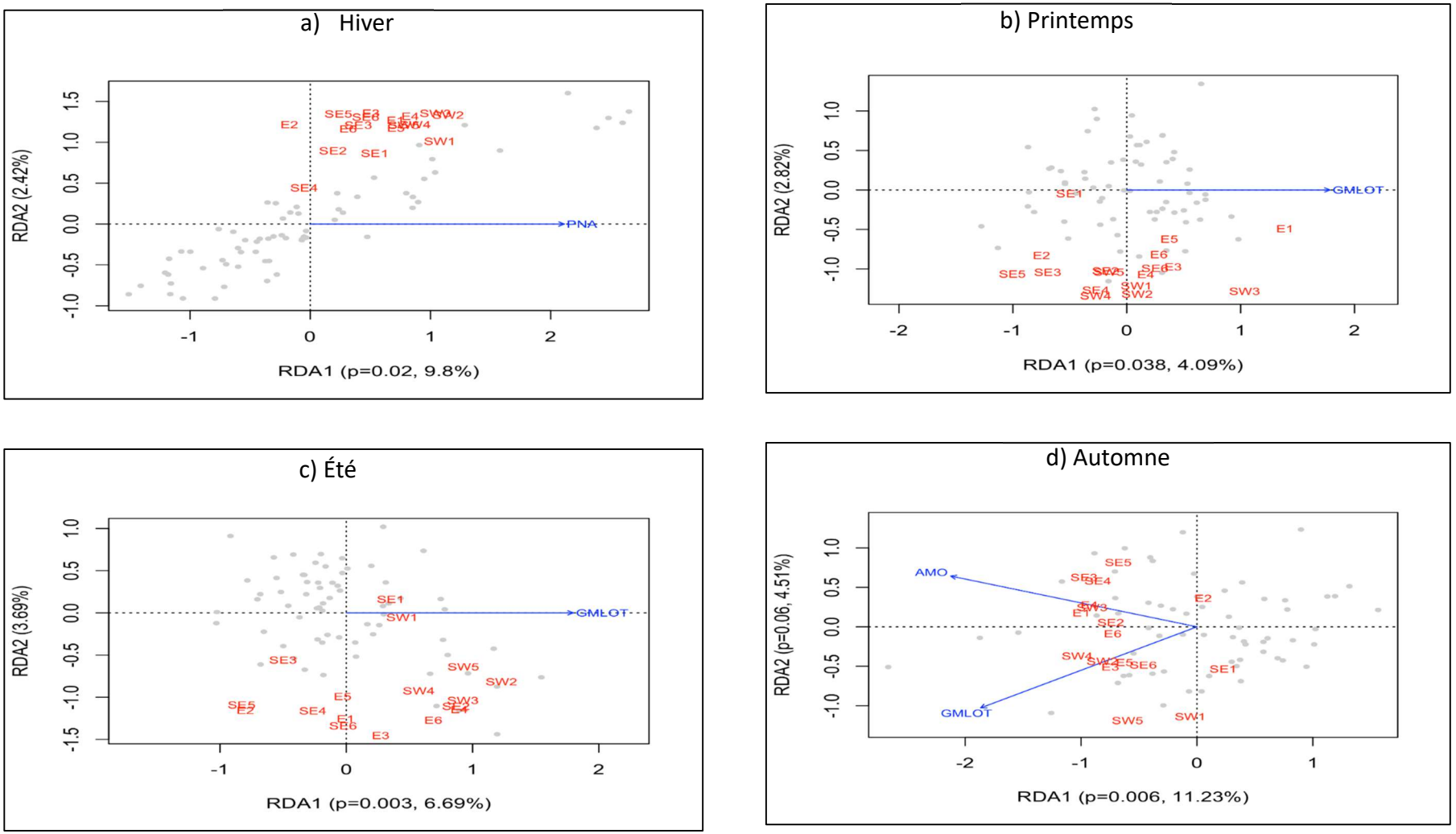


Figure 22. Résultat de l'analyse de redondance. Relation entre les coefficients d'immodération et les indices climatiques en (a) hiver, (b) printemps, (c) été et en (d) automne. E2 = stations hydrologiques ; points gris = années.

III.3.2. Relation entre les indices climatiques et les coefficients de variation des débits journaliers saisonniers

Les relations entre les indices climatiques et les coefficients de variation sont aussi présentées au tableau 13 et à la figure 23. En hiver, les coefficients de variation sont aussi corrélés positivement à l'indice climatique PNA. Au printemps, ils deviennent corrélés négativement à l'indice Nino3.4. En été, ils sont corrélés positivement aux indices AMO, NAO et GMLOT. Enfin, en automne, ils sont corrélés négativement aux indices AMO et GMLOT.

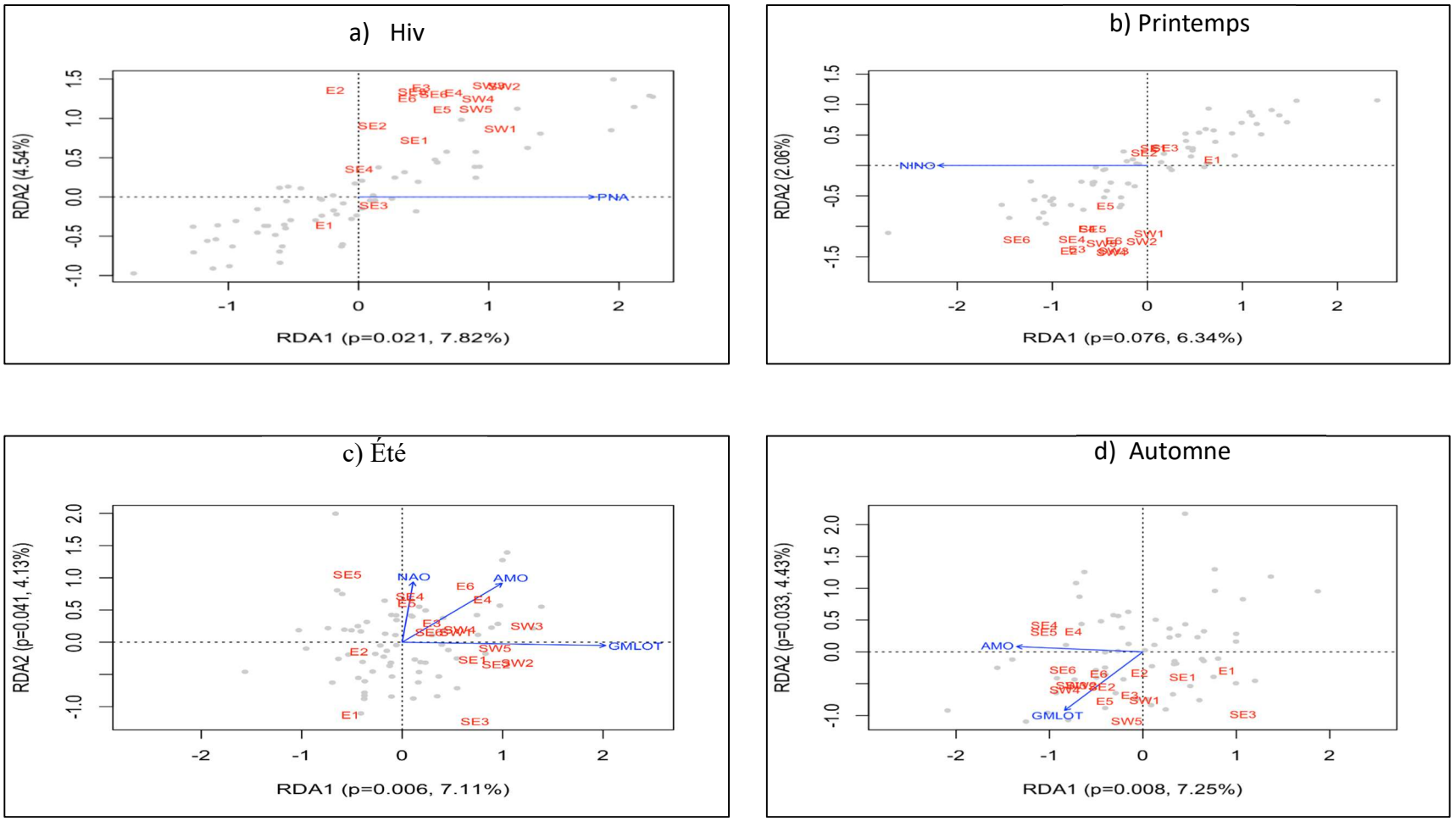


Figure 23. Résultat de l'analyse de redondance. Relation entre les coefficients de variation et les indices climatiques en (a) hiver, (b) printemps, (c) été et en (d) automne. E2 = stations hydrologiques ; points gris = années.

III.4. DISCUSSION ET INTERPRÉTATION SUR LA VARIABILITÉ TEMPORELLE DES INDICES DE LA VARIABILITÉ DES DÉBITS JOURNALIERS

III.4.1. Interprétation de la tendance à long-terme de la variabilité temporelle des coefficients d'immodération (CI) et de variation (CV)

L'analyse des corrélations entre les deux indices de la variabilité des débits journaliers saisonniers et les magnitudes des débits maximums, minimums et moyens journaliers saisonniers au moyen de l'analyse de redondance a révélé que les deux indices sont mieux corrélés positivement à la magnitude des débits maximums journaliers en hiver, en été et en automne. Au printemps, les coefficients d'immodération sont mieux corrélés négativement à la magnitude des débits minimums journaliers saisonniers. Il s'ensuit que la variabilité interannuelle des coefficients d'immodération et de variation est principalement influencée par celle de la magnitude des débits maximums journaliers. En effet, ce sont ces débits qui fluctuent beaucoup d'une année à l'autre en raison de leur plus grande sensibilité à la variabilité interannuelle des températures et des précipitations totales (neige et pluies). Les débits minimums journaliers fluctuent peu d'une année à l'autre, car ils sont générés par les nappes aquifères dont la capacité de stockage d'eau d'infiltration ne varie pas beaucoup dans le temps. Ainsi, leur variabilité interannuelle est beaucoup moins influencée par celle des températures et des précipitations totales que celle des débits maximums journaliers. Toutefois, au printemps, plusieurs travaux ont démontré que la magnitude des débits maximums journaliers n'a pas significativement changé dans le temps malgré la diminution de la quantité de neige (Assani, 2023; Assani et al., 2023). Ce qui explique en partie les valeurs des coefficients de corrélation relativement plus faibles durant cette saison que celles des autres saisons. En revanche, les débits minimums journaliers avaient tendance à augmenter significativement dans le temps, en particulier dans la région du sud-est en rive sud (Assani, 2023; Assani et al., 2022). De plus, ces débits minimums printaniers ne sont pas directement influencés par les nappes aquifères, à l'instar des autres saisons. Ce qui expliquerait des valeurs des coefficients de corrélation négatives relativement élevées observées entre les coefficients d'immodération et les débits minimums journaliers au printemps que durant les autres saisons.

L'application de trois tests de Mann-Kendall, qui permettent d'éliminer les persistances à court et à long termes, a révélé une hausse globalement généralisée des coefficients d'immodération dans le temps (tendance à la hausse ou tendance positive). Mais cette hausse dépend des saisons et des régions hydroclimatiques. En ce qui concerne les saisons, cette hausse est beaucoup plus généralisée en hiver que durant les trois autres saisons. Quant aux régions hydroclimatiques, on a observé que cette tendance à la hausse est moins généralisée dans la région hydroclimatique du sud-est, la plus agricole, que dans les deux autres régions hydroclimatiques. En été, on a observé même une baisse significative des coefficients d'immodération (tendance négative) dans la première région hydroclimatique contrairement aux deux autres régions hydroclimatiques. La différence est surtout marquée entre la région hydroclimatique du sud-est, située en rive sud au sud du 47°N, et la région hydroclimatique du sud-ouest, située en rive nord en été et en automne.

Étant donné que la variabilité interannuelle des coefficients d'immodération est principalement influencée par celle de la magnitude des débits maximums journaliers, leur tendance à la hausse généralisée observée en hiver s'explique par celle de la magnitude des débits maximums. En effet, Assani (2023) a démontré une hausse généralisée des débits maximums journaliers hivernaux au Québec méridional pendant la période 1930-2020 en raison de la fonte précoce de la neige et la hausse de la fréquence des précipitations sous forme de pluies. Durant les autres saisons, cette hausse fut observée seulement dans la région hydroclimatique du sud-ouest en rive nord en raison de l'effet de stockage limité des eaux de précipitations, qui ont significativement augmenté dans le temps, par les milieux humides (Assani, 2023, 2024; Assani et al., 2023). Ainsi, au printemps, malgré la baisse significative de la quantité de neige, les débits maximums journaliers printaniers n'ont pas significativement diminué dans le temps, car cette baisse a été compensée par la hausse de la quantité de pluies.

En revanche, les débits minimums journaliers ont significativement augmenté durant les quatre saisons dans la région hydroclimatique du sud-est, la plus agricole en raison d'une diminution significative des superficies cultivées au profit des jachères et des surfaces reboisées (Assani, 2023; Assani et al. 2022; Ruiz, 2019). Ce changement d'utilisation des sols a favorisé au fil de temps l'infiltration de l'eau des

précipitations dans cette région augmentant ainsi les débits minimums journaliers. Au printemps, la hausse de ces débits minimums est plus importante que celle des débits maximums journaliers. Ceux-ci n'ont pratiquement pas changé dans le temps dans cette région hydroclimatique. Ainsi, les coefficients d'immodération ont tendance à diminuer dans le temps (tendance négative) dans cette région hydroclimatique au printemps.

En ce qui concerne les coefficients de variation, on observe une différence de tendance en hiver avec celle des coefficients d'immodération. En effet, la hausse généralisée des coefficients d'immodération observée dans les trois régions hydroclimatiques ne l'est plus pour les coefficients de variation. Cette hausse reste généralisée seulement dans la région hydroclimatique du sud-ouest situé en rive nord. Il s'ensuit qu'en hiver, il existe une différence très marquée entre les rivières de la rive sud et celles de la rive nord en ce qui concerne la tendance à long terme de la variabilité temporelle des coefficients de variation. Cette différence s'explique par une hausse significative des débits en automne en rive nord qu'en rive sud (Assani, 2024a, 2024b). Rappelons que les débits hivernaux sont principalement influencés par les pluies automnales, qui alimentent les nappes phréatiques, et les débits automnaux. Lorsque ces débits automnaux sont élevés, les niveaux d'eau des rivières en hiver seront aussi élevés. D'où une variation relativement forte des débits journaliers pendant l'hiver. Au printemps, cette différence entre les deux rives s'atténue, car les débits maximums et moyens journaliers n'ont pas beaucoup changé dans le temps sur les deux rives pour des raisons déjà invoquées (hausse des pluies malgré une baisse de la quantité de neige). En revanche, les débits minimums journaliers ont significativement augmenté en rive sud dans la région hydroclimatique du sud-est. En été et en automne, on observe encore une différence entre la région hydroclimatique du sud-est en rive sud et la région hydroclimatique du sud-ouest en rive nord. Cette dernière région est caractérisée par une hausse quasi généralisée des coefficients de variation pendant les deux saisons contrairement à la première région où cette hausse généralisée n'est pas observée. Rappelons qu'en rive nord, les débits maximums journaliers ont significativement augmenté en été et en automne (Assani, 2024) contrairement à la rive sud.

III.4.2. Interprétation de la relation entre les indices climatiques et les indices de la variabilité des débits journaliers saisonniers

L'analyse de la relation entre les indices climatiques et les indices de la variabilité des débits journaliers saisonniers au moyen de l'analyse de redondance a mis en évidence des différences saisonnières. En hiver, les coefficients d'immodération et de variation sont corrélés positivement à l'indice climatique PNA (Indice climatique nord-américain-Océan Pacifique). Il convient de noter aussi que cet indice climatique est aussi corrélé positivement aux magnitudes des débits maximums et minimums journaliers. La phase positive de cet indice correspond aux débits maximums supérieurs à la moyenne, et par conséquent, aux valeurs des coefficients d'immodération élevées. De plus, cet indice est aussi corrélé positivement à la quantité totale de neige, à la quantité totale en équivalent en eau et aux températures maximales journalières en hiver au Québec méridional. Rappelons que la variabilité interannuelle des coefficients d'immodération et de variation se caractérisent par une tendance à la hausse (tendance positive) due à la fonte précoce de neige notamment. Cette fonte précoce a ainsi provoqué une hausse des pics de crues hivernales dans le temps. Au printemps, les coefficients d'immodération sont corrélés positivement à l'indice climatique de réchauffement global (GMLOT) et les coefficients de variation le sont négativement à l'indice NINO3.4 (associé aux phénomènes El Niño et La Niña). Le premier indice climatique est aussi corrélé positivement aux débits maximums et minimums journaliers saisonniers qui influencent la variabilité interannuelle des coefficients d'immodération. De plus, cet indice est aussi corrélé positivement aux précipitations totales (neige et pluies) qui influencent les débits maximums et minimums journaliers printaniers. Il s'ensuit que les phases positives de cet indice correspondent aux valeurs élevées des coefficients d'immodération en raison d'une hausse de la quantité des précipitations totales générant des pics de crues relativement élevés. La relation entre NINO3.4 et les coefficients de variation est complexe à interpréter. En effet, en phase positive, NINO3.4 est associé au phénomène El Niño (anomalies positives des températures des eaux de surface de l'Océan Pacifique tropical). La corrélation étant négative entre NINO3.4 et les coefficients de variation, les épisodes d'El Niño correspondent donc aux valeurs faibles des coefficients de variation. Soulignons qu'au Québec, ces épisodes d'El Niño sont généralement associés à des hivers doux et secs

(Shabbar, 2006). Ceux-ci génèrent peu de précipitations totales (pluies et neiges) en hiver, dont la fonte de neige au printemps réduit la variabilité des débits journaliers printaniers. En été, les coefficients d'immodération et de variation sont corrélés positivement à l'indice de réchauffement climatique. Cet indice est corrélé aussi positivement aux débits minimums mais ne l'est pas aux débits maximums journaliers. Il n'est pas non plus corrélé aux pluies estivales. En revanche, il est significativement corrélé aux températures maximales journalières estivales et à l'évapotranspiration totale qui influencent les débits minimums. Toutefois, les coefficients de variation sont corrélés négativement aux indices climatiques AMO (Oscillation Atlantique multi-décennale) et NAO (oscillation Nord Atlantique). Ces deux derniers indices sont aussi corrélés positivement aux pluies estivales. Ces résultats suggèrent que ce sont ces deux derniers indices qui influencent la variabilité interannuelle des pluies et des débits maximums journaliers estivaux et, par le fait même, les coefficients de variation des débits journaliers estivaux. Les phases positives de ces deux indices sont associées aux faibles valeurs (valeurs inférieures aux moyennes) des coefficients de variation probablement en raison d'une forte évapotranspiration malgré une hausse de pluies pendant ces phases positives. Enfin, en automne, les coefficients d'immodération et de variation sont corrélés négativement à l'indice de réchauffement climatique global (GMLOT). Mais celui-ci est corrélé positivement aux débits maximums, minimums et moyens journaliers estivaux. En revanche, il est corrélé négativement aux températures journalières et à la quantité totale de neige en automne. Les phases positives de cet indice climatiques correspondent aux faibles températures journalières et à la faible quantité de neige en automne. Il s'ensuit une faible variation des niveaux d'eau dans les rivières. Cependant, il importe de mentionner que d'autres indices climatiques interviennent dans cette relation complexe. Ils peuvent ainsi « brouiller » directement ou indirectement la relation entre l'indice de réchauffement climatique et les coefficients d'immodération et de variation. Il s'agit de l'indice AMO (Oscillation Atlantique Multi-décennale), corrélé négativement aux coefficients d'immodération et de variation ainsi qu'aux débits maximums et minimums journaliers. Quant à l'indice PDO (Oscillation Pacifique Décennale), il est plutôt corrélé positivement aux températures journalières et aux précipitations totales (neige et pluies)

en automne. Or, il est bien connu que les impacts climatiques de l'indice PDO sont opposés à ceux de l'AMO en Amérique du Nord.

En conclusion, l'analyse de la variabilité temporelle des coefficients d'immodération et de variation a révélé une influence relativement forte des débits maximums journaliers. Cette influence expliquerait ainsi une hausse quasi généralisée de ces deux coefficients dans le temps. En d'autres termes, les niveaux d'eau des rivières fluctuent de plus en plus dans le temps. Mais l'ampleur de ces fluctuations varie en fonction des saisons. Les deux indices de la variabilité des débits journaliers sont principalement corrélés à l'indice climatique de réchauffement global (GMLOT) au printemps, en été et en automne. En hiver, ils sont corrélés à l'indice climatique PNA (Amérique du Nord et Océan Pacifique).

CHAPITRE IV

CONCLUSION

Les impacts des changements climatiques se traduisent par une hausse significative de l'intensité et de la fréquence des événements hydrologiques extrêmes (crues et étiages) dans de nombreuses régions de la planète. Cependant, la majorité des études consacrées à cette problématique se sont intéressées aux impacts de ces changements climatiques sur la variabilité temporelle de la magnitude, de la fréquence, de la durée et de la période d'occurrence de ces événements hydrologiques extrêmes. Les conséquences de changements de ces quatre caractéristiques fondamentales des débits selon le concept de régime des débits naturels (Poff et al., 1997) sur la biodiversité sont de plus en plus documentées (Tonkin et al., 2023). Mais, à notre connaissance, il n'existe encore aucune étude consacrée aux impacts de ces changements climatiques sur la cinquième caractéristique fondamentale, à savoir, la variabilité des débits en rivières naturelles ou peu perturbées par les barrages et réservoirs. Pourtant, les successions des inondations et des sécheresses hydrologiques dans les bassins versants dans le contexte actuel de changements climatiques amplifient la variation des niveaux d'eau des rivières aux échelles horaires, journalières, mensuelles, saisonnières et annuelles. Cette amplification de la variation des débits peut tout aussi affecter, à des degrés divers, la biodiversité des écosystèmes fluviaux.

Le Québec est aussi confronté à des successions des périodes des inondations et des étiages sévères en raison des changements climatiques. Plusieurs études récentes ont démontré une hausse de la magnitude des débits de crues (Assani, 2023, 2024; Assani et al., 2023) et des étiages (Assani, 2022; Assani et al., 2022) dans de nombreux bassins versants. Les conséquences de ces successions sur la variabilité interannuelle des variations des niveaux d'eau (débits) journaliers saisonniers n'ont jamais été analysées. Pour combler cette lacune, notre projet de recherche s'est donné comme objectif d'analyser la variabilité spatiale et temporelle de deux indices de la variation des niveaux

d'eau des rivières au Québec méridional. Il s'agit de deux indices suivants : le coefficient d'immodération (CI) qui mesure l'écart entre le débit le plus élevé et le débit le plus faible mesurés au cours d'une saison donnée et le coefficient de variation (CV) qui mesure la variation des débits d'un jour à un autre au cours d'une saison donnée. Ce projet a été fondé sur l'analyse des données des débits journaliers mesurés dans 17 rivières, regroupées en trois régions hydroclimatiques homogènes, pendant la période 1930 à 2020 durant les quatre saisons (hiver, printemps, été et automne).

En ce qui concerne la variabilité spatiale, l'application de l'analyse de variance a révélé trois niveaux des différences des moyennes saisonnières de ces deux indices : des différences entre les rivières analysées, entre les saisons et entre les trois régions hydroclimatiques. Pour expliquer ces différences spatiales, on a corrélé ces moyennes saisonnières aux facteurs physiographiques et climatiques. Deux résultats importants significatifs ont été dégagés de cette analyse de la variabilité spatiale. En ce qui concerne les saisons, il a été clairement démontré que les moyennes saisonnières de deux indices (CI et CV) de la variabilité des débits étaient plus faibles en hiver que durant les trois autres saisons en raison de l'absence de ruissellement de surface consécutive au stockage des précipitations sous forme de neige sur les versants. Quant aux régions hydroclimatiques, il a été observé que les moyennes saisonnières de deux indices des débits journaliers étaient systématiquement plus élevées en rive sud, en particulier au sud du 47°N (région hydroclimatique du sud-est), qu'en rive nord (région hydroclimatique du sud-ouest) en raison des superficies agricoles beaucoup plus larges dans la première région que dans la seconde. L'agriculture favorise un ruissellement précoce des eaux de pluies et de fonte de neige par la réduction de la perméabilité des sols. Il en résulte ainsi une variation relativement forte des débits dans les bassins versants agricoles. Cette influence de l'agriculture a été confirmée par l'analyse de corrélation qui a démontré que les superficies agricoles étaient parmi les variables les mieux corrélées positivement aux moyennes saisonnières de deux indices. Outre, ce facteur lié à l'utilisation des sols, ces moyennes étaient aussi mieux corrélées aux précipitations totales saisonnières (neige et pluies) traduisant ainsi les différences climatiques qui existent entre la rive sud et la rive nord. La première rive reçoit plus des précipitations totales saisonnières que la dernière

rive. Il importe de noter que les valeurs de ces coefficients de corrélation étaient influencées par les saisons, en particulier la saison estivale où ces valeurs étaient relativement faibles en raison de la forte variabilité spatiale des averses due à celle des mouvements convectifs qui les génèrent.

L'analyse de la variabilité interannuelle des coefficients d'immodération et de variation a révélé un lien relativement fort entre ces deux indices et la magnitude des débits maximums journaliers durant les quatre saisons. Toutefois, au printemps, ce lien est plus fort avec les débits minimums journaliers. En raison de cette influence des débits maximums journaliers, la variabilité temporelle à long terme de ces deux indices est caractérisée par une tendance à la hausse. Mais l'ampleur de cette hausse dépend des saisons et des régions hydroclimatiques. En hiver, la variabilité interannuelle des coefficients d'immodération est caractérisée par une hausse presque généralisée dans les trois régions hydroclimatiques. En revanche, pour les coefficients de variation, cette tendance est moins généralisée. Pour les autres saisons, cette tendance généralisée à la hausse est observée seulement en rive nord (région hydroclimatique du sud-ouest). Elle est absente en rive sud au sud du 47°N (région hydroclimatique du sud-est). En rive nord, contrairement à la rive sud, les débits maximums journaliers ont significativement augmenté dans le temps durant les quatre saisons provoquant ainsi l'augmentation dans le temps des coefficients d'immodération et de variation.

L'analyse de la relation entre les indices climatiques et les deux indices de la variabilité des débits journaliers a révélé que ces deux indices hydrologiques sont corrélés principalement à l'indice climatique de réchauffement climatique global (GMLOT) au printemps, en été et en automne. Cette relation est positive durant les deux premières saisons mais négative durant la dernière saison. En hiver, les deux indices hydrologiques sont corrélés positivement à l'indice climatique PNA indice climatique nord-américain-Océan Pacifique).

En ce qui concerne les limites de cette étude, sur le plan de la variabilité spatiale, il n'a pas été possible d'intégrer tous les facteurs susceptibles d'expliquer la variabilité spatiale des coefficients d'immodération et de variation des débits journaliers, en particulier les facteurs liés aux caractéristiques géologiques des bassins versants. L'absence de données sur ces facteurs notamment n'a pas permis d'expliquer la différence

des moyennes de ces coefficients observés entre les rivières situées dans une même région hydroclimatique d'une part, et celles situées dans plusieurs régions hydroclimatiques, d'autre part. En ce qui concerne la variabilité temporelle, pour les mêmes raisons, il n'a pas été possible d'expliquer l'absence d'une tendance significative à long terme pour certaines rivières durant les quatre saisons. De plus, il n'a pas été possible d'élucider de manière claire la contribution précise de chaque indice climatique, en cas d'interaction de plusieurs indices, sur la variabilité temporelle des coefficients d'immodération et de variation.

La perspective la plus féconde qui se dégage de cette étude est l'exploration des impacts présents et futurs des changements significatifs des niveaux d'eau des rivières du Québec sur la biodiversité des écosystèmes fluviaux dans le contexte du réchauffement climatique actuel. Comme on l'avait mentionné, de nombreux travaux sont consacrés à l'analyse des impacts des changements à long terme induits par le réchauffement climatique sur la magnitude, la durée, la fréquence et la période d'occurrence des débits extrêmes sur cette biodiversité. Cette perspective permettra d'intégrer ces impacts dans la protection, la restauration et l'aménagement des rivières dans le contexte des changements climatiques actuels afin de pouvoir y conserver leur intégrité écologique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anctil, F., Coulibaly, P. (2004). Wavelet Analysis of the interannual variability in Southern Quebec streamflow. *Journal of Climate*, 164, 163-173

Anctil, F., Martel, F., Hoang, V. D. (1998). Analyse régionale des crues journalières de la province du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, *25*, 125–146. https://doi.org/10.1139/l97-104

Assani, A. A. (2022a). Impact de la surface des zones humides sur les caractéristiques des écoulements extrêmes quotidiens saisonniers durant la saison été-automne dans le sud du Québec (Canada). *International Journal of Environmental Science and Natural Resources*, *30*, 556278. https://doi.org/10.19080/IJESNR.2022.30.556278

Assani, A. A. (2022b). Spatio-temporal variability of daily maximum flows in fall season in southern Quebec (Canada). *Journal of Flood Risk Management*. https://doi.org/10.1111/jfr3.12853

Assani, A. A. (2023). Comparison of spatio-temporal variability of daily maximum flows in cold season (winter and spring) in southern Quebec (Canada). *Hydrology*, *10*(2), 44. https://doi.org/10.3390/hydrology10020044

Assani, A. A. (2024a). Spatiotemporal variability of fall daily maximum flows in southern Quebec (Canada) from 1930 to 2018. *Journal of Flood Risk Management*, *12*(2). https://doi.org/10.1111/jfr3.12971

Assani, A. A. (2024b). Analyse des impacts des changements climatiques, des facteurs physiographiques et de l'occupation/utilisation des sols sur la variabilité spatio-temporelle des débits moyens journaliers saisonniers dans le sud du Québec (Canada). *Applied Water Science*, *14*, 109. https://doi.org/10.1007/s13201-024-01942-3

Assani, A. A., Tardif, S. (2006). Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche éco-géographique. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 19, 291–310. https://doi.org/10.7202/014421ar

Assani, A. A., A. Chalifour, G. Legare, C.-S. Manouane, Leroux, D. (2011b). Temporal regionalization of 7-day low flows in the St. Lawrence watershed in Quebec (Canada), *Water Resources Management*, 25, 3559–3574. DOI 10.1007/s11269-011-9870-6

Assani, A. A., Charron, S., Matteau, M., Mesfioui, M., Quessy, J.-F. (2010a). Temporal variability modes of floods for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada). *Journal of Hydrology*, 385(3–4), 292–299. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.031

Assani, A. A., Landry, R., Laurencelle, M. (2010b). Comparison of interannual variability modes and trends of seasonal precipitation and streamflow in southern Quebec (Canada). *River Research and Applications*, 28, 1740–1752. https://doi.org/10.1002/rra.1544

Assani, A. A., Landry, R., Quessy, J.-F., Clément, F. (2011). Temporal variability of rain-induced floods in southern Quebec. In J. Blanco & H. Kheradmand (Eds.), *Climate change – geophysical foundations and ecological effects* (pp. 65–80). InTech. https://doi.org/10.5772/24604

Assani, A. A., Maloney-Dumont, V., Pothier-Champagne, A., Kinnard, C., Quessy, J.-F. (2019). Comparison of the temporal variability of summer temperature and rainfall as it relates to climate indices in southern Quebec (Canada). *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 2425–2435. https://doi.org/10.1007/s00704-018-2750-8

Assani, A. A., S. Charron, M. Matteau, M. Mesfioui, J.-F. Quessy (2010c). Temporal variability modes of floods for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada), *Journal of Hydrology*, 385, 292–299. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.02.031

Assani, A. A., Zeroual, A., Roy, A., Kinnard, C. (2021). Impacts of agricultural areas on spatio-temporal variability of daily minimum extreme flows during the transitional seasons (spring and fall) in southern Quebec. *Water*, 13(24), 3487. https://doi.org/10.3390/w13243487

Assani, A. A., Zeroual, A., Roy, A., Kinnard, C. (2022). Variabilité spatiale et temporelle des débits minimums saisonniers quotidiens dans le sud du Québec : Synthèse des impacts du climat, de l'agriculture et des zones humides. *Hydrology Research*, *53*, 1494–1509. https://doi.org/10.2166/nh.2022.071

Assani, A. A., Zeroual, A., Roy, A., Kinnard, C. (2023). The new "surface storage" concept versus the old "sponge effect" concept: Application to the analysis of the spatio-temporal

variability of the annual daily maximum flow characteristics in southern Quebec (Canada). *Journal of Water and Climate Change*, *14*, 2543–2558. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.152

Aygün, O., Kinnard, C., Campeau, S. (2020a). Impacts of climate change on the hydrology of northern midlatitude cold regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, *44*, 338–375. https://doi.org/10.1177/0309133319878123

Beauchamp, M., Assani, A. A., Landry, R., Massicotte, P. (2015). Temporal variability of the magnitude and timing of winter maximum daily flows in southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 529, 410–417. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.053

Beche, L. A., McElravy, E. P., Resh, V. H. (2006). Long-term seasonal variation in the biological traits of benthic-macroinvertebrates in two Mediterranean-climate streams in California, U.S.A. *Freshwater Biology*, 51, 56–75. https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01473.x

Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V. D., Leclerc, M. (1997). *Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec*. Rapport présenté par l'INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au Ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans Canada. 83p.

Berghuijs, W. R., Aalbers, E. E., Larsen, J. R., Trancoso, R., Woods, R. A. (2017). Recent changes in extreme floods across multiple continents. *Environmental Research Letters*, *12*, 114035. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8847

Berthot, L., St-Hilaire, A., Caissie, D., El-Jabi, N., Kirby, J., Ouellet-Proulx, S. (2020a). Southern Quebec environmental flow assessments: spatial and temporal scales sensitivity. *Canadian Water Resources Journal*, 46, 358–371. https://doi.org/10.1080/07011784.2020.1834881

Berthot, L., St-Hilaire, A., Caissie, D., El-Jabi, N., Kirby, J., Ouellet-Proulx, S. (2020b). Defining homogeneous hydrological regions using principal component analysis: An application to southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31, 100730. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100730

Biron, S., A. A. Assani, J.-J. Frenette, P. Massicotte (2014). Comparison of Lake Ontario and St. Lawrence River hydrologic droughts and their relationship to climate indices, *Water Resources Resarch*, 50, 1396–1409, doi:10.1002/2012WR013441.

Blanchette, M., Rousseau, A. N., Foulon, É., Savary, S., Poulin, M. (2019). What would have been the impacts of wetlands on low flow support and high flow attenuation under steady state land cover conditions? *Journal of Environmental Management*, *234*, 448–457. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.095

Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Frolova, N., Ganora, D., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., …, Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, *573*, 108–111. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6

Brown, R. D. (2010). Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948–2005. *Hydrological Processes*, 24, 1929–1954. https://doi.org/10.1002/hyp.7565

Bunn, S. E., Arthington, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management*, 30(4), 492–507. https://doi.org/10.1007/s00267-002-2737-0

Bunn, S. E., Edward, D. H., Loneragan, N. R. (1986). Spatial and temporal variation in the macroinvertebrate fauna of streams of the northern jarrah forest, Western Australia: Community structure. *Freshwater Biology*, *16*, 67–91.

Clausen, B., Biggs, B. J. F. (1997). Relationships between benthic biota and hydrological indices in New Zealand streams. *Freshwater Biology*, *38*, 327–342.

Clausen, B., Biggs, B. J. F. (2000). Flow indices for ecological studies in temperate streams: Groupings based on covariance. *Journal of Hydrology*, *237*, 184–197.

Colwell, R. K. (1974). Predictability, constancy, and contingency of periodic phenomena. *Ecology*, *55*, 1148–1153.

Cushing, C. E., McIntire, C. D., Cummins, K. W., Minshall, G. W., Petersen, R. C., Sedell, J. R., Vannote, R. L. (1983). Relationships between chemical, physical, and biological indices along a river continuum based on multivariate analysis. *Archiv für Hydrobiologie*, *98*, 317–326.

Delisle, F., Assani, A. A. (2021). Comparison of seasonal flow rate change indices downstream of three types of dams in southern Quebec (Canada). *Water*, *13*, 2555. https://doi.org/10.3390/w13182555

Déry, S. J., E. F. Wood (2004). Teleconnection between the Arctic Oscillation and Hudson Bay River discharge. *Journal of Geophysical Research*, 31, L18205, doi: 10.1029/2004GL020729

Dery, S. J., E. F. Wood (2005). Decreasing river in northern Canada. *Geophysical Research Letters*, 32, L10401, doi:10.1029/2005GL022845.

Dudley, R. W., Hirsch, R. M., Archfield, S. A., Blum, A. G., Renard, B. (2020). Low trends at human-impacted and reference basins in the United States. *Journal of Hydrology*, *580*, 124254. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124254

Enfield, D. B., Mestas-Nuñez, A. M., Trimble, P. J. (2001). The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28, 2077–2080. https://doi.org/10.1029/2000GL012745

Extence, C. A., Balbi, D. M., Chadd, R. P. (1999). River flow indexing using British benthic macroinvertebrates: a framework for setting hydroecological objectives. *Regulated Rivers: Research & Management*, 15, 545–574. https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199911/12)15:6

Farquharson, F. A. K., Meigh, J. R., Sutcliffe, J. V. (1992). Regional analysis of flow frequency in arid and semi-arid regions. *Journal of Hydrology*, *138*, 487–501.

Fossey, M., Rousseau, A. N. (2016a). Assessing the long-term hydrological services provided by wetlands under changing climate conditions: A case study of a Canadian watershed. *Journal of Hydrology*, *541*, 1287–1302. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.011

Fossey, M., Rousseau, A. N. (2016b). Can isolated and riparian wetlands mitigate the impact of climate change on watershed hydrology? A case study approach. *Journal of Environmental Management*, *184*, 327–339. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.054

Fossey, M., Rousseau, A. N., Bensalma, F., Savary, S., Royer, A. (2015). Integrating isolated and riparian wetland modules in the PHYSITEL/HYDROTEL modelling platform: Model performance and diagnosis. *Hydrological Processes*, *29*, 4683–4702. https://doi.org/10.1002/hyp.10534

Guerfi, N., Assani, A. A., Mesfioui, M., Kinnard, C. (2015). Comparison of the temporal variability of winter daily extreme temperatures and precipitations in southern Quebec

(Canada) using the Lombard and copula methods. International Journal of Climatology, 35, 4237–4246. https://doi.org/10.1002/joc.4282

Gurnell, A. M., Corenblit, D., García de Jalón, D., González del Tánago, M., Grabowski, R. C., O'Hare, M. T., et Szewczyk, M. (2016). A conceptual model of vegetation–hydrogeomorphology interactions within river corridors. *River Research and Applications*, 32, 142–163. https://doi.org/10.1002/rra.2928

Haines, A. T., Finlayson, B. L., McMahon, T. A. (1988). A global classification of river regimes. *Applied Geography*, *8*, 255–272.

Hamed, K. H., Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, *204*(1–4), 182–196. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X

Hammond, J. C., Fleming, B. J. (2021). Evaluating low flow patterns, drivers and trends in the Delaware River Basin. *Journal of Hydrology*, *598*, 126246. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126246

Hawkes, C. L., Miller, D. L., Layher, W. G. (1986). Fish ecoregions of Kansas: Stream fish assemblage patterns and associated environmental correlates. *Environmental Biology of Fishes*, *17*, 267–279.

Hodgkins, G. A., Whitfield, P. H., Burn, D. H., Hannaford, J., Renard, B., Stahl, K., Fleig, A. K., Madsen, H., Mediero, L., Korhonen, J., Murphy, C., Wilson, D. (2017). Climate-driven variability in the occurrence of major floods across North America and Europe. *Journal of Hydrology*, *552*, 704–717. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.027

Horwitz, R. J. (1978). Temporal variability patterns and the distributional patterns of stream fishes. *Ecological Monographs*, *48*, 307–321.
https://doi.org/10.1071/MF9890303

Huang, S., Kumar, R., Rakovec, O., Aich, V., Wang, X., Samaniego, L., Liersch, S., Krysanova, V. (2018). Multimodel assessment of flood characteristics in four large river basins at global warming of 1.5, 2.0 and 3.0 K above the pre-industrial level. *Environmental Research Letters*, *13*(12), 124005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae94b

Huang, X., Hall, A. D., Berg, N. (2018). Anthropogenic warming impacts on today's Sierra Nevada snowpack and flood risk. *Geophysical Research Letters*, *45*. https://doi.org/10.1029/2018GL077432

Hughes, J. M. R., James, B. (1989). A hydrological regionalization of streams in Victoria, Australia, with implications for stream ecology. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, *40*, 303–326.

Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, *269*(5224), 676–679. https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676

Jowett, I. G., Duncan, M. J. (1990). Flow variability in New Zealand rivers and its relationship to in-stream habitat and biota. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, *24*, 305–317.

Kay, A. L., Bell, V. A., Guillod, B. P., Jones, R. G., Rudd, A. C. (2018). National-scale analysis of low flow frequency: Historical trends and potential future changes. *Climatic Change*, *147*, 585–599. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2145-y

Kay, A. L., Booth, N., Lamb, R., Raven, E., Schaller, N., & Sparrow, S. (2018). Flood event attribution and damage estimation using national-scale grid-based modelling: Winter 2013/2014 in Great Britain. *International Journal of Climatology*, *38*, 5205–5219. https://doi.org/10.1002/joc.5721

Kendall, M. (1975). *Rank correlation methods* (4e éd.). Charles Griffin, London, UK.

Kinnard, C., Bzeouich, G., Assani, A. (2022). Impacts of summer and winter conditions on summer river low flows in low elevation, snow-affected catchments. *Journal of Hydrology*, 605, 127393. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127393

Kinnard, C., Nemri, S., Assani, A. (2024). Mechanisms of spring freshet generation in southern Quebec, Canada. Canadian Water Resources *Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 49, 421-440. https://doi.org/10.1080/07011784.2024.2375346

Knight, J. R., Folland, C. K., Scaife, A. A. (2006). Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, *33*, L17706. https://doi.org/10.1029/2006GL026242

Legendre, P., Legendre, L. (2012). *Numerical ecology.* 3rd ed., Elsevier.

Legendre, P., Borcard, D., Roberts, D. W. (2012). Variation partitioning involving orthogonal spatial eigenfunction submodels. *Ecology*, *93*, 1234–1240. https://doi.org/10.1890/11-2028.1

Lytle, D. A., Poff, N. L. (2004). Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology & Evolution*, *19*, 94–100. https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.10.002

Mazouz, R., Assani, A. A., Rodriguez, M. A. (2013). Application of redundancy analysis to hydroclimatology: A case study of spring heavy floods in southern Québec (Canada). *Journal of Hydrology*, 496, 187–194. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.023

Mazouz, R., Assani, A. A., Quessy, J.-F., & Légaré, G. (2012). Comparison of the interannual variability of spring heavy floods characteristics of tributaries of the St. Lawrence River in Quebec (Canada). *Advances in Water Resources*, 35, 110–120. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.10.006

McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Haines, A. T., Srikanthan, R. (1992). *Global runoff: Continental comparisons of annual flows and peak discharges*. Cremlingen: Catena.

Meffe, G. K., & Minckley, W. L. (1987). Persistence and stability of fish and invertebrate assemblages in a repeatedly disturbed Sonoran Desert stream. *American Midland Naturalist*, 117, 177–191. https://doi.org/10.2307/2425738

Moss, D., Furse, M. T., Wright, J. F., Armitage, P. D. (1987). The prediction of the macro-invertebrate fauna of unpolluted running-water sites in Great Britain using environmental data. *Freshwater Biology*, *33*, 141–160.

Muñoz-Sabater, J. (2019). ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S). Climate Data Store (CDS). https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac

Najibi, N., Devineni, N. (2018). Recent trends in the frequency and duration of global floods. *Earth System Dynamics*, *9*, 757–783. https://doi.org/10.5194/esd-9-757-2018

Olden, J. D., & Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, *19*, 101–121.

Pettit, N. E., Froend, R. H., Davies, P. M. (2001). Identifying the natural flow regime and the relationship with riparian vegetation for two contrasting rivers in Western Australia. *Regulated Rivers: Research & Management*, *17*, 201–215.

Poff, N. L. (1996). A hydrogeography of unregulated streams in the United States and an examination of scale-dependence in some hydrological descriptors. *Freshwater Biology*, 36, 71–91. https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.1996.00073.x

Poff, N. L., Allan, J. D. (1995). Functional organization of stream fish assemblages in relation to hydrological variability. *Ecology*, *76*, 606–627.

Poff, N. L., Ward, J. V. (1989). Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46, 1805–1818. https://doi.org/10.1139/f89-228

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegaard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., et Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, 47, 769–784. https://doi.org/10.2307/1313099

Poff, N. L., Richter, B. D., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Naiman, R. J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B. P., Freeman, M. C., Henriksen, J., Jacobson, R. B., Kennen, J. G., Merritt, D. M., O'Keeffe, J. H., Olden, J. D., Rogers, K., Tharme, R. E., & Warner, A. (2010). The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwater Biology*, *55*, 147–170.

Puckridge, J. T., Sheldon, F., Walker, K. F., Boulton, A. J. (1998). Flow variability and the ecology of large rivers. *Marine and Freshwater Research*, 49, 55–72. https://doi.org/10.1071/MF94161

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braun, D. P., Powell, J. (1998). A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research & Management*, *14*, 329–340.

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., Braun, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10, 1163–1174. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Wigington, R., Braun, D. P. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology*, *37*, 231–249.

Roudier, P., Andersson, J. C. M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., Ludwig, F. (2016). Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change*, *135*, 341–355. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4

Ruiz, J. (2019). Modernization of agriculture and agricultural land cover in Quebec (1951–2011). *Cahiers de géographie du Québec*, *63*, 213–230. https://doi.org/10.7202/1070073ar

Sabater, S., Elosegi, A., Ludwig, R. (Ed.). (2019). *Multiple stressors in river ecosystems: Status, impacts and prospects for the future*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2016-0-01770-9

Shabbar, A. (2006). The impact of the El Niño–Southern Oscillation on the Canadian climate. *Advances in Geosciences*, *6*, 149–153. https://doi.org/10.5194/adgeo-6-149-2006

Sneyers, R. (1975). Sur l'analyse statistique des séries d'observations. Note technique No. 143. Organisation Météorologique Mondiale, Genève, 192 p.

Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, *10*, 13768. https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2

Tellman, B., Sullivan, J. A., Kuhn, C., Kettner, A. J., Doyle, C. S., Brakenridge, G. R., Erickson, T. A., & Slayback, D. A. (2021). Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*, *596*, 80–86. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w

Ter Braak, C. J. F. (1994). Canonical community ordination. Part I: Basic theory and linear methods. *Écoscience*, *1*(2), 127–140. https://doi.org/10.1080/11956860.1994.11682237

Thompson, D. W. J., & Wallace, J. M. (2000). Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate*, *13*(5), 1000–1016. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013

Tonkin, J. D., Siqueira, T., Lytle, D. A., Bogan, M. T., Bonada, N., Rader, R. B., Datry, T. (2023). Extreme events and river biodiversity under climate change. *Nature Reviews Biodiversity*. https://doi.org/10.1038/s44358-023-00131-7

Townsend, C. R., Hildrew, A. G., Schofield, K. (1987). Persistence of stream invertebrate communities in relation to environmental variability. *Journal of Animal Ecology*, *56*, 597–614.

Wohl, E., Bledsoe, B. P., Jacobson, R. B., Poff, N. L., Rathburn, S. L., Walters, D. M., & Wilcox, A. C. (2015). The natural sediment regime in rivers: Broadening the foundation for ecosystem management. *BioScience*, *65*, 358–371. https://doi.org/10.1093/biosci/biv002

Wood, P. J., Agnew, M. D., Petts, G. E. (2000). Flow variations and macroinvertebrate community responses in a small groundwater-dominated stream in south-east England.

Hydrological Processes, 14, 3133–3147. https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17

Wrzesiński, D. (2005). Changes of the hydrological regime of rivers of Northern and Central Europe in various periods of the North Atlantic Oscillation. *Quaestiones Geographicae,* 24. 97-109.

Yue, S., Wang, C. (2004). The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. *Water Resources Management*, *18*, 201–218. https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60