

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ANALYSE DES FACTEURS DE LA VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE
DE LA SÉCHERESSE ÉCO-HYDROLOGIQUE HIVERNALE ET ESTIVALE
AU QUÉBEC MERIDIONAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA

MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

HABIBOULAYE GANO

AOÛT 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

Vincent Fugère

Université du Québec à Trois-Rivières

Prénom et nom

Membre de jury interne

Germain Danie

Université du Québec à Montréal

Prénom et nom

Membre de jury externe

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, M. Ali A. Assani, professeur au Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce projet de recherche et, par le fait même, de poursuivre mes études aux cycles supérieurs. Je le remercie sincèrement pour son encadrement rigoureux, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de ce travail.

Je souhaite également remercier M. Christophe Kinnard, professeur au Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour ses conseils avisés, sa disponibilité et ses nombreuses suggestions qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce mémoire. Je le remercie également d'avoir accepté de nous communiquer aimablement des données sur les variables climatiques et physiographiques des bassins versants.

Mes remerciements s'adressent aussi aux professeurs Vincent Fugère, professeur au Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières, et Daniel GERMAIN, du département de géographie de l'Université de Québec à Montréal (UQAM) pour avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation et pour l'intérêt porté à ce travail.

Je tiens enfin à remercier le professeur M. Éric Harvey, du Département des sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Trois-Rivières, pour avoir accepté de faire partie du comité d'évaluation.

Je souhaite également exprimer ma sincère reconnaissance envers ma famille ainsi qu'à mes amis pour leur soutien moral, leur patience et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

RÉSUMÉ

Ce mémoire analyse les facteurs contrôlant la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse éco-hydrologique au Québec méridional, en se concentrant sur sa durée et son intensité durant les saisons hivernale et estivale. Cette recherche s'inscrit dans un contexte de changements climatiques marqué par une hausse des températures, une diminution du couvert nival mais une hausse de la quantité de pluies, susceptibles d'affecter les débits d'étiage et les habitats aquatiques.

L'étude porte sur les données des débits mesurés pendant la période 1950-2023 dans 17 bassins versants répartis dans les trois régions hydroclimatiques du Québec. Les hypothèses reposent sur le rôle de l'occupation du sol, notamment l'agriculture, dans la variabilité spatiale, ainsi que sur l'influence des changements climatiques et des indices de téléconnexion sur l'évolution temporelle de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique. Celle-ci est définie à partir des débits réservés écologiques nécessaires à la protection des habitats du poisson définis par Belzile et al. (1997). Plusieurs tests statistiques furent appliqués pour comparer la variabilité spatiale (analyse de variance et corrélation linéaire) et temporelle (tests de Mann-Kendall et Analyse de redondance) de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique dans les trois régions hydroclimatiques.

En ce qui concerne la variabilité spatiale, la comparaison des moyennes des durées et des intensités de la sécheresse a révélé que cette sécheresse est moins intense et dure moins longtemps dans les bassins versants de la rive nord que dans ceux de la rive sud en hiver. En été, aucune différence de la durée et de l'intensité de cette sécheresse ne sont pas significativement différentes entre les deux rives. L'analyse de corrélation a révélé que la durée et l'intensité de la sécheresse sont corrélées négativement aux superficies des milieux humides et des températures maximales journalières (mars et avril) en hiver. En été, ces deux caractéristiques ne sont corrélées significativement à aucun facteur physiographique ou climatique. Cette absence de corrélation serait due à la variabilité spatiale relativement forte des averses estivales. Quant à la variabilité temporelle, la durée et l'intensité de la sécheresse ont tendance à diminuer dans le temps en hiver mais

d'augmenter en été. L'analyse de redondance a révélé qu'en hiver et en été, la durée de la sécheresse est principalement corrélée positivement à l'indice climatique de réchauffement global alors que l'intensité de la sécheresse l'est négativement au même indice climatique. Ces résultats mettent en évidence l'importance des interactions entre climat, hydrologie et occupation du sol dans la dynamique et dans l'évolution des sécheresses éco-hydrologiques pour la gestion durable des ressources en eau en contexte de changement climatique au Québec méridional.

Mots-clés : sécheresse éco-hydrologique, durée, intensité, Québec méridional, variabilité spatio-temporelle, débits réservés écologique, changements climatiques, facteurs physiographiques, indices climatiques.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	IV
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	XI
CHAPITRE I	1
INTRODUCTION.....	1
I.1. CADRE CONCEPTUEL.....	1
I.2. CADRE CONCEPTUEL ET REVUE DE LITTÉRATURE.....	1
I.2.1. Le concept de « régime de débits naturels »	1
I.2.1.1. Définition du concept.....	1
I.2.1.2. Les applications du concept de régime de débits naturels	4
I.2.2. Le concept de débits environnementaux.....	5
I.2.2.1. Définition du concept de débits environnementaux.....	5
I.2.2.2. Application du concept de débits environnementaux	7
I.2.3. Le concept de la sécheresse éco-hydrologique	8
I.2.3.1. Définitions	8
I.2.3.2. Application du concept de la sécheresse éco-hydrologique.....	10
CHAPITRE II	11
PROBLÉMATIQUE : REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES APPLICATIONS DES CONCEPTS DES RÉGIMES DE DÉBITS NATURELS, DES DÉBITS ENVIRONNEMENTAUX ET DE LA SÉCHERESSE ECO-HYDROLOGIQUE AU QUÉBEC.....	11
II.1. Revue de littérature sur l'application du concept de régime de débits naturels au Québec	11
II.2. Revue de littérature sur l'application du concept de débits environnementaux	13
II.3. Revue de littérature sur l'application du concept de la sécheresse éco- hydrologique.....	14

II.4. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE LA RECHERCHE	14
II.5. MATÉRIELS ET MÉTHODES	16
II.5.1. Choix des bassins versants et descriptions	16
II.5.2. Sources de données et méthodes d'estimation des débits réservés éco- hydrologique	18
II.5.3. Définition et constitution des séries des caractéristiques de la sécheresse éco- hydrologique	21
II.5.4. L'analyse statistique des données	23
II. 6. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	25
II.6.1. Comparaison de la variabilité spatiale des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique	25
II.6.2. Comparaison de la corrélation entre les caractéristiques (durée et intensité) de la sécheresse éco-hydrologique et les variables physiographiques et hydroclimatiques en hiver et en été	27
II.6.3. Variabilité temporelle des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique	30
II.6.3.1. Analyse de la variabilité de la tendance à long terme des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique	30
II.6.3.2. Analyse de la relation entre les indices climatiques et les caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique.....	38
II.6.3.3. Comparaison de la relation entre les indices climatiques, les caractéristiques de la sécheresse et les variables climatiques.....	41
II.6.4. Discussion.....	42
II.6.4.1. Variabilité spatiale des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique	42
II.6.4.2. Variabilité temporelle des caractéristiques de la sécheresse éco- hydrologique	45
CHAPITRE III.....	49
CONCLUSION GÉNÉRALE	49
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	53
ANNEXE A	62
A,1, TENDANCES DE LA DURÉE DE LA SÉCHERESSE ÉCO- HYDROLOGIQUE.....	62
A,2, TENDANCES DE L'INTENSITÉ DE LA SÉCHERESSE ÉCO- HYDROLOGIQUE.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Définition des cinq composantes de l'écoulement fluvial (débits) selon le concept de « régime des débits naturels » (Poff et al., 1997)	2
Tableau 2. Impacts des cinq caractéristiques des débits sur certains processus écologiques (Richter et al., 1996).....	3
Tableau 3. Quelques exemples des modifications des caractéristiques ou composantes fondamentales des débits naturels, les impacts écologiques et les solutions à apporter pour restaurer l'intégrité écologique des rivières anthropisées (Nilsson et Svedmark, 2002)	4
Tableau 4. Comparaison des valeurs des coefficients de corrélation (R) calculées entre la durée de la sécheresse éco-hydrologique et les variables physio-climatiques en hiver et en été.....	28
Tableau 5. Comparaison des valeurs des coefficients de corrélation (R) calculées entre l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique et les variables physio-climatiques en hiver et en été.....	29
Tableau 6. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux séries de la durée de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023)	30
Tableau 7. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux séries de la durée de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023)	31
Tableau 8. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux séries de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023).....	34
Tableau 9. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux séries de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023)	35
Tableau 10. Synthèse sur la relation entre les variables hydroclimatiques et les indices climatiques en hiver et en été (1950-2023)	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Les 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)	18
Figure 2. Durées moyennes de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023)	25
Figure 3. Durées moyennes de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023)	26
Figure 4. Intensités moyennes de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023).....	26
Figure 5. Intensités moyennes de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023)	27
Figure 6. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en hiver dans la région hydroclimatique du sud-est (1950-2023). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.....	32
Figure 7. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en hiver dans la région hydroclimatique d'est (1950-2023). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Blanche : bleu	32
Figure 8. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique du sud-est (1950-2023). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.....	33
Figure 9. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique d'est (1950-2023). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Blanche : bleu	33
Figure 10. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique du sud-ouest (1950-2023). Rivière Petite Nation : bleu ; rivière Du Nord : rouge ; rivière L'Assomption : gris ; rivière Matawin : jaune ; rivière Vermillon : noir	34
Figure 11. Variabilité interannuelle des intensités de la sécheresse éco-hydrologique en hiver dans la région hydroclimatique du sud-est (1950-2023). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.....	36
Figure 12. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en hiver dans la région hydroclimatique d'est (1950-2023). Rivière	

	Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Blanche : bleu	36
Figure 13.	Variabilité interannuelle des intensités de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique du sud-est (1950-2023). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.....	37
Figure 14.	Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique d'est (1950-2023). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Blanche : bleu	37
Figure 15.	Variabilité interannuelle des intensités de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique du sud-ouest (1950-2023). Rivière Petite Nation : bleu ; rivière Du Nord : rouge ; rivière L'Assomption : gris ; rivière Matawin : jaune ; rivière Vermillon : noir.....	38
Figure 16.	Relation entre les indices climatiques et la durée de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023). SE = stations analysées. Points gris= années	39
Figure 17.	Relation entre les indices climatiques et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023). SE = stations analysées. Points gris= années	39
Figure 18.	Relation entre les indices climatiques et la durée de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023). SE = stations analysées. Points gris= années	40
Figure 19.	Relation entre les indices climatiques et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023). SE = stations analysées. Points gris= années	40
Figure 20.	Tendances à long terme de la durée de la sécheresse éco-hydrologique en hiver au Québec méridional (1950-2023) - Test de Mann-Kendall .	62
Figure 21.	Tendances à long terme de la durée de la sécheresse éco-hydrologique en été au Québec méridional (1950-2023) - Test de Mann-Kendall	63
Figure 22.	Tendances à long terme de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en été au Québec méridional (1950-2023) - Test de Mann-Kendall	64
Figure 23.	Tendances à long terme de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en hiver au Québec méridional (1950-2023) - Test de Mann-Kendall	65

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières
CEHQ	Centre d'Expertise Hydrique du Québec
FAPAQ	Faune et Parcs Québec
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
AMO (OAM)	Atlantic Multidecadal Oscillation / Oscillation Atlantique Multi-décennale
AO (OA)	Arctic Oscillation / Oscillation Arctique
NAO (ONA)	North Atlantic Oscillation / Oscillation Nord-Atlantique
PDO (OPD)	Pacific Decadal Oscillation / Oscillation Pacifique Décennale
Niño 3.4	Indice de l'Oscillation Australe (ENSO)
PNA	Pacific-North American Pattern / Téléconnexion Pacifique-Amérique du Nord
GMLOT (ICRG)	Global Mean Land/Ocean Temperature / Températures moyennes des Continents et des Océans ou Indice Climatique de Réchauffement Global
ANOVA	Analyse de variance
MAF	Mean Annual Flows (Débits moyens annuels)
MK	Test de Mann-Kendall
TFPW	Trend-Free Pre-Whitening Test (Test de pré-filtrage sans tendance)
MMKY	Modified Mann-Kendall Test (Test de Mann-Kendall modifié)
LTP	Long-Term Persistence Test (Test de persistance à long terme)
Qr	Débit réservé éco-hydrologique
Qmin	Débit minimum journalier
Imax	Intensité maximale de la sécheresse éco-hydrologique

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1. CADRE CONCEPTUEL

I.2. CADRE CONCEPTUEL ET REVUE DE LITTÉRATURE

Se positionnant à l'interface de l'écologie fluviale, de l'hydrologie et de la géomorphologie fluviale ou hydrogéomorphologie, l'éco-hydrologie a connu un développement important depuis les quarante dernières années (Bond, 2003 ; Gurnell et al., 2000 ; Hannah et al., 2004 ; Kundzewicz, 2002). Ce développement s'est traduit par l'élaboration de plusieurs concepts scientifiques (Conrenblit et al., 2007 ; Nilsson et Svedmark, 2002). Certains de ces concepts ont été utilisés en hydrologie permettant ainsi d'étudier des nouvelles problématiques qui, autrement, ne le seraient pas. Parmi ces concepts, le plus fécond en hydrologie, fut celui de « régime des débits naturels ». Ce concept a permis le développement de deux autres concepts tout aussi féconds sur le plan de la recherche. Il s'agit des concepts des « débits environnementaux » et de la « sécheresse éco-hydrologique ». Dans les lignes qui suivent, nous allons définir ces trois concepts et donner les exemples de leurs applications en hydrologie.

I.2.1. Le concept de « régime des débits naturels ».

I.2.1.1. Définition du concept

Ce concept a été développé dans un article devenu célèbre publié par Poff et al. (1997). Dans cet article, les auteurs définissent le régime des débits naturels comme la variabilité naturelle des cinq composantes des débits qui définissent le régime hydrologique naturel d'un cours d'eau afin d'assurer l'intégrité écologique de l'écosystème fluvial. Il repose sur l'idée générale suivante (Nilsson et Svedmark, 2022) : le régime des débits naturels

ou d'écoulement naturel maintient l'intégrité de l'écosystème et la biodiversité des rivières en influençant le fonctionnement des écosystèmes fluviaux. Les cinq composantes sont les suivantes : la magnitude, la période d'occurrence, la durée, la fréquence et la variabilité. Leurs définitions sont présentées au tableau 1. Il est important de préciser qu'avant la publication de l'article de Poff et al. (1997), d'autres auteurs avaient déjà utilisé ce concept sans toutefois le développer (Richter et al., 1996).

Tableau 1. Définition des cinq composantes de l'écoulement fluvial (débits) selon le concept de « régime des débits naturels » (Poff et al., 1997).

Caractéristiques	Définition
Magnitude	Quantité ou volume d'eau X donnée qui s'écoule dans un chenal
Durée	Le temps mis par cet écoulement à une section donnée du chenal
Fréquence	Le nombre de fois que cet écoulement survient dans une section donnée du chenal dans un intervalle de temps donné
Période d'occurrence	La date de mesure de cet écoulement
Variabilité	La fluctuation de la magnitude, la durée, la fréquence et la période d'occurrence de l'écoulement à une section donnée du chenal

Ce nouveau concept diffère du concept classique de « régime hydrologique » utilisé en hydrologie par le fait que les cinq composantes de l'écoulement fluvial (débits) jouent chacun des rôles spécifiques sur le fonctionnement écologique des écosystèmes fluviaux afin d'en assurer leur intégrité écologique. En hydrologie, on a toujours privilégié la magnitude des débits au détriment des autres composantes. Dans leur article, Richter et al. (1996) ont donné quelques exemples de ces rôles. Ceux-ci sont présentés au tableau 2.

Tableau 2. Impacts des cinq caractéristiques des débits sur certains processus écologiques (Richter et al., 1996)

Caractéristiques	Exemples d'impacts écologiques
Magnitude	Mesure de 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.
Période d'occurrence	Détermine si certaines exigences du cycle de vie sont satisfaites ou peuvent influencer le degré de stress ou de mortalité associé à 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.2.1.2. Les applications du concept de régime de débits naturels

Depuis son énoncé, le concept a été largement appliqué dans la littérature scientifique. Il a été abondamment utilisé pour quantifier les impacts des barrages et autres activités anthropiques sur les débits de rivières (Richter al., 1996). La finalité de toutes ces études est de quantifier l'ampleur de ces impacts anthropiques pour pouvoir proposer des solutions qui permettent de restaurer les débits naturels ou presque naturels avant les perturbations anthropiques (tableau 3). Cette restauration permet ainsi de rétablir l'intégrité écologique naturelle de ces écosystèmes perturbés. Dans cet effort de quantification, de nombreux travaux se sont intéressés à proposer les métriques (indices) qui doivent servir à définir les cinq composantes de l'écoulement fluvial (e.g., Claussen et Biggs, 2000 ; Monk et al., 2007; Olden et Poff, 2003 ; Richter et al., 1996). Les métriques les plus couramment utilisées dans la littérature scientifique sont ceux proposés par Richter et al. (1996).

Tableau 3. Quelques exemples des modifications des caractéristiques ou composantes fondamentales des débits naturels, les impacts écologiques et les solutions à apporter pour restaurer l'intégrité écologique des rivières anthropisées (Nilsson et Svedmark, 2002).

Caractéristique	Type d'altération	Impacts écologiques	Solutions à apporter
Magnitude/Fréquence	Hausse de la variabilité	Hausse de l'érosion et de lessivage des plantes et des matières organiques	Réduire la fréquence de la variation de la magnitude
	Stabilisation de la magnitude (diminution de la variabilité)	Invasion des plantes exotiques	Hausse de la variabilité saisonnière de la magnitude

Période d'occurrence	Perte des pics de crues saisonnières	Réduction de germination des grains et de taux de croissance des plantes	Rétablir les pics de crues saisonnières
Durée	Hausse de la durée des débits d'étiages	Réduction de la couverture végétale et de la diversité	Hausse de la durée des débits élevés
	Hausse de la durée des inondations	Altération des communautés de plantes	Réduction de la durée des débits d'inondations
Variabilité	Changement rapide des niveaux d'eau	Lessivage des plantes ripicoles et échec de germination des plantes	Réduction du taux de changement des niveaux d'eau

I.2.2. Le concept de débits environnementaux

I.2.2.1. Définition du concept de débits environnementaux

Le concept de débits environnementaux est central dans la gestion des ressources en eau pour maintenir la santé des écosystèmes aquatiques. Les débits environnementaux qui sont des régimes d'écoulement d'eau définis scientifiquement pour soutenir les fonctions écologiques des écosystèmes aquatiques, maintenir la biodiversité et fournir des services écosystémiques. Ils permettent de trouver un équilibre entre la disponibilité de l'eau pour les besoins humains et écologiques, reconnaissant l'environnement comme un utilisateur légitime de l'eau (Kennen et al., 2018). Cette reconnaissance a souvent entraîné des frictions entre les utilisateurs d'eau des secteurs publics et privés.

Malgré ces frictions, les débits environnementaux soutiennent les écosystèmes d'eau douce et estuariens, essentiels pour la santé des écosystèmes et le bien-être humain. Ils permettent également d'adapter la gestion de l'eau aux impacts du changement climatique et des activités humaines (Arthington et al., 2018). Pour ces derniers auteurs, les débits environnementaux représentent la gestion des flux d'eau pour maintenir les écosystèmes aquatiques sains, adaptés à l'ère Anthropocène où les activités humaines influencent de manière significative les cycles naturels. Klaus et al. (2022) décrivent les débits environnementaux comme les régimes de débit nécessaires pour maintenir la santé des écosystèmes aquatiques pendant les périodes de sécheresse. Di Sabatino et al. (2021) les définissent comme des régimes de débit nécessaires pour maintenir les fonctions écologiques des cours d'eau, en particulier pour préserver la structure et la composition des assemblages d'invertébrés et les processus de décomposition des feuilles. Jiang et al. (2022) utilisent le concept pour décrire les régimes de débits nécessaires pour maintenir les écosystèmes éco-hydrologiques face aux sécheresses.

Les clauses de la déclaration de Brisbane (2007) donnent une définition qui synthétisent toutes les autres définitions à savoir : « les quantités, les qualités et les régimes de flux d'eau nécessaires pour maintenir les écosystèmes d'eau douce et estuariens ainsi que les moyens de subsistance et le bien-être humain qui en dépendent ». La déclaration et les recherches qui ont suivi ont influencé la science, les dimensions socio-écologiques et l'acceptation internationale des débits environnementaux tant en théorie qu'en pratique.

La gestion des débits environnementaux vise à restaurer et à maintenir les valeurs socialement valorisées des écosystèmes d'eau douce tout en garantissant leur santé et leur résilience face aux effets du changement climatique, de la gestion des ressources en eau et des infrastructures associées. La reconnaissance des débits environnementaux comme un élément clé de la gestion des ressources en eau est important pour équilibrer les besoins en eau des écosystèmes et des sociétés humaines, surtout dans les régions souffrant d'un stress hydrique. Une gestion saine des flux environnementaux protège contre des problèmes potentiellement graves et irréversibles.

Il importe de mentionner que ce concept de débits environnementaux est lié à d'autres expressions comme « Allocation environnementale de l'eau (Environmental

water allocation) », « Exigences écologiques ou environnementales en eau (Ecological and Environmental water requirements) », « Demande écologique en eau (Ecological water demand) », ou encore « Consommation d'eau éco-environnementale (eco-environmental water consumption) » (Arthington, 2012).

I.2.2.2. Application du concept de débits environnementaux

Les applications ont même précédé la formulation et le développement du concept des débits environnementaux. Les applications les plus courantes sont celles qui concernent l'élaboration des débits réservés, c'est-à-dire, les débits minimums qu'on doit maintenir dans une rivière pour protéger et conserver son intégrité écologique. Depuis les années 1970, on a ainsi assisté à l'élaboration de plus de 40 normes des débits réservés, en particulier dans l'ouest des États-Unis (Bietz et al., 1985), une région relativement aride où les conflits pour l'utilisation de l'eau sont fréquents (Belzile et al., 1997). Ces normes sont fondées sur trois méthodes : hydrologique, hydraulique et d'habitat préférentiel.

Les méthodes hydrologiques sont basées uniquement sur une analyse statistique des débits mesurés sur une période donnée. Elles reposent sur l'hypothèse suivante : l'écosystème aquatique d'une rivière est fonction du régime hydrologique qu'elle a connu par le passé. Ainsi, sur la base des analyses statistiques, on détermine un seuil minimal (norme) des débits qu'il faut conserver pour assurer la protection de cet écosystème.

Quant aux méthodes hydrauliques, elles sont fondées sur la relation entre la quantité d'habitats disponibles et le débit à un site donné sur une rivière. L'habitat est évalué sur la base du périmètre mouillé ou d'une largeur de rivière utilisable par les poissons notamment (Bietz et al., 1985).

Enfin, les méthodes d'habitat préférentiel permettent d'établir, pour un tronçon de rivière donné, une relation entre la quantité d'habitats disponibles et le débit (Belzile et al., 1997). Contrairement à la méthode hydraulique précédente, les méthodes d'habitat préférentiel, s'intéressent à l'habitat présentiel d'une seule espèce de poisson

I.2.3. Le concept de la sécheresse éco-hydrologique

I.2.3.1. Définitions

La notion de sécheresse suscite des débats, découlant de la diversité des perspectives disciplinaires et des contextes d'application. Les hydrologues, écologistes et gestionnaires de l'eau ont souvent des définitions et des priorités différentes en ce qui concerne la sécheresse. Les hydrologues se concentrent sur les aspects quantitatifs du débit des cours d'eau, des niveaux des nappes phréatiques et des réservoirs. Les écologistes, eux, mettent l'accent sur les impacts biologiques et les interactions au sein des écosystèmes. La sécheresse écologique prend en compte le stress subi par les plantes, les animaux et les habitats en raison de la rareté de l'eau.

Crausbay et al. (2017), sur leur définition de la sécheresse écologique pour le 21^{ème} siècle, estiment que les réponses des écosystèmes à la sécheresse restent largement absentes dans de nombreux efforts de planification en cas de déficit en eau, ce qui donne lieu à des débats qui opposent souvent les besoins en eau des humains et ceux des écosystèmes. D'après eux, une partie du problème réside dans le fait que les définitions existantes de la sécheresse décrivant les impacts météorologiques de la sécheresse, envisagent la sécheresse à travers une lentille centrée sur l'humain et ne prennent pas pleinement en compte les dimensions écologiques de la sécheresse. De ce fait, il est important de définir un nouveau type de sécheresse, qui intègre les dimensions écologiques, climatiques, hydrologiques, socio-économiques et culturelles de la sécheresse. Ils définissent la sécheresse écologique comme un déficit épisodique de la disponibilité en eau qui pousse les écosystèmes au-delà des seuils de vulnérabilité, affecte les services écosystémiques et déclenche des rétroactions dans les systèmes naturels/humains.

C'est ainsi que le concept de sécheresse éco-hydrologique vient intégrer les dimensions écologiques et hydrologiques des phénomènes de sécheresse, cherchant à offrir une vision plus holistique de l'impact des déficits hydriques sur les écosystèmes.

Elle examine comment les changements dans la disponibilité de l'eau influencent les processus écologiques.

Cependant, la définition précise de la sécheresse éco-hydrologique reste l'objet de discussions et de controverses. Slette et al. (2019), en examinant comment les écologistes définissent la sécheresse - proposent des recommandations pour des définitions plus rigoureuses et standardisées afin de mieux comparer les études et comprendre les effets écologiques de la sécheresse - définissent la sécheresse éco-hydrologique comme une période prolongée de conditions sèches affectant les processus hydrologiques et écologiques des écosystèmes.

En étudiant les implications éco-hydrologiques de la sécheresse pour les forêts aux Etats-Unis, Vose et al. (2016) soutiennent l'idée que la sécheresse éco-hydrologique se réfère à l'impact de la sécheresse sur les processus écologiques et hydrologiques, notamment la disponibilité en eau et les interactions entre l'eau et la végétation. Zhang et al. (2023) se penchent sur la relation entre la sécheresse météorologique et la sécheresse éco-hydrologique dans la prairie de Xilin Gol, en Chine, en utilisant des analyses d'indices de sécheresse et de facteurs biophysiques connexes. Ils voient la sécheresse éco-hydrologique comme une période de stress hydrique pour les plantes, où l'évapotranspiration réelle est significativement inférieure à l'évapotranspiration potentielle.

Goodwell et al. (2018) la décrivent comme une période où les connexions dynamiques des processus écologiques et hydrologiques sont affectées par le manque de précipitations. En 2007, Breshears et al. (2007) étudient les liens entre la végétation et le bilan hydrique dans les systèmes semi-arides, en réponse aux événements de sécheresse extrême. Dans ce travail, la sécheresse éco-hydrologique est décrite comme une période prolongée avec de faibles valeurs d'eau dans le sol qui peut entraîner la mortalité des arbres et des changements de surface terrestre.

On remarque que toutes les différentes définitions de la sécheresse éco-hydrologique convergent vers l'idée d'une perturbation complexe affectant profondément les écosystèmes et les interactions entre les systèmes naturels et humains. Contrairement à la sécheresse météorologique, qui se concentre principalement sur le déficit de précipitations, la sécheresse éco-hydrologique englobe une perspective plus intégrée,

considérant les interactions complexes entre les processus climatiques, hydrologiques et écologiques. C'est dans cette perspective, en mettant en relation les concepts des débits environnementaux et de sécheresse éco-hydrologique, que cette dernière peut être définie comme des épisodes pendant lesquels les débits d'un cours d'eau deviennent inférieurs aux débits environnementaux ; ceux-ci étant considérés comme des seuils minimums des débits en-deçà desquels les processus écologiques sont susceptibles d'être affectés ou perturbés par le déficit en eau (hydrique).

I.2.3.2. Application du concept de la sécheresse éco-hydrologique

Le concept de la sécheresse éco-hydrologique fait l'objet de plus en plus de travaux dans la littérature scientifique. Il existe ainsi de nombreux travaux consacrés aux impacts de cette sécheresse éco-hydrologique sur la végétation terrestre (e.g., Feng et al., 2018 ; Jiang et al., 2022 ; Parolari et al., 2014 ; Vose et al., 2016 ; Wang et al., 2012) ainsi que sur la faune et la flore aquatique (e.g., Kupferberg et al., 2021; Leigh and Datry, 2016; Nguyen et al., 2021; Rolls et al., 2018). En milieu fluvial, la plupart de ces études ont démontré que cette sécheresse impacte de manière significative la biodiversité des écosystèmes fluviaux (e.g., Leigh and Datry, 2016; Rolls et al., 2018).

CHAPITRE II

PROBLÉMATIQUE : REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LES APPLICATIONS DES CONCEPTS DES RÉGIMES DE DÉBITS NATURELS, DES DÉBITS ENVIRONNEMENTAUX ET DE LA SÉCHERESSE ECO-HYDROLOGIQUE AU QUÉBEC

II.1. Revue de littérature sur l'application du concept de régime de débits naturels au Québec

Le concept de régime des débits naturels a été déjà appliqué au Québec dans le cadre des études hydrologiques et hydro-climatiques.

En ce qui concerne les études hydrologiques, ce concept a été appliqué pour la première fois pour classifier et caractériser les régimes saisonniers des débits au Québec (Assani et Tardif, 2005). Dans cette étude, les auteurs ont défini trois caractéristiques fondamentales des débits saisonniers : la magnitude, la période d'occurrence des débits mensuels maximums et minimums et la variabilité. En se fondant sur les mêmes variables, Matteau et al. (2008) ont appliqué ce concept pour analyser les impacts des barrages sur les débits mensuels et saisonniers au moyen des méthodes multivariées (multidimensionnelles). Quant à Assani et al. (2006), ils ont analysé les facteurs de la variabilité spatiale des quatre caractéristiques des débits minimums annuels journaliers (les débits les plus faibles mesurés au cours d'une année) suivantes : la magnitude, la fréquence, la période d'occurrence et la variabilité. Assani et al. (2005) avaient déjà analysé les impacts des barrages sur deux de ces quatre caractéristiques de ces mêmes débits, à savoir, la magnitude et la variabilité. Plus récemment Assani (2022a) a appliqué ce concept pour analyser les facteurs de la variabilité spatiale, en particulier, les milieux humides, des caractéristiques des débits de crues printanières (magnitude, fréquence, durée, période d'occurrence et variabilité) en les comparant dans quatre bassins versants (Matawin, de la Petite Nation, Rimouski et Matane) d'une part, et celles des crues et des étiages estivo-automnaux en les comparant dans trois bassins versants (Matawin, de la Petite Nation et l'Assomption). Le même auteur a aussi appliqué ce concept pour analyser les impacts de la superficie des milieux humides sur les caractéristiques (magnitude,

durée, fréquence, période d'occurrence et variabilité) des débits de crues et d'étiages estivo-automnaux (Assani, 2022b) des rivières Matawin, de la Petite Nation et de l'Assomption. Enfin, Assani et al. (2023) ont comparé la variabilité spatio-temporelle de quatre caractéristiques (magnitude, durée, fréquence et variabilité) des débits maximums journaliers annuels dans 17 bassins versants différents. Cette étude leur a permis de développer le concept de « stockage en surface » pour expliquer les impacts des milieux humides sur cette variabilité spatio-temporelle des débits au Québec méridional.

Sur le plan hydro-climatique, plusieurs études se sont intéressées à déterminer la relation entre les indices climatiques et les caractéristiques des débits en s'appuyant sur le concept de régime des débits naturels. Assani et al. (2010a) ont analysé la relation entre les indices climatiques et quatre caractéristiques fondamentales des débits maximums journaliers annuels (la série des débits les plus élevés mesurés chaque année) de la rivière Vermillon. Les quatre caractéristiques fondamentales analysées sont les suivantes : la magnitude, la durée, la période d'occurrence et la variabilité. Dans leur étude, les auteurs ont proposé un diagramme qui permet de hiérarchiser les relations entre les cinq caractéristiques fondamentales. Mazouz et al. (2012, 2013) ont appliqué la même méthode mais en augmentant le nombre de rivières (17 rivières). De plus, ils ont ajouté la période d'occurrence de ces débits. Néanmoins, leurs études étaient fondées sur l'analyse des séries partielles (des séries hydrologiques constituées à partir d'un seuil d'un débit donné) plutôt que des séries annuelles analysées par les précédents auteurs. Enfin, Biron et al. (2014) ont analysé la relation entre les indices climatiques et les cinq caractéristiques (magnitude, durée, fréquence, période d'occurrence et variabilité) de la sécheresse hydrologique des niveaux d'eau du lac Ontario et des débits du fleuve Saint-Laurent.

En se fondant sur ce bilan de la revue de littérature sur l'application du concept de régime des débits naturels au Québec, on peut tout simplement conclure que ce concept y est encore relativement peu utilisé en hydrologie et en hydro-climatologie

II.2. Revue de littérature sur l'application du concept de débits environnementaux

Il existe encore très peu de travaux sur la détermination des débits environnementaux au Québec. Le premier travail de grande envergure réalisée à l'échelle de toute la province est celui de Belzile et al. (1996) sur les débits environnementaux pour protéger l'habitat du poisson. L'utilisation de ces débits a été recommandée par le Ministère d'Environnement, de la Faune et des Parcs à travers sa politique de débits réservés pour la protection du poisson et ses habitats (FAPAQ, 1999). On y reviendra en détail sur ces débits car ils constituent la base de notre projet de recherche. Outre ces débits, le Ministère avait aussi recommandé l'utilisation des débits d'étiages 7-jours (moyennes mobiles des débits d'étiages calculés sur une période de 7 jours consécutifs) de récurrence biennale (récurrence tous les deux ans, 7Q2) pour protéger l'ensemble des écosystèmes fluviaux. De fait, il recommande un prélèvement maximum d'eau d'une rivière qui ne doit pas dépasser 15% de 7Q2 (Berthot et al., 2020).

Dans sa thèse de doctorat consacrée aux débit environnementaux, Berthot (2019) a comparé cet indice (7Q2) à d'autres indices afin de pouvoir sélectionner les meilleurs indices qui permettent de protéger les écosystèmes fluviaux au Québec. Dans son étude, elle a démontré que le 7Q2, 7Q10 (débit minimum d'une moyenne mobile de 7 jours et une période de retour de dix ans), Q95 et Q90 (95e et 90e percentile des débits classés), sont conseillés pour les débits environnementaux, au lieu d'un seul (7Q2), au Québec méridional ».

Dans le cas de ces deux études, les débits environnementaux concernent seulement les débits d'étiages, c'est-à-dire, la quantité minimale d'eau qu'il faut absolument conserver dans un cours d'eau pour protéger l'habitat du poisson ou l'ensemble de la faune et de la flore aquatiques. À notre connaissance, il n'existe pas des débits environnementaux sur les débits de crues. Néanmoins, à la suite des graves inondations de 2017 et de 2019 qui ont coûté plus d'un milliard de dollars canadiens en dégâts matériels et humains, le gouvernement québécois s'est doté d'un plan de protection du territoire face aux inondations. Ce plan prévoit notamment de protéger les zones inondables en fonction de la récurrence des crues qui déterminent le degré de leurs expositions et leurs vulnérabilités à cet aléa hydroclimatique. Ainsi, tout le territoire qui peut être affecté par les crues de

réurrence ≤ 20 ans serait soustrait de tout établissement humain dans le futur. Les autres activités anthropiques y sont limitées. Des aménagements à l'intérieur de ce territoire sont prévus et peuvent être adaptés selon les régions.

II.3. Revue de littérature sur l'application du concept de la sécheresse éco-hydrologique

De nombreux travaux ont été déjà consacrés à la sécheresse hydrologique à travers l'analyse des débits d'étiages. Ces différents travaux ont abordé de nombreux aspects suivants : les facteurs de leur variabilité spatiale (Assani et al., 2006; Kinnard et al., 2022), temporelle (Assani et al., 2014; 2021; Biron et al., 2014; Ehsanzadeh et Adamowski, 2010; Khaliq et al., 2008, 2009), spatio-temporelle (Assani, 2023, Assani et al., 2021, 2022); leur régionalisation (Anctil et al., 2000; Daigle et al., 2011), leurs prédictions dans le cadre des changements climatiques (Quilbé et al. 2008), les impacts des changements du couvert et/ou de l'utilisation des sols (Assani, 2023; Blanchette et al., 2019; Fossey et Rousseau, 2016a, 2016b; Lavigne et al., 2004; Muma et al., 2011; Sylvain et al., 2015) et les impacts des barrages (Assani et al., 2005, Azouaoui et Assani, 2017).

Cependant, sur le plan hydro-climatique (analyse des facteurs qui influencent la variabilité spatio-temporelle des débits), il n'existe encore aucune étude sur la sécheresse éco-hydrologique qui tient compte des débits environnementaux, c'est-à-dire des débits destinés exclusivement à protéger les habitats de différentes espèces de poissons qui peuplent les rivières du Québec. C'est une lacune qui est impérative de combler dans le cadre de la protection des écosystèmes fluviaux au Québec.

II.4. OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES DE LA RECHERCHE

À l'instar des autres régions du monde, en général, et celles de l'Amérique du Nord, en particulier, le Québec est confronté aux impacts du réchauffement climatique. Sur le plan climatique, outre la hausse significative des températures durant toutes les saisons, il a été démontré que ce réchauffement se traduit par une baisse significative de la quantité de neige, qui est la principale source d'eau au Québec en raison de son climat tempéré froid. Cependant, cette baisse s'accompagne, en revanche, d'une hausse

significative de la quantité de pluies durant les quatre saisons (Assani et al., 2019; Brown, 2010, Guerfi et al., 2015).

Sur le plan hydrologique, ces changements des régimes des précipitations n'induisent pas les mêmes impacts sur les débits d'étiages saisonniers (sécheresse hydrologique). En effet, dans plusieurs études récentes, l'équipe du professeur Assani (Assani, 2023, Assani et al., 2021, 2022) a démontré que les impacts hydrologiques induits par les changements des régimes des précipitations sur la variabilité spatiale et temporelle des débits d'étiages dépendent principalement des superficies agricoles, particulièrement pendant la période estivale. En ce qui concerne la variabilité spatiale, les débits d'étiages les plus faibles sont mesurés dans les bassins versants les plus agricoles situés principalement en rive sud au sud du 47°N alors que les débits d'étiages les plus élevés sont mesurés dans les bassins versants les moins agricoles situés principalement en rive nord sur le Bouclier canadien. Quant à la variabilité temporelle, ces études ont clairement démontré que ces débits d'étiages augmentent significativement dans le temps dans les bassins versants les plus agricoles en raison de la diminution importante des superficies agricoles depuis 1950 au profit des jachères et du reboisement (Ruiz, 2019). En revanche, dans les bassins versants les moins agricoles de la rive nord, aucun changement significatif de ces débits d'étiages ne fut observé dans le temps. Mais dans les bassins moyennement agricoles situés au nord du 47°N en rive sud, les débits d'étiages ont significativement diminué dans le temps du fait que ces bassins versants reçoivent une plus grande quantité de neige qui a diminué dans le temps. Rappelons que les débits d'étiages en été sont principalement influencés par l'eau d'infiltration provenant de la fonte de neige au printemps (ex., Kinnard et al., 2022).

Par ailleurs, sur le plan hydroclimatique, Assani et al. (2019) ont démontré que les températures et les précipitations en été sont principalement influencées par les indices climatiques AMO (Oscillation Atlantique Multi-Décennale) et AO (Oscillation Arctique). Quant aux débits d'étiages estivaux-7 jours (7Q), ils sont principalement influencés par NAO (Oscillation Nord Atlantique). Mais cet indice est corrélé positivement aux débits d'étiages en rive nord mais négativement aux débits d'étiages en rive sud. Ce qui confirme une variabilité temporelle différente entre les deux rives.

À la lumière de ces considérations, notre projet de recherche poursuit les trois objectifs suivants.

1. Analyser la variabilité spatiale de l'intensité et de la durée de la sécheresse éco-hydrologique hivernale et estivale pour la protection des habitats de poisson au Québec méridional. L'hypothèse qui sous-tend cette relation est la suivante : à l'instar de celle des caractéristiques de la sécheresse hydrologique, la variabilité spatiale de ces deux caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique est principalement corrélée aux superficies agricoles.
2. Analyser la variabilité temporelle de l'intensité et de la durée de la sécheresse éco-hydrologique hivernale et estivale pour la protection de l'habitat du poisson au Québec méridional. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : les deux caractéristiques de cette sécheresse augmentent significativement dans le temps en rive sud au nord du 47°N dans les bassins versants les plus neigeux du Québec en raison de la diminution significative de la quantité de neige mais diminuent au sud de ce parallèle en rive sud dans les régions les plus agricoles en raison de la hausse de l'infiltration due à la diminution très importante de la superficie agricole. En rive nord, ces deux caractéristiques restent constantes.
3. Analyser la relation entre les indices climatiques et les deux caractéristiques (intensité et durée) de la sécheresse éco-hydrologique hivernale et estivale. Cet objectif repose sur l'hypothèse suivante : ces deux caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique sont principalement influencées par l'indice climatique NAO.

II.5. MATÉRIELS ET MÉTHODES

II.5.1. Choix des bassins versants et descriptions

Afin de comparer ultérieurement les résultats obtenus à ceux déjà publiés sur la sécheresse hydrologique au Québec, le choix des bassins versants analysés a été fondé sur deux critères principaux suivants: (1) l'existence de séries continues de débits journaliers

couvrant une longue période (1950-2023) et (2) la disponibilité des données relatives aux variables physiographiques et climatiques.

Sur la base de ces critères, 17 bassins versants ont été retenus (Figure 1). Ces bassins versants sont répartis dans les trois régions hydroclimatiques définies au Québec méridional (e.g., Assani et al., 2010a).

La première région hydroclimatique, dite du sud-est, est située au sud du 47°N en rive sud du fleuve Saint-Laurent. Elle est caractérisée par un climat de type tempéré mixte (continental et maritime). Les rivières de cette région drainent principalement les roches et les dépôts sédimentaires des formations géologiques des Appalaches, une ancienne chaîne de montagnes plissée et érodée, ainsi que des Basses Terres du Saint-Laurent, caractérisées par une topographie relativement plane.

La deuxième région hydroclimatique, dite de l'est, est également située en rive sud, mais au nord du 47°N. Elle se distingue par un climat tempéré froid maritime à forte influence océanique. Les rivières de cette région entaillent principalement les roches sédimentaires des Appalaches.

Enfin, la troisième région hydroclimatique, dite du sud-ouest, est située en rive nord du fleuve Saint-Laurent. Elle est caractérisée par un climat tempéré typiquement continental. Les rivières de cette région sont presque entièrement localisées sur le Bouclier canadien, constitué essentiellement de roches magmatiques et métamorphiques, recouvertes localement par des dépôts sédimentaires d'origine fluviale et glaciaire.

Dans les trois régions hydroclimatiques, les précipitations tombent principalement sous forme de neige en hiver. Toutefois, la quantité de neige est généralement moins élevée en rive nord qu'en rive sud. Sur cette dernière rive, elle est plus importante au nord (région hydroclimatique de l'est) qu'au sud (région hydroclimatique du sud-est) du 47°N.

Sur le plan de l'occupation du sol, les superficies agricoles sont nettement plus étendues en rive sud (supérieures à 10 % en moyenne) qu'en rive nord (inférieures à 5 % en moyenne). Elles sont également plus importantes au sud (supérieures à 30 % en moyenne) qu'au nord (inférieures à 20 %) du 47°N (tableau 1). À l'inverse, les superficies des milieux humides et des forêts sont plus importantes en rive nord qu'en rive sud.

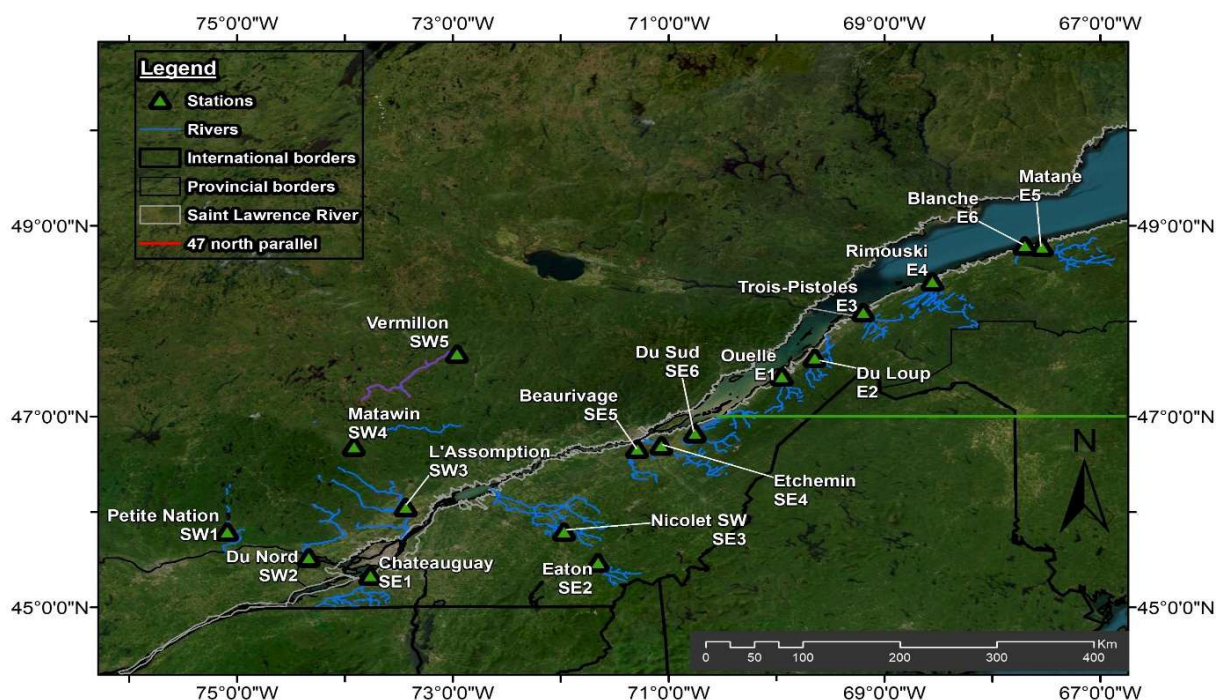


Figure 1. Les 17 rivières qui seront analysées. SW = Région hydroclimatique du sud-ouest (rive nord) ; SE = Région hydroclimatique du sud-est (rive sud au sud du 47°N); E = Région hydroclimatique d'est (rive sud au nord du 47°N)

II.5.2. Sources de données et méthodes d'estimation des débits réservés éco-hydrologique.

Les données de débits journaliers ont été extraites du site web du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), relevant du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/index.htm>, consulté en novembre 2023).

Les données des variables climatiques proviennent de données de la réanalyse d'ERA5-Land produite par Copernicus Climate Data Store couvrant la période 1950 à 2025 (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.

Les variables physiographiques des bassins versants analysés proviennent du laboratoire de glaciologie de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Elles incluent la pente moyenne (m/km), la densité de drainage (km/km²), ainsi que les superficies relatives de l'agriculture, de l'urbanisation, des forêts et des milieux humides. Ces superficies ont été exprimées en pourcentage de la superficie totale des bassins versants. Les milieux humides incluent également les plans d'eau tels que les petits lacs. Ces données ont été tirées dans l'ouvrage de Belzile et al. (1997). Les méthodes de mesure de ces variables ont été décrites en détail dans des travaux antérieurs (e.g., Assani et al., 2022 ; Kinnard et al., 2022). Ces données ont été complétées par celles publiées par Belzile et al. (1997).

En ce qui concerne les indices climatiques, les données mensuelles ont été extraites du site de la NOAA (<https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/>, consulté en novembre 2024). Les indices retenus pour analyser leur influence sur la variabilité temporelle des variables hydroclimatiques au Québec méridional incluent AMO (Oscillation Multi-Décennale Atlantique), AO (Oscillation Arctique), NAO (Oscillation Nord Atlantique), Niño 3.4 (El Niño/Oscillation Australe), PDO (Oscillation Pacifique Décennale) et PNA (Oscillation Nord Amérique-Océan Pacifique), à l'instar des études antérieures (e.g., Assani et al., 2010a, 2010b, 2011, 2019 ; Beauchamp et al., 2015 ; Guerfi et al., 2015). À ces indices s'ajoute l'indice de réchauffement climatique global (Global Mean Land/Ocean Temperature, GMLOT), récemment utilisé au Québec (Goulet et al., 2024), qui a mis en évidence une corrélation négative avec les niveaux d'eau du lac Mégantic. Pour la période 1950-2023, quatre séries temporelles ont été constituées pour chaque indice climatique : les moyennes trimestrielles de janvier à mars (JFM), les moyennes quadrimestrielles de janvier à avril (JFMA), les moyennes trimestrielles de juin à août (JJA) et les moyennes quadrimestrielles de juin à septembre (JJAS). Seuls, ces derniers indices quadrimestriels étaient mieux corrélés à la durée et à l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique.

En ce qui concerne les débits réservés éco-hydrologiques, sur la base d'une vaste étude et des enquêtes de terrain auprès des gestionnaires de la faune ichtyologique des différentes régions administratives du Québec, Belzile et al. (1997) ont développé une

méthode de calcul pour estimer ces débits afin de protéger l'habitat du poisson à l'échelle de tout le Québec. De fait, la méthode de calcul de ces débits tient compte des diverses espèces de poissons peuplant les rivières du Québec et des particularités de leur cycle vital. Sur le plan hydrologique, la méthode s'appuie sur l'analyse statistique des données des débits mesurés sur une période d'au moins dix ans. Cette analyse statistique a été fondée sur la sélection rigoureuse et la combinaison des nombreux indices des débits réservés, basés principalement sur les méthodes hydrologiques, proposés dans la littérature scientifique (méthode de Montana connue sous le nom de la méthode de Tennant, méthode de la Nouvelle-Angleterre ou Aquatic base flow, le 0.25MAF ou la valeur correspondant à 25% des débits moyens annuels, etc.). La combinaison de ces différentes méthodes hydrologiques et la prise en compte des aspects écologiques sur les cycles vitaux des différentes espèces de poissons du Québec ont permis à Belzile et al. (1997) de proposer une formule générale pour calculer et estimer les débits réservés éco-hydrologiques de tous les cours d'eau du Québec méridional aux échelles annuelles et saisonnières pour protéger l'habitat du poisson même en l'absence de toute mesure continue des débits journaliers. Ces auteurs ont ainsi proposé la formule générale suivante :

$$Q_r = e^k S^a \quad (1)$$

Q_r est le débit réservé éco-hydrologique pour protéger l'habitat du poisson, e est une constante (fonction népérienne), S est la superficie du bassin versant en km^2 , k et a sont des coefficients régionalisés et saisonnalisés. Belzile et al. (1997) ont regroupé les rivières du Québec en 14 régions éco-hydrologiques homogènes (synthèse des régions hydrologiques et écologiques homogènes). Les valeurs de a et k sont spécifiques pour chacune de ces 14 régions éco-hydrologiques et pour chacune de quatre saisons (hiver, printemps, été et automne). Elles sont décrites en détail dans l'ouvrage des auteurs.

Dans sa publication sur la « Politique des débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats » en 1999, Faune et Parcs Québec, une agence gouvernementale du Ministère d'Environnement du Québec, avait recommandé de privilégier l'utilisation de cette méthode de Belzile et al. (1997) pour protéger l'habitat du

poisson dans tous les projets d'aménagements des cours d'eau. Elle a justifié cette recommandation en ces termes « Parmi les méthodes hydrologiques disponibles, Faune et Parcs Québec ainsi que le ministère de l'Environnement du Québec recommandent l'utilisation de la méthode éco-hydrologique de Belzile et al. (1997) mise au point pour les rivières du Québec. Cette méthode prend en considération les facteurs écologiques, hydrologiques et géographiques propres aux cours d'eau de la province. Elle tient compte des espèces présentes dans l'ensemble des bassins versants du Québec ainsi que des stades critiques de leur cycle vital, ce que les autres méthodes hydrologiques ne font pas. » C'est la raison pour laquelle on a choisi cette méthode qui a été élaborée spécifiquement pour le Québec méridional afin de protéger les habitats de différentes espèces de poissons présentes dans les rivières de la Province. Le BAPE (Bureau d'Audiences Publiques en Environnement) recommande aussi de privilégier l'application de cette méthode dans tous les projets susceptibles d'avoir des impacts sur les débits de rivières.

II.5.3. Définition et constitution des séries des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique

On parle de sécheresse éco-hydrologique lorsque les débits journaliers d'une rivière deviennent inférieurs aux débits réservés éco-hydrologiques (débits environnementaux) définis par Belzile et al. (1997) pour protéger les habitats des différentes espèces de poissons au Québec méridional. Sur la base de cette définition, deux caractéristiques de cette sécheresse éco-hydrologique ont été définies en appliquant le concept de régime des débits naturels (Poff et al., 1997), soit la durée et l'intensité.

- La durée de la sécheresse éco-hydrologique correspond au nombre total de jours pendant lesquels les débits journaliers sont inférieurs aux débits réservés éco-hydrologiques calculés à l'aide de la formule (1), au cours des saisons hivernale (de janvier à avril) et estivale (de juin à septembre), pour chaque année de la période 1950-2023.
- L'intensité (I_{max}) de la sécheresse éco-hydrologique correspond à l'écart maximal entre le débit réservé éco-hydrologique (Q_r) et le débit minimum journalier le plus faible (Q_{min}) observé au cours d'une même saison (hivernale ou estivale) pour

chaque année de la période 1950-2023. Cet écart, exprimé en pourcentage, est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_{\max} = (Q_r - Q_{\min}) \times 100 / Q_r \quad (2)$$

Sur le plan écologique, Q_r représente le débit minimal requis pour assurer la protection de l'habitat du poisson. Théoriquement, dans ces conditions, $Q_r = Q_{\min}$. Lorsque $I_{\max}$ est négatif ($I_{\max} < 0$), le débit réservé éco-hydrologique est inférieur au débit minimum journalier observé, ce qui signifie qu'aucune sécheresse éco-hydrologique ne s'est produite durant la saison considérée. En revanche, lorsque $I_{\max}$ est positif ($I_{\max} > 0$), une sécheresse éco-hydrologique est survenue.

Sur le plan statistique, l'utilisation simultanée de valeurs négatives et positives de $I_{\max}$ permet l'application des tests de tendance. En effet, si seules des valeurs positives étaient retenues, la présence de nombreuses valeurs nulles poserait des problèmes d'applicabilité des tests statistiques. Enfin, l'expression de l'intensité en pourcentage permet de comparer les résultats entre des bassins versants de superficies différentes.

Enfin, le choix des saisons estivale et hivernale dans le cadre de cette étude se justifie par leur rôle fondamental dans le fonctionnement hydrologique des cours d'eau et dans la dynamique des habitats aquatiques au Québec méridional.

La saison estivale (de juin à septembre) correspond à la période des basses eaux, période durant laquelle on enregistre généralement les débits les plus faibles dans les rivières du Québec. Elle est particulièrement critique pour les écosystèmes aquatiques, car c'est pendant cette période que s'accomplissent plusieurs phases essentielles des cycles vitaux des poissons, notamment l'alimentation de toutes les espèces, la montaison du saumon atlantique et la migration de l'anguille d'Amérique (Belzile et al., 1997). Les conditions hydrologiques estivales influencent donc directement la disponibilité des habitats et la survie des espèces.

La saison hivernale (de janvier à avril) revêt également une importance majeure. Elle correspond à une période durant laquelle les conditions hydrologiques sont fortement influencées par la présence du couvert nival, les processus de gel et les apports hydriques issus de la neige. Des débits trop faibles en hiver peuvent entraîner une réduction significative des habitats aquatiques disponibles, compromettre la survie des espèces et

affecter leur croissance, avec des répercussions directes sur les conditions écologiques observées en été. Par ailleurs, les changements climatiques, notamment la diminution de la quantité de neige et l'augmentation des précipitations liquides, modifient profondément le régime hydrologique hivernal, ce qui justifie pleinement l'intégration de cette saison dans l'analyse de la sécheresse éco-hydrologique.

Ainsi, la prise en compte conjointe des saisons hivernale et estivale permet de mieux comprendre les interactions entre les processus climatiques, hydrologiques et écologiques, ainsi que leur influence sur la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse éco-hydrologique au Québec méridional.

Enfin, on a exclu la fréquence de la sécheresse éco-hydrologique observée durant une saison dans le cadre de cette étude, car ses valeurs variaient peu d'une rivière à une autre, d'une part, et d'une année à une autre pour une même rivière, d'autre part. De fait, elles variaient entre 0 et 2 si bien que leurs valeurs moyennes oscillaient autour de 1.

II.5.4. L'analyse statistique des données

L'analyse statistique des données a été réalisée en quatre étapes.

À la première étape, consacrée à l'analyse des facteurs de la variabilité spatiale des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique hivernale et estivale, les moyennes de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique calculées pour les 17 rivières ont été comparées au moyen du test classique paramétrique d'analyse de variance (ANOVA). Pour identifier les rivières dont les moyennes sont significativement différentes, on a comparé les moyennes des différentes paires de rivières au moyen du test post-hoc de Tukey.

À la deuxième étape, les moyennes de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique de 17 rivières ont été corrélées aux variables physiographiques et climatiques à l'aide de la méthode de corrélation linéaire afin pouvoir d'identifier les principaux facteurs explicatifs de la variabilité spatiale.

À la troisième étape, les séries temporelles de l'intensité et de la durée de la sécheresse éco-hydrologique hivernale et estivale, constituées pour la période 1950-2023, ont été soumises à une analyse de tendance à long terme. Quatre tests statistiques de Mann-

Kendall (MK) ont été utilisés. Le premier correspond au test original de Mann-Kendall (Sneyers, 1975). Toutefois, ce test ne permettant pas d'éliminer les effets de persistance à court et à long terme, trois versions modifiées ont également été appliquées. Deux de ces tests permettent d'éliminer les effets de persistance à court terme, soit par pré-filtrage des données (TFPW ; von Storch, 1985), soit par correction de la variance (MMKY ; Yue et al., 2002). Le dernier test (LTP ; Hamed, 2009) permet de corriger les effets de persistance à long terme. L'ensemble de ces tests, largement décrits dans la littérature scientifique, a permis de déterminer si les moyennes des séries de la durée et de l'intensité ont augmenté, diminué ou sont restées stables au cours de la période 1950-2023.

À la dernière étape, les séries temporelles de l'intensité et de la durée de la sécheresse éco-hydrologique hivernale et estivale ont été mises en relation avec celles des indices climatiques saisonniers sur la période 1950-2023 au moyen de l'analyse de redondance (Legendre et al., 2011 ; Mazouz et al., 2013). Cette analyse est une combinaison des analyses en composantes principales (ACP) des régressions multiples. Elle a été appliquée aux matrices des variables indépendantes constituées de huit colonnes (indices climatiques) et 53 lignes (nombre total d'années d'observation) et aux matrices des variables dépendantes composées de 17 colonnes (rivières analysées) et 53 lignes (nombre total d'années). Quatre analyses de redondance ont été ainsi effectuées: deux sur la durée en hiver et en été et deux autres, sur les intensités en hiver et en été. Pour éliminer l'effet d'autocorrélation des variables, on a appliqué la méthode suggérée par Baho et al. (2015). Les données de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique ont été standardisées (centrées et réduites).

II. 6. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

II.6.1. Comparaison de la variabilité spatiale des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique

Les moyennes de la durée en jours de la sécheresse éco-hydrologique calculées pendant la période 1950-2023 sont présentées aux figures 3 (hiver) et 4 (été). L'application de l'analyse de variance a mis en évidence une différence significative des moyennes entre les rivières analysées ($p < 0.0001$). Elles sont plus élevées en rive sud qu'en rive nord ($p < 0.0001$). Elles varient entre 0 jour dans le bassin versant de la rivière Assomption en rive nord (SW3) et plus de 55 jours dans le bassin versant de la rivière Ouelle en rive sud (E1). Sur cette dernière rive, les valeurs de ces moyennes sont globalement plus élevées au nord qu'au sud du 47°N. En été, l'analyse de variance et le test post-hoc de Tukey ont également révélé une différence significative entre les rivières ($p < 0.0001$). En revanche, il n'existe pas de différence significative entre les rivières de la rive nord et celles de la rive sud observée en hiver.

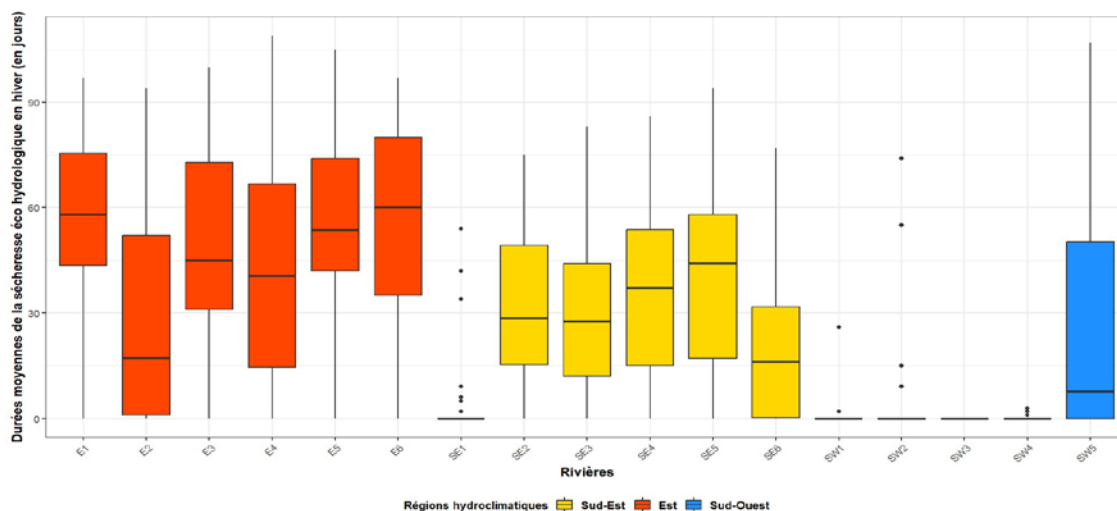


Figure 2. Durées moyennes de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023)

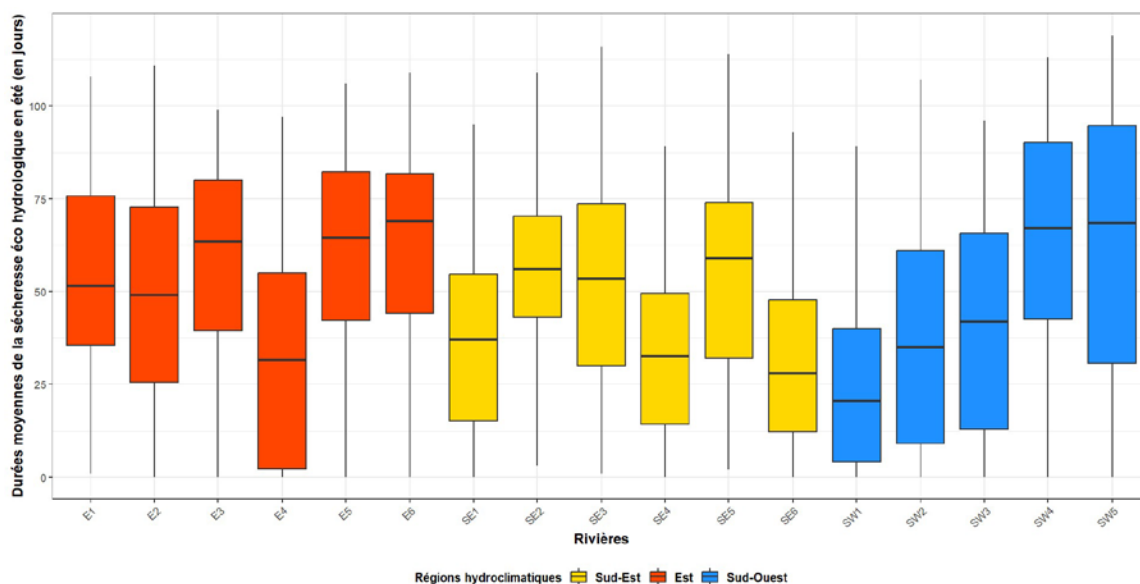


Figure 3. Durées moyennes de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023)

Quant aux moyennes de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique, leur variabilité spatiale suit également la même tendance (figures 5 et 6). En hiver, leurs valeurs moyennes sont négatives en rive nord (à l'exception de la rivière Vermillon, SW5) mais positives en rive sud (à l'exception de la rivière Châteaugay, SE1). En été, les différences des moyennes ont également été observées entre les rivières mais pas entre les régions hydroclimatiques.

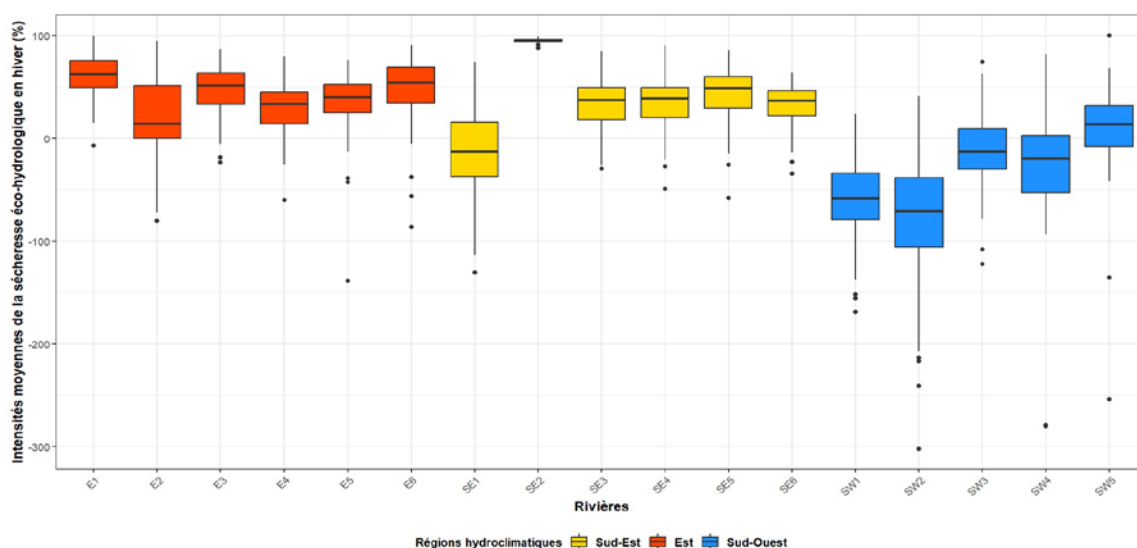


Figure 4. Intensités moyennes de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023)

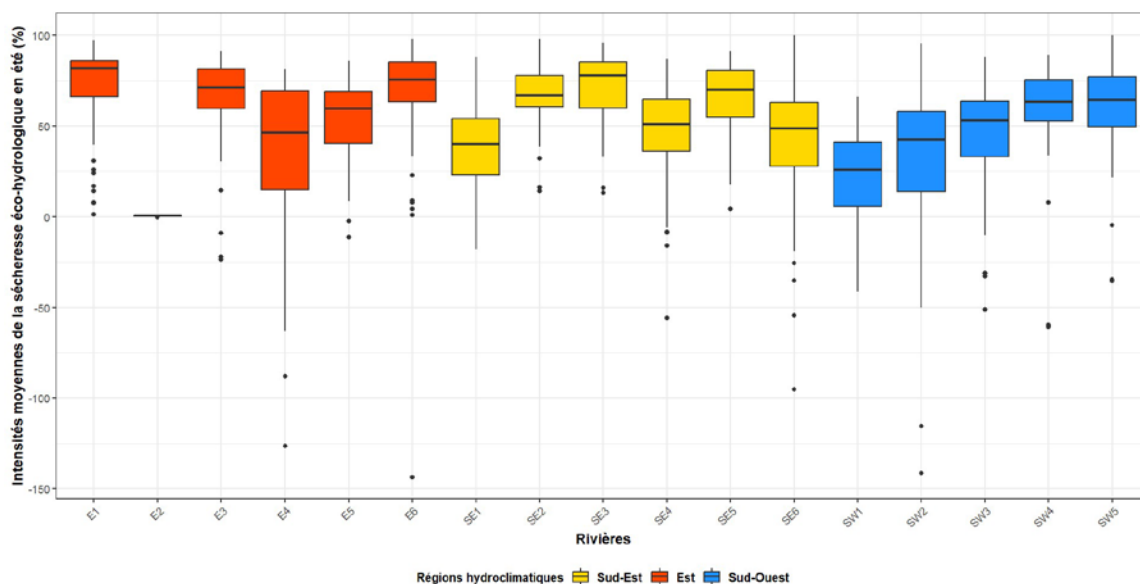


Figure 5. Intensités moyennes de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023)

II.6.2. Comparaison de la corrélation entre les caractéristiques (durée et intensité) de la sécheresse éco-hydrologique et les variables physiographiques et hydroclimatiques en hiver et en été

Les valeurs des coefficients de corrélation calculées entre les caractéristiques (intensité et durée) de la sécheresse éco-hydrologique et les variables physiographiques et hydroclimatiques sont présentées aux tableaux 1 et 2. En hiver, les moyennes de la durée de la sécheresse éco-hydrologique sont corrélées significativement négativement à la superficie des milieux humides ainsi qu'aux températures maximums moyennes journalières hivernales et celles des mois de mars et d'avril. En revanche, elles sont corrélées positivement à l'équivalent en eau de la neige. En été, les moyennes de la durée de la sécheresse éco-hydrologique ne sont corrélées à aucune variable explicative.

Tableau 4. Comparaison des valeurs des coefficients de corrélation (R) calculées entre la durée de la sécheresse éco-hydrologique et les variables physio-climatiques en hiver et en été.

Hiver		Été	
Variables	R	Variables	R
Variables physiographiques			
Superficies des bassins versants (km²)	-0,3464	Superficies des bassins versants (km²)	-0,1165
Densité de drainage (Km/Km)	0,3227	Densité de drainage (Km/Km)	-0,0567
Pente moyenne des bassins versants (°)	-0,0995	Pente moyenne des bassins versants (°)	-0,1551
Superficies des forêts (%)	0,1197	Superficies des forêts (%)	0,0319
Superficies agricoles (%)	-0,2135	Superficies agricoles (%)	0,1038
Superficies des milieux humides (%)	-0,5910**	Superficies des milieux humides (%)	-0,1102
Variables climatiques			
Pluies totales saisonnières (mm)	0,0037	Pluies totales saisonnières (mm)	0,0028
Neiges totales saisonnières (mm)	0,2378	Températures maximums moyennes journalières saisonnières (°C)	-0,3538
Précipitations totales saisonnières (mm)	0,2118	Températures moyennes journalières saisonnières (°C)	-0,4079
Équivalent en eau de la neige (mm)	0,4303*	Évapotranspiration totale (mm)	0,0884
Températures maximums moyennes journalières saisonnières (°C)	-0,4209*		
Températures moyennes journalières saisonnières (°C)	-0,3168		
Températures maximums moyennes journalières de mars (°C)	-0,4520*		
Températures maximums moyennes journalières en avril (°C)	-0,5651**		

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

Quant aux moyennes des intensités de la sécheresse éco-hydrologique, elles sont corrélées négativement aux superficies des milieux humides mais positivement aux précipitations totales estivales (tableau 2). En été, elles ne sont plus corrélées à aucune variable explicative.

Tableau 5. Comparaison des valeurs des coefficients de corrélation (R) calculées entre l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique et les variables physio-climatiques en hiver et en été.

Hiver		Été	
Variables	R	Variables	R
Variables physiographiques			
Superficies des bassins versants (km²)	-0,3932	Superficies des bassins versants (km²)	-0,2903
Densité de drainage (Km/Km)	0,2440	Densité de drainage (Km/Km)	0,0664
Pente moyenne des bassins versants (°)	-0,2255	Pente moyenne des bassins versants (°)	-0,1046
Superficies des forêts (%)	0,0067	Superficies des forêts (%)	-0,0474
Superficies agricoles (%)	0,3134	Superficies agricoles (%)	0,254
Superficies des milieux humides (%)	-0,6819**	Superficies des milieux humides (%)	-0,2197
Variables climatiques			
Pluies totales saisonnières (mm)	0,1560	Pluies totales saisonnières (mm)	0,2635
Neiges totales saisonnières (mm)	0,2378	Températures maximums moyennes journalières saisonnières (°C)	-0,1075
Précipitations totales saisonnières (mm)	0,3497	Températures moyennes journalières saisonnières (°C)	-0,1228
Équivalent en eau de la neige (mm)	0,1186	Évapotranspiration totale (mm)	0,1192
Températures maximums moyennes journalières saisonnières (°C)	-0,0766		
Températures moyennes journalières saisonnières (°C)	-0,0198		
Températures maximums moyennes journalières de mars (°C)	-0,1034		
Températures maximums moyennes journalières en avril (°C)	-0,2368		

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

II.6.3. Variabilité temporelle des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique

II.6.3.1. Analyse de la variabilité de la tendance à long terme des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique

Les résultats de l'application de quatre tests de Mann-Kendall sont présentés aux tableaux 3, 4, 5 et 6 ainsi qu'aux figures 5 à 14. En hiver (tableau 3, figures 5 et 6), en ce qui concerne la durée, la variabilité temporelle à long terme est caractérisée par une tendance à la baisse généralisée. En effet, toutes les valeurs de Z sont négatives à l'échelle de tout le Québec méridional. Néanmoins, elles sont statistiquement significatives aux seuils de 5 et de 10% pour la plupart des rivières de la rive sud (régions hydroclimatiques de sud-est et d'est). Il importe de noter que les séries analysées sont peu affectées par une persistance à long terme.

En revanche, en été (tableau 2 et figures 3, 4, et 5), les valeurs de Z deviennent positives pour la plupart des rivières (tableau 4). Ainsi, la variabilité temporelle de la durée durant cette saison est caractérisée par une tendance à la hausse quasi généralisée. Néanmoins, les valeurs de Z sont statistiquement significatives aux seuils de 5 et de 10% pour la moitié des rivières de la région hydroclimatique d'est en rive sud et pour plus de la moitié de celles de la région hydroclimatique du sud-ouest sur la rive nord. Cependant, dans la région hydroclimatique du sud-est, la plus agricole de la province, une seule rivière est caractérisée par une tendance à long-terme négative, Cette tendance n'est pas statistiquement significative pour les autres rivières de cette région hydroclimatique,

Tableau 6. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux séries de la durée de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023)

Rivières	MK		TFPW		MMKH		LTP	
	Z	P-value	Z	P-value	Z	P-value	Z	P-value
Région hydroclimatique du Sud-est								
Châteaugay	-	-	-	-	-	-	-	-
Eaton	-0,523	0,601	-1,286	0,198	-1,286	0,198	-0,419	0,684
Nicolet SW	-1,771*	0,077	-4,881**	0,000	-4,881**	0,000	-1,167	0,2459
Etchemin	-2,561**	0,010	-5,630**	0,000	-5,630**	0,000	-1,169	0,244
Beaurivage	-3,097**	0,002	-8,127**	0,000	-8,127**	0,000	-1,931*	0,054
Du Sud	-1,748*	0,081	-2,352**	0,019	-2,352**	0,019	-1,467	0,145
Région Hydroclimatique d'Est								
Ouelle	-1,616	0,106	-3,615**	0,000	-3,615**	0,000	-0,987	0,326
Du Loup	-3,782**	0,000	-6,947**	0,000	-6,947**	0,000	-2,130**	0,034

Trois-Pistoles	-2,619**	0,009	-5,505**	0,000	-5,505**	0,000	-1,825*	0,069
Rimouski	-1,085	0,278	-1,867*	0,062	-1,867*	0,062	-0,764	0,449
Matane	-1,368	0,171	-2,294**	0,000	-2,294**	0,022	-0,926	0,358
Blanche	-3,180**	0,002	-5,437**	0,000	-5,437**	0,000	-1,956**	0,051
Région Hydroclimatique du Sud-ouest								
Du Nord	-	-	-	-	-	-	-	-
Petite Nation	-	-	-	-	-	-	-	-
L'Assomption	-	-	-	-	-	-	-	-
Matawin	-	-	-	-	-	-	-	-
Vermillon	-2,124**	0,000	-2,363**	0,018	-2,363**	0,018	-1,355	0,177

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

Tableau 7. Résultats des tests de Mann-Kendall appliqués aux séries de la durée de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023)

Rivières	MK		TFPW		MMKH		LTP	
	Z	P-value	Z	P-value	Z	P-value	Z	P-value
Région hydroclimatique du Sud-est								
Châteaugay	-0,868	0,385	-0,652	0,514	-0,840	0,401	-0,771	0,445
Eaton	0,546	0,585	0,600	0,549	0,546	0,585	0,414	0,679
Nicolet SW	-0,654	0,513	-0,757	0,449	-0,699	0,484	-0,515	0,612
Etchemin	0,841	0,401	0,700	0,484	0,914	0,366	0,861	0,390
Beaurivage	-2,068**	0,039	-2,192**	0,028	-2,744**	0,006	-1,931*	0,054
Du Sud	0,416	0,678	0,538	0,590	0,416	0,677	0,448	0,654
Région Hydroclimatique d'Est								
Ouelle	1,340	0,180	1,376	0,220	1,458	0,145	1,091	0,275
Du Loup	0,974	0,427	0,852	0,394	0,522	0,602	0,379	0,705
Trois-Pistoles	1,685*	0,092	1,681*	0,093	2,000**	0,046	1,447	0,148
Rimouski	5,287**	0,000	5,177**	0,000	5,287**	0,000	3,900**	0,000
Matane	2,535**	0,011	2,653**	0,008	3,315**	0,001	2,430**	0,015
Blanche	-0,448	0,654	-0,471	0,637	-0,632	0,717	-0,125	0,825
Région Hydroclimatique du Sud-ouest								
Du Nord	1,348	0,178	1,633	0,102	1,448	0,148	1,116	0,264
Petite Nation	0,096	0,924	0,029	0,977	0,101	0,148	0,109	0,913
L'Assomption	2,317**	0,021	2,434**	0,015	3,920**	0,000	3,569**	0,000
Matawin	2,021**	0,043	1,910*	0,056	2,021**	0,043	1,873*	0,061
Vermillon	2,946**	0,003	2,872**	0,004	2,822**	0,005	2,138**	0,033

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

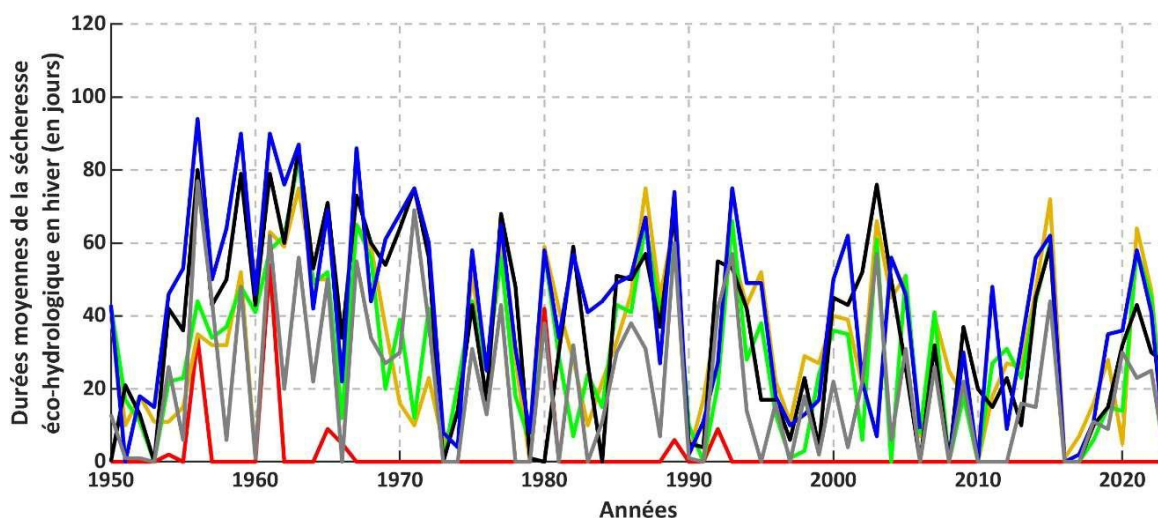


Figure 6. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en hiver dans la région hydroclimatique du sud-est (1950-2023). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.

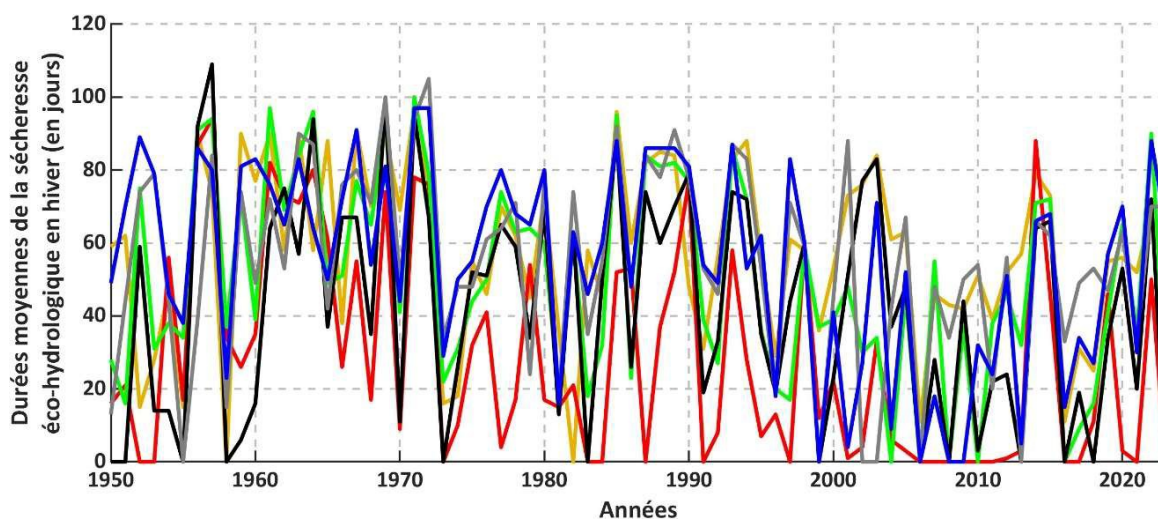


Figure 7. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en hiver dans la région hydroclimatique d'est (1950-2023). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : gris.

: rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Blanche : bleu.

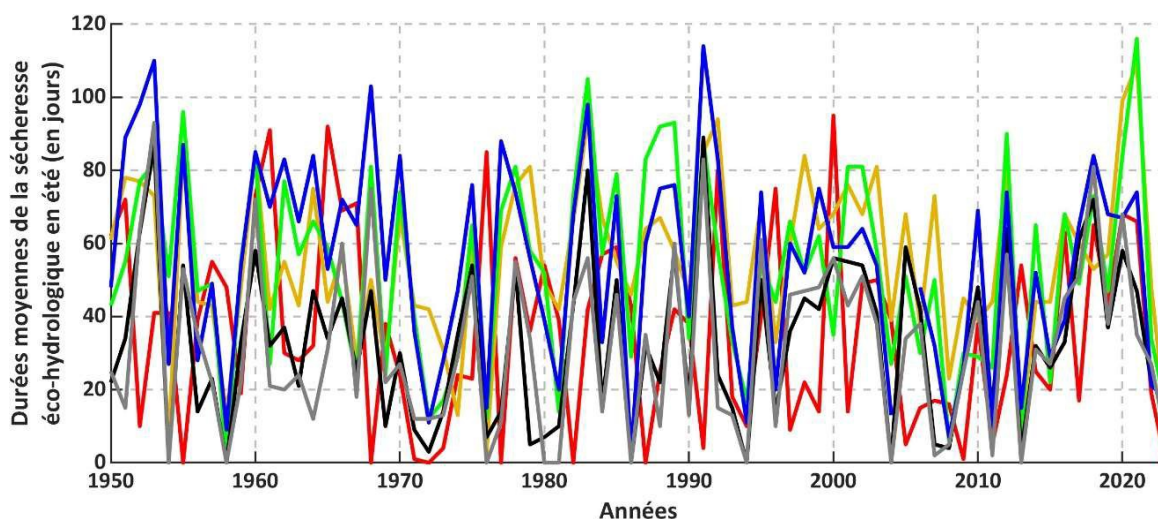


Figure 8. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique du sud-est (1950-2023). Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.

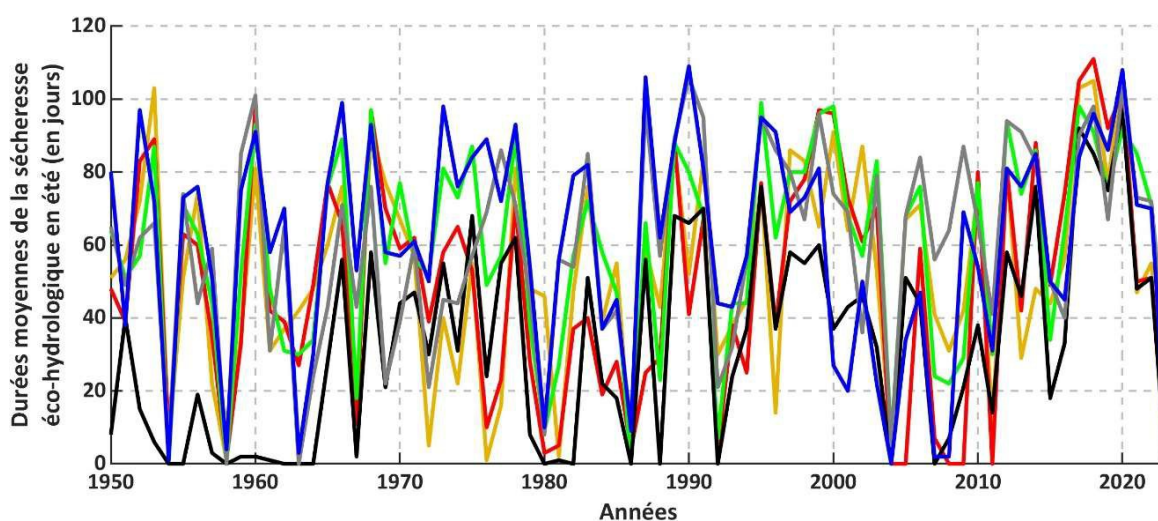


Figure 9. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique d'est (1950-2023). Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Blanche : bleu.

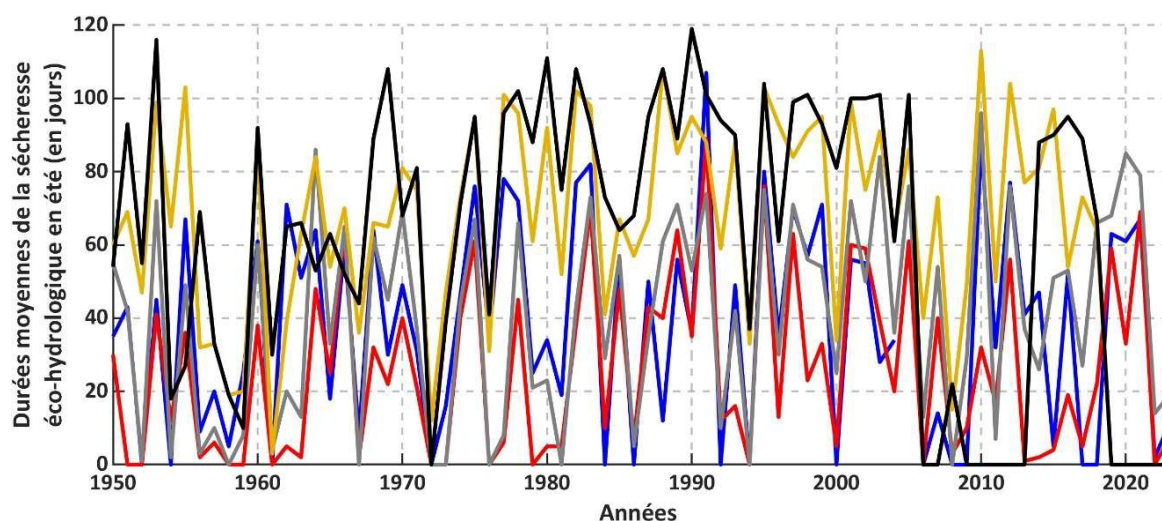


Figure 10. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique du sud-ouest (1950-2023). Rivière Petite Nation : bleu ; rivière Du Nord : rouge ; rivière L'Assomption : gris ; rivière Matawin : jaune ; rivière Vermillon : noir.

Quant aux intensités de la sécheresse éco-hydrologique, on observe la même différence entre les deux saisons (tableaux 5 et 6). En hiver, les valeurs de Z sont presque toutes négatives, c'est-à-dire, qu'elles traduisent une tendance à long terme des intensités à la baisse. En revanche, en été, on observe une tendance à la hausse, particulièrement dans les régions hydroclimatiques d'est en rive sud et du sud-ouest en rive nord. Dans la région hydroclimatique du sud-est, la tendance à long terme est plutôt à la baisse.

Tableau 8. Résultats des tests de Mann-Kendall appliquées aux séries de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023)

Rivières	MK		TFPW		MMKH		LTP	
	Z	P-value	Z	P-value	Z	P-value	Z	P-value
Région hydro-climatique du Sud-est								
Châteaugay	-2,431**	0,015	-2,291**	0,022	-7,702**	0,000	-2,023**	0,044
Eaton	-0,061	0,952	0,214	0,830	-0,145	0,885	-0,063	0,957
Nicolet SW	-2,702**	0,007	-2,481**	0,013	-9,229**	0,000	-2,732**	0,007
Etchemin	-2,483**	0,013	-2,843**	0,004	-6,175**	0,000	-1,639	0,102
Beaurivage	-4,452**	0,000	-4,662**	0,000	-11,663**	0,000	-3,011**	0,003
Du Sud	-1,895*	0,058	-2,005**	0,045	-6,749**	0,000	-1,785*	0,076
Région Hydro-climatique d'Est								
Ouelle	-0,453	0,651	-0,424	0,672	-0,562	0,574	-0,249	0,808

Du Loup	-4,233**	0,000	-4,758**	0,000	-9,340**	0,000	-1,964**	0,050
Trois-Pistoles	-4,088**	0,000	-4,100**	0,000	-8,942**	0,000	-2,986**	0,003
Rimouski	-0,233	0,816	-0,538	0,590	-0,303	0,762	-0,135	0,897
Matane	-2,352**	0,019	-2,767**	0,006	-4,529**	0,000	-1,136	0,177
Blanche	-4,733**	0,000	-4,786**	0,000	-5,849**	0,000	-2,871**	0,004
Région Hydro-climatique du Sud-ouest								
Du Nord	-1,852*	0,064	-2,100**	0,036	-6,259**	0,000	-1,980**	0,049
Petite Nation	-3,645**	0,000	-3,624**	0,000	-10,036**	0,000	-3,347**	0,001
L'Assomption	-1,414	0,157	-1,738*	0,082	-3,537**	0,000	-0,805	0,424
Matawin	-4,224**	0,000	-4,910**	0,000	-3,494**	0,000	-2,053**	0,041
Vermillon	-0,677	0,498	-1,243	0,214	-0,557	0,577	-0,249	0,806

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

Tableau 9. Résultats des tests de Mann-Kendall appliquées aux séries de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023)

Rivières	MK		TFPW		MMKH		LTP	
	Z	P-value	Z	P-value	Z	P-value	Z	P-value
Région hydroclimatique du Sud-est								
Châteaugay	-1,545	0,122	-1,338	0,181	-4,071**	0,000	-1,765*	0,079
Eaton	0,667	0,505	1,062	0,288	0,667	0,505	0,487	0,627
Nicolet SW	-2,964**	0,003	-2,986**	0,003	-2,964**	0,003	-2,086**	0,038
Etchemin	-0,583	0,560	-0,338	0,735	-0,583	0,560	-0,640	0,529
Beaurivage	-3,444**	0,001	-3,291**	0,001	-3,444**	0,001	-2,950**	0,003
Du Sud	0,429	0,668	0,452	0,651	0,429	0,668	0,437	0,662
Région Hydroclimatique d'Est								
Ouelle	1,050	0,294	1,110	0,267	0,970	0,332	0,827	0,408
Du Loup	-1,745**	0,081	-1,738**	0,082	-1,522	0,128	-0,850	0,398
Trois-Pistoles	2,558**	0,011	2,738**	0,006	3,554**	0,004	2,174**	0,030
Rimouski	4,975**	0,000	4,920**	0,000	4,975**	0,000	4,646**	0,000
Matane	2,679**	0,007	2,881**	0,004	2,678**	0,007	2,672**	0,008
Blanche	-0,938	0,348	-0,795	0,426	-1,188	0,235	-1,057	0,295
Région Hydroclimatique du Sud-ouest								
Du Nord	3,337**	0,001	3,386**	0,001	3,337**	0,001	2,131**	0,033
Petite Nation	0,633	0,527	0,647	0,518	0,633	0,527	0,666	0,506
L'Assomption	1,027	0,305	1,395	0,163	0,857	0,392	0,956	0,339
Matawin	1,274	0,203	1,157	0,247	1,712*	0,087	1,355	0,176
Vermillon	3,076**	0,002	3,357**	0,001	2,421**	0,016	3,572**	0,000

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

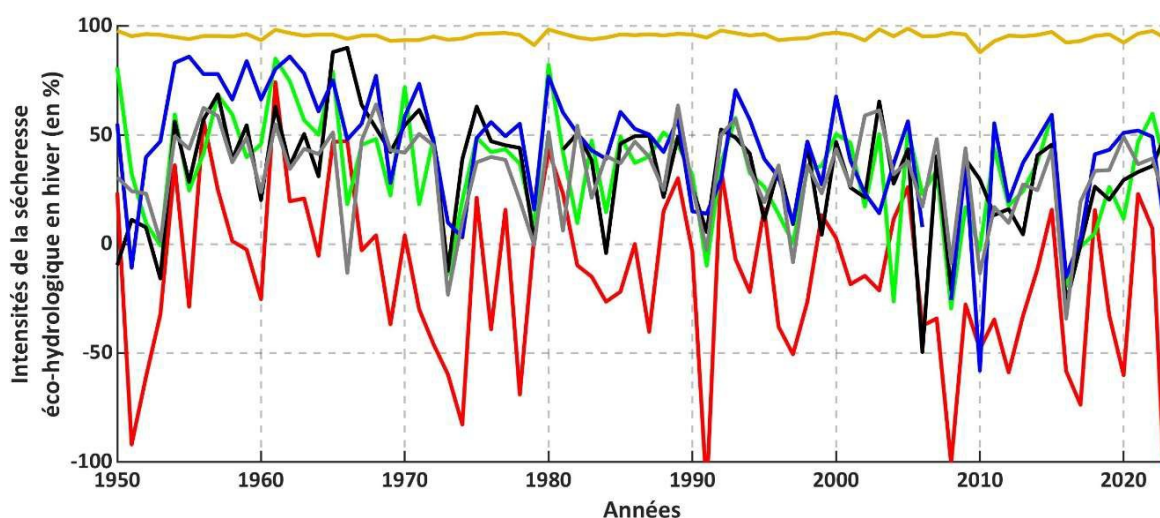


Figure 11. Variabilité interannuelle des intensités de la sécheresse éco-hydrologique en hiver dans la région hydroclimatique du sud-est (1950-2023), Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.

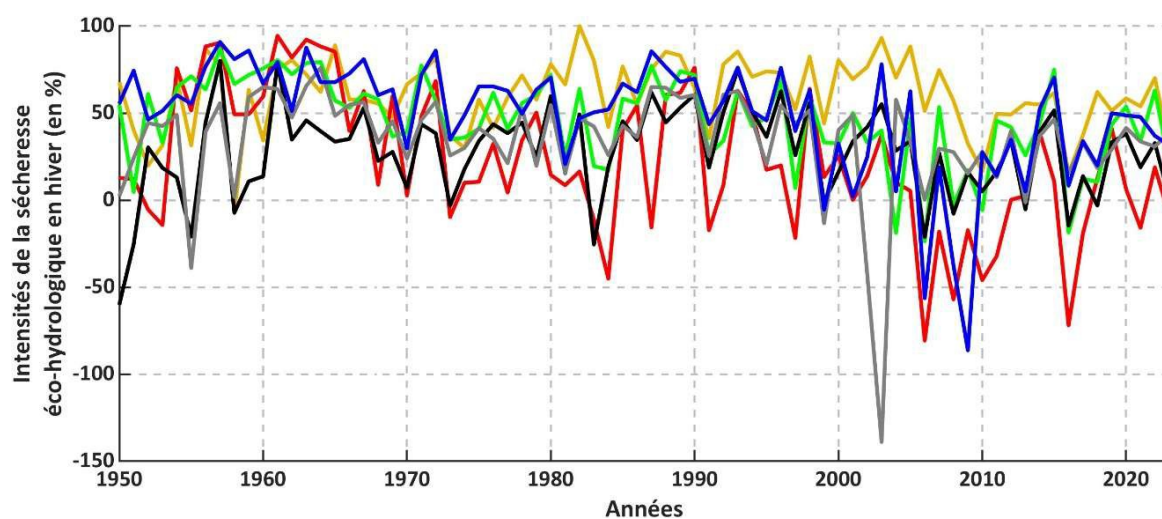


Figure 12. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en hiver dans la région hydroclimatique d'est (1950-2023), Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Blanche : bleu.

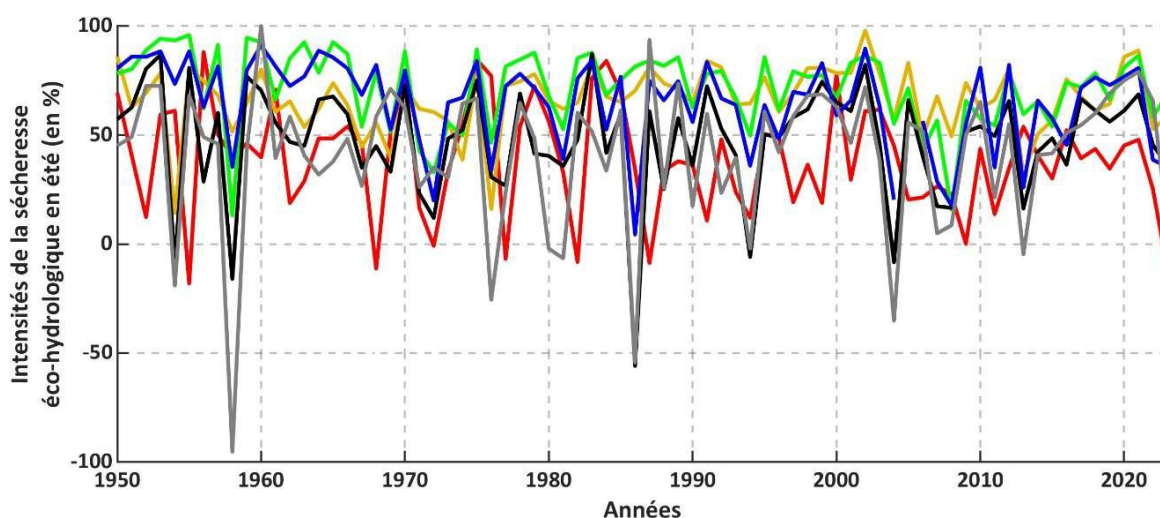


Figure 13. Variabilité interannuelle des intensités de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique du sud-est (1950-2023), Rivière Châteaugay : rouge ; rivière Eaton : jaune ; rivière Nicolet-Sud-Ouest : vert ; rivière Etchemin : noir ; rivière Beaurivage : bleu ; rivière Du Sud : gris.

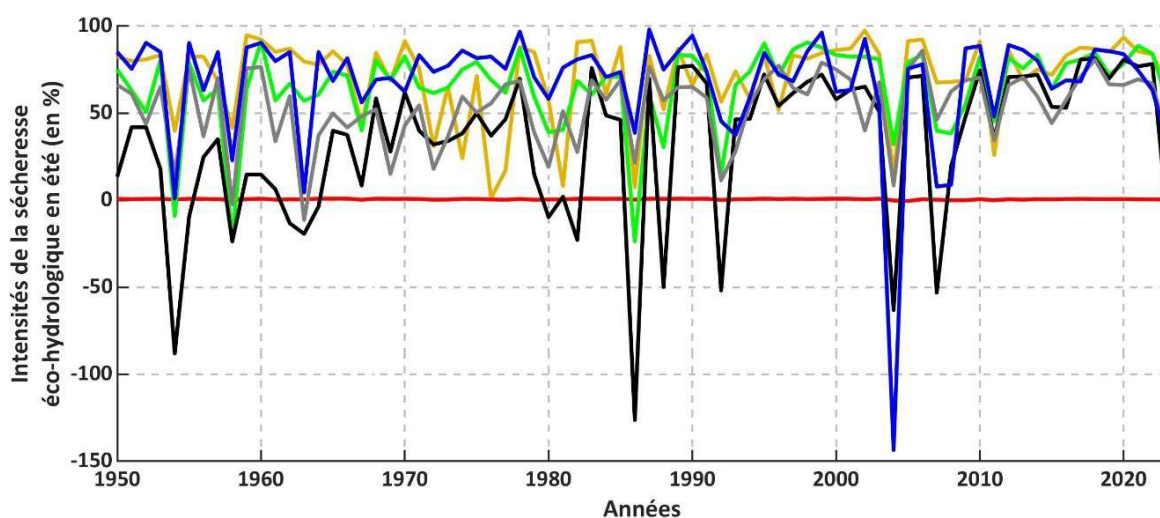


Figure 14. Variabilité interannuelle des durées de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique d'est (1950-2023), Rivière Ouelle : jaune ; rivière Du Loup : rouge ; rivière Trois-Pistoles : vert ; rivière Rimouski : noir ; rivière Matane : gris ; rivière Blanche : bleu.

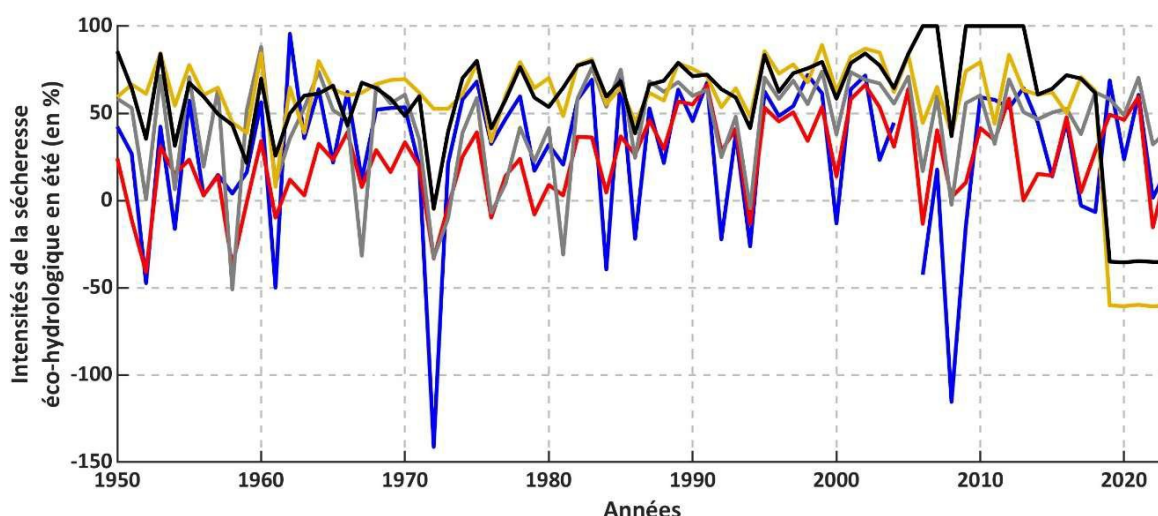


Figure 15. Variabilité interannuelle des intensités de la sécheresse éco-hydrologique en été dans la région hydroclimatique du sud-ouest (1950-2023), Rivière Petite Nation : bleu ; rivière Du Nord : rouge ; rivière L'Assomption : gris ; rivière Matawin : jaune ; rivière Vermillon : noir.

II.6.3.2. Analyse de la relation entre les indices climatiques et les caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique

Les résultats de l'analyse de redondance entre les indices climatiques et les deux caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique en hiver et en été sont présentés aux figures 15, 16, 17 et 18. Seul le premier axe de l'Analyse de redondance est statistiquement significatif au seuil de 5%. La part expliquée par cet axe varie entre 8 et 17%. En ce qui concerne les durées de cette sécheresse, elles sont corrélées significativement négativement aux indices de réchauffement climatique (GMLOT) et d'Oscillation Décennale Pacifique (PDO) mais positivement à l'indice d'Oscillation Arctique (AO). Cependant, cette dernière corrélation est beaucoup plus faible que celle observée avec les deux premiers indices. En été, outre le premier indice, les durées de la sécheresse éco-hydrologique sont également corrélées négativement aux indices des Oscillations Atlantique Multi-Décennale (AMO) et Nord Atlantique (NAO).

Quant aux intensités de la sécheresse éco-hydrologique, en hiver, elles sont principalement positivement corrélées à l'indice de réchauffement climatique (GMLOT) et, accessoirement, aux indices Nord Amérique-Pacifique (PNA) et de l'Oscillation

Décennale Pacifique (PDO). Elles sont très faiblement corrélées négativement à l'Oscillation Arctique (AO). En été, les intensités sont corrélées positivement aux indices de réchauffement climatique (GMLOT), de l'Oscillation Atlantique Multi-Décennale (AMO) et de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO).

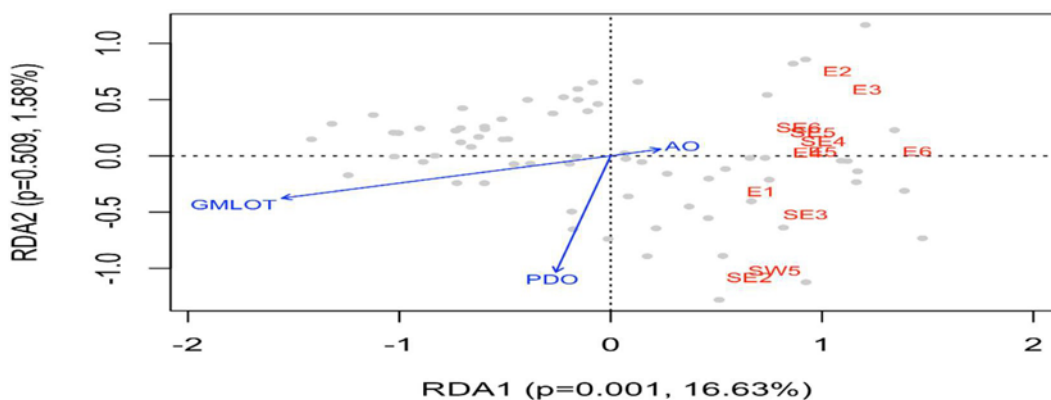


Figure 16. Relation entre les indices climatiques et la durée de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023), SE = stations analysées. Points gris= années.

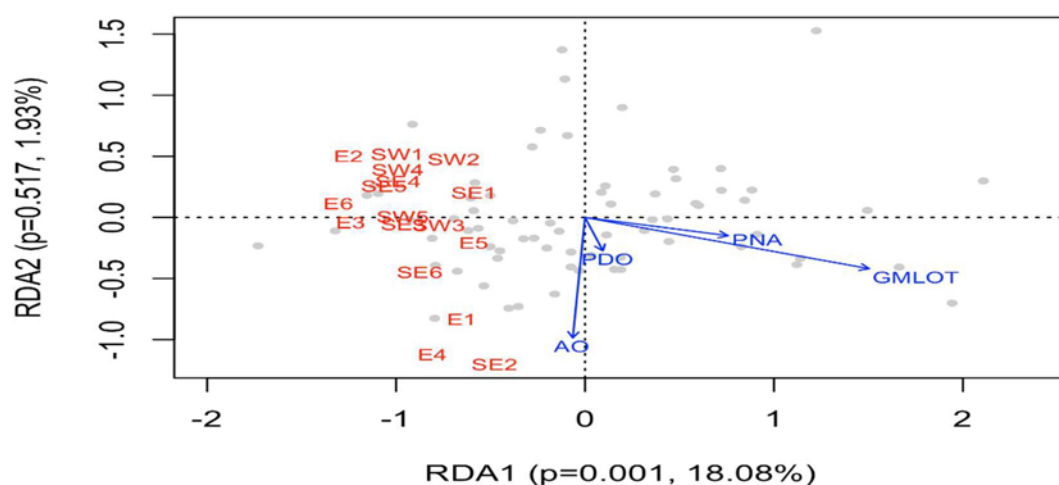


Figure 17. Relation entre les indices climatiques et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en hiver (1950-2023), SE = stations analysées. Points gris= années.

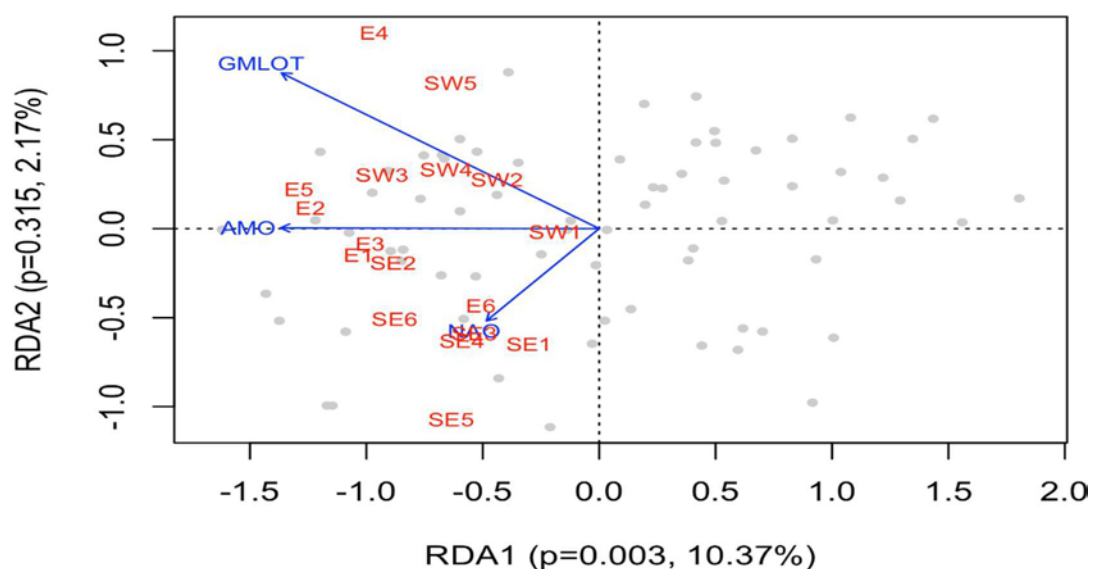


Figure 18. Relation entre les indices climatiques et la durée de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023), SE = stations analysées. Points gris= années.

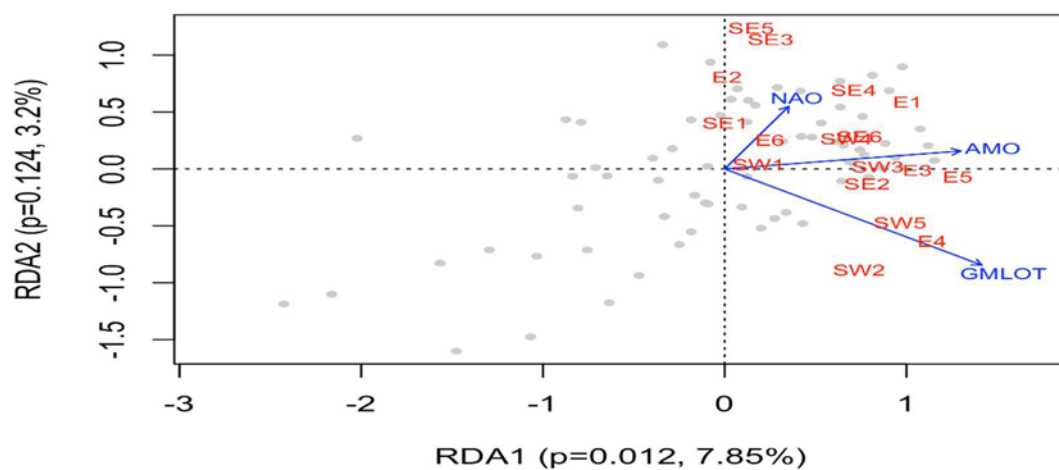


Figure 19. Relation entre les indices climatiques et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en été (1950-2023), SE = stations analysées. Points gris= années.

II.6.3.3. Comparaison de la relation entre les indices climatiques, les caractéristiques de la sécheresse et les variables climatiques

La comparaison de la relation entre les deux caractéristiques (durée et intensité) de la sécheresse éco-hydrologique et les indices climatiques d'une part, et celle entre ces indices climatiques et les variables climatiques, d'autre part, obtenues au moyen de l'analyse de redondance, est résumée au tableau 7. Il ressort de ce tableau que les températures sont corrélées positivement à l'indice climatique GMLOT en été et en hiver. Toutefois, durant cette dernière saison, les températures moyennes journalières sont principalement corrélées positivement à l'indice climatique AMO. Quant aux précipitations, en hiver, la neige (quantité et équivalent en eau) est corrélée à l'indice climatique PNA alors que les précipitations totales sont principalement corrélées positivement à NAO. En été, ces précipitations totales (pluies) sont corrélées négativement à l'indice NAO. Enfin, l'évapotranspiration est corrélée positivement à l'indice climatique GMLOT. Il importe de mentionner que les intensités et les durées de la sécheresse éco-hydrologique sont corrélées principalement à NAO particulièrement en été.

Tableau 10, Synthèse sur la relation entre les variables hydroclimatiques et les indices climatiques en hiver et en été (1950-2023)

Hiver		Été	
Variables hydroclimatiques	Principaux indices	Variables hydroclimatiques	Principaux indices
Variables hydrologiques			
Durées de la sécheresse	GMLOT (-)	Durées de la sécheresse	GLMOT (-), AMO (-), NAO (-)
Intensités de la sécheresse	GMLOT (+)	Intensités de la sécheresse	GMLOT (+), AMO (+), NAO (+)
Variables climatiques			
Tmax	GMOT (+)	Tmax	GMLOT (+)
Tmin	GMLOT (+) et NINO3,4 (+)	Tmin	GMLOT (+)

Tmoy	AMO (+)	Tmoy	GMLOT (+)
Équivalent en eau de la neige	PNA (+)	Précipitations totales	NAO (+)
Neige totale	PNA (+)	Évaporation totale	GMLOT (+)
Précipitations totales	NAO (+)		

Tmax= températures maximales journalières; Tmin = températures minimales journalières; Tmoy = températures moyennes journalières; + : corrélation positive significative ; - : corrélation négative significative.

II.6.4. Discussion

II.6.4.1. Variabilité spatiale des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique

Rappelons que l'analyse de la variabilité spatiale des caractéristiques (durée et intensité) de la sécheresse éco-hydrologique, au moyen de plusieurs méthodes statistiques, a mis en évidence une différence très nette entre les rivières de la rive nord et celles de la rive sud en hiver. De fait, la sécheresse éco-hydrologique est moins intense et dure, en moyenne, moins longtemps en rive nord qu'en rive sud. Sur cette dernière rive, il existe aussi une différence entre les bassins versants situés au sud (région hydroclimatique du sud-est) et ceux situés au nord (région hydroclimatique d'est) du 47°N. Ces derniers bassins versants sont caractérisés par des valeurs moyennes de durée et d'intensité de la sécheresse en éco-hydrologie plus élevées que celles des deux autres régions hydroclimatiques. Pour expliquer cette différence spatiale dans les caractéristiques de la sécheresse, l'analyse de corrélation a révélé que la durée et l'intensité sont corrélées négativement à la superficie des milieux humides et aux températures moyennes journalières saisonnières hivernales ainsi qu'à celles des mois de mars et d'avril, et à la quantité de pluies mais positivement à la quantité de neige.

L'influence des milieux humides sur la variabilité spatiale des débits d'étiages a déjà été démontrée largement à travers le concept d'effet d'éponge (voir les synthèses d'Acreman et Holden, 2013; Bullock and Acreman, 2003; Fritz et al., 2018; Jones et al.,

2018; Lane et al., 2018). Selon ce concept, les milieux humides soutiennent les débits pendant les périodes de sécheresse (étiages) par le stockage et l'infiltration de l'eau stockée lors des périodes humides (pluvieuses). Ce concept a également évoqué pour expliquer les impacts des milieux humides sur la variabilité spatiotemporelle des débits d'étiages au Québec (e.g., Blanchette et al., 2019; Fossey and Rousseau, 2016a, 2016b). Néanmoins, selon les travaux récents réalisés au Québec (e.g., Assani, 2022a, 2022b, 2024; Assani et al., 2023), si on tient compte de tous les milieux humides et autres plans d'eau qui peuvent stocker de l'eau de ruissellement à l'échelle d'un bassin versant, l'influence de ces milieux humides se manifeste plus sur les débits de crues que sur les débits d'étiages. En effet, la quantité totale de l'eau stockée en surface par ces différents milieux humides et plans d'eau ruisselle et/ou s'évapore plus qu'elle ne s'infiltré (concept de stockage de surface). Toutefois, malgré cette faible infiltration, Assani (2022b) avait tout de même constaté que ces milieux humides ralentissaient la vitesse de diminution (récession) des débits en période d'étiage en automne influençant ainsi la magnitude des débits d'étiages en hiver. De fait, si les débits d'étiages sont élevés en automne, ils le seront aussi en hiver, car les précipitations tombent principalement sous forme de neige durant cette dernière saison. Lorsque ces précipitations tombent sous forme de pluies, elles ne contribuent pas à l'alimentation des nappes aquifères en raison du gel des sols. Il s'ensuit que la durée et l'intensité de cette sécheresse sont beaucoup plus faibles en rive nord, caractérisée par des superficies des milieux humides plus grandes que celles de la rive sud, région très agricole.

Quant aux températures maximales journalières hivernales, en particulier celles des mois de mars et d'avril, elles influencent le type de précipitations et la date de fonte de la neige. Les températures positives en hiver favorisent l'occurrence des précipitations sous forme de pluies déclenchant ainsi le ruissellement qui réduit la durée et l'intensité des étiages. Il en est de même pour la fonte précoce de la neige au cours de la saison hivernale. Selon les régions, cette fonte peut survenir en mars ou en avril. Elle provoque la hausse des débits réduisant ainsi la durée et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique. En raison de la latitude, les températures moyennes maximales journalières en hiver sont globalement plus faibles dans les bassins versants situés au nord du 47°N que dans ceux situés au sud de ce parallèle sur les deux rives. Cette différence est encore

très significative pour les températures maximales journalières du mois d'avril, la variable la mieux corrélée aux moyennes de la durée de la sécheresse éco-hydrologique, après les milieux humides (tableau 2). En effet, ces températures sont toutes négatives au nord du 47°N mais positives au sud de ce parallèle sur les deux rives. Cette différence se traduit par une fonte tardive de la neige au nord par rapport au sud de ce parallèle augmentant ainsi la durée de la sécheresse éco-hydrologique hivernale dans la région hydroclimatique d'est. Quant à l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique, elle n'est pas significativement corrélée aux températures maximales contrairement à sa durée. Cette absence de corrélation pourrait s'expliquer par le fait que l'écart entre les débits réservés éco-hydrologiques et les débits minimums journaliers serait peu influencé par la précocité de la fonte de la neige.

Outre les milieux humides et les températures maximales journalières en hiver, la durée de la sécheresse éco-hydrologique est positivement corrélée à l'équivalent en eau de la neige en hiver. Les bassins versants qui reçoivent une plus quantité d'équivalent en eau de la neige connaissent en moyenne une plus grande durée de la sécheresse éco-hydrologique. De fait, ce sont les bassins versants situés au nord du 47°N en rive sud qui reçoivent une plus grande quantité de neige en hiver, c'est à-dire une plus grande quantité d'équivalent en eau de la neige, car dans ces bassins versants, la fonte de neige survient plus tard dans l'année allongeant ainsi la durée de la période d'étiage hivernale. Il s'ensuit que la variable « équivalent en eau de la neige » est mieux corrélée à la durée de la sécheresse que la quantité totale de la neige accumulée au sol; cette dernière variable n'étant pas significativement corrélée à la durée. Kinnard et al. (2022) avaient déjà démontré l'influence de l'équivalent en eau de la neige sur les débits minimums hivernaux,

Contrairement à la saison hivernale, la durée et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique ne sont corrélées à aucune variable ni physiographique ni climatique pendant la saison estivale. Cette absence de corrélation peut s'expliquer par plusieurs facteurs : la forte variabilité spatiale des pluies générées par des mouvements convectifs. Ceux-ci sont fortement influencés par des conditions de sites (couvert et usage des sols) qui engendrent le réchauffement différentiel d'un site à un autre même à l'échelle d'un même bassin versant. Il en résulte ainsi une variabilité relativement forte de

l'évapotranspiration totale même si celle-ci ne soit pas significativement corrélée ni à la durée et ni à l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique,

II.6.4.2. Variabilité temporelle des caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique

La tendance quasi généralisée à la baisse de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique observée en hiver dans les trois régions hydroclimatiques s'expliquerait par les quatre facteurs suivants :

- Une fonte précoce de la neige vers la fin de l'hiver observée dans de nombreuses régions tempérées froides, en général, et au Québec, en particulier ((Beauchamp et al., 2015; Assani, 2023a; Assani et al., 2022). À ce propos, il a été démontré qu'au Québec, cette fonte précoce de la neige s'est traduite par une hausse généralisée de la magnitude des crues et des étiages hivernaux. De ce fait, la durée de la période des étiages hivernaux se raccourcit au fil de temps entraînant ainsi une tendance généralisée à la baisse de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique.
- Une hausse généralisée de la quantité de pluies en été et en automne observée dans toute la partie nord-orientale du continent nord-américain (au nord du 45°N) (e.g., .Sadri et al., 2016; Small, 2006), en général, et au Québec méridional, en particulier. Dans cette dernière province, cette hausse de la quantité de pluies s'est traduite par celle de la magnitude des crues et des étiages automnaux (Assani, 2024; Assani et al., 2021). Cette hausse a été beaucoup plus marquée dans les bassins versants de la rive nord que dans ceux de la rive sud. Il s'ensuit que la hausse de la quantité de pluies estivo-automnales a entraîné celle des débits d'étiages hivernaux par la hausse de l'infiltration contribuant ainsi à réduire la durée et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique. Mais cette hausse de la magnitude des débits minimums saisonniers journaliers est plus importante en rive sud au sud du 47°N et, dans une moindre mesure, en rive nord (Assani et al., 2022b).

- Une hausse de la fréquence des précipitations sous forme de pluies en hiver au Québec. En effet, une hausse du nombre de jours avec les précipitations sous forme liquide a été observée dans de nombreuses stations au Québec méridional (Assani, 2021). La hausse de la fréquence des pluies en hiver génère le ruissellement de surface qui réduit la durée et l'intensité des étiages hivernaux.
- Enfin, la diminution très significative des superficies agricoles dans tous les bassins versants de la rive sud. De fait, depuis la modernisation de l'agriculture en 1950 au Québec, les superficies destinées à l'agriculture ont été réduites de plus de 60% particulièrement dans les bassins versants de la rive sud situés au sud du 47°N (Ruiz, 2019). Ces superficies furent remplacées par les jachères et les terrains reboisés. Sur le plan hydrologique, ce changement d'affectation des sols s'est traduit, au fil des années, par une hausse de la magnitude des débits d'étiages en raison de la hausse de l'infiltration des eaux de la fonte de neige et de pluies (Assani, 2023; Assani et al., 2022, 2023). Cette hausse de la magnitude des débits minimums hivernaux d'étiage a ainsi contribué à la diminution de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique dans le temps.

En été, contrairement en hiver, la variabilité temporelle est caractérisée globalement par une tendance à la hausse de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique. Cette hausse est beaucoup plus marquée dans les régions hydroclimatiques d'est, en rive sud, et du sud-ouest en rive nord. Dans la première région hydroclimatique, la plus neigeuse de ces trois régions hydroclimatiques, la diminution de la quantité de neige, principale source d'eau des nappes aquifères en été, pourrait expliquer cette hausse de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique. De plus, la hausse globale de la température observée en été contribuerait aussi à cette hausse par l'augmentation de l'évapotranspiration. Dans la dernière région hydroclimatique située au nord, la diminution de la quantité de neige, couplée à la hausse de la température estivale, pourrait expliquer aussi cette hausse. En revanche, l'absence de toute hausse dans la troisième région la plus agricole, située en rive sud au sud du 47°N, s'expliquerait par une hausse de l'infiltration consécutive à la diminution des superficies agricoles depuis 1950 comme on l'a déjà mentionné,

L'analyse de redondance a révélé que c'est l'indice de réchauffement climatique (GMLOT) qui est principalement corrélé à la durée et à l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique aussi bien en hiver qu'en été. Cet indice est corrélé négativement à la durée mais positivement à l'intensité. Les phases positives (températures élevées) de l'indice correspondent aux faibles durées de la sécheresse éco-hydrologique. En hiver, ces phases positives correspondraient ainsi à des hivers relativement doux et pluvieux qui favorisent une fonte précoce de la neige raccourcissant la durée des étiages. En été, ces phases correspondraient à des étés relativement chauds et probablement pluvieux. Cette hausse de la quantité de pluies pourrait expliquer le raccourcissement de la période d'étiages (diminution de la durée de la sécheresse éco-hydrologique) malgré une hausse probable de l'évapotranspiration.

En ce qui concerne les intensités, les phases positives de l'indice de réchauffement climatique correspondent aux fortes intensités de la sécheresse éco-hydrologique. La faible quantité de neige pendant les hivers relativement doux pourrait expliquer l'occurrence des débits minimums journaliers relativement faibles augmentant ainsi l'écart (hausse de l'intensité) entre ces débits et les débits réservés éco-hydrologiques. En été, si ces phases positives peuvent être relativement pluvieuses mais la faible quantité de neige en hiver, principale source des débits d'étiages en été, peut expliquer la hausse de l'écart (hausse de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique) entre les débits réservés et les débits minimums journaliers.

Outre cet indice de réchauffement climatique global, en hiver, la durée et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique sont aussi corrélées aux indices climatiques liés à l'Océan Pacifique : le PDO (corrélation négative avec la durée) et le PNA (corrélation positive avec l'intensité). L'influence de cet océan en hiver s'inscrit dans le cadre de la circulation atmosphérique générale à travers le front polaire. Cette influence se traduit par la fréquence des fronts froids et chauds en hiver au Québec. Une plus grande fréquence des fronts froids se traduira par des hivers très neigeux et froids. En revanche, une plus grande fréquence des fronts chauds se traduira par des hivers doux et peu neigeux. En été, la durée et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique sont corrélées aussi aux deux indices liés à l'océan Atlantique à travers les indices AMO et NAO. Ces deux indices sont corrélés négativement à la durée mais positivement à l'intensité de la sécheresse éco-

hydrologique. Il a été déjà démontré que ces deux indices climatiques (AMO et NAO) sont corrélés positivement aux températures estivales au Québec méridional (Assani et al., 2019) et aux débits minimums estivaux du fleuve Saint-Laurent au Québec (Biron et al., 2014). Les phases positives de ces deux indices sont donc associées à des précipitations et des débits minimums estivaux supérieurs à la moyenne (anomalies positives) entraînant ainsi une diminution de la durée de la sécheresse éco-hydrologique (corrélation négative).

CHAPITRE III

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le réchauffement climatique se traduit par l'amplification de la fréquence et de l'intensité des événements hydrologiques extrêmes (crues et étiages). Sur le plan écologique, selon Tonkin et al. (2026), ces événements extrêmes affectent la biodiversité de diverses manières et à différentes échelles : elles peuvent éroder la diversité génétique, modifier la composition des communautés, réduire la fonction écosystémique et perturber la synchronisation des populations et des communautés à travers le méta-réseau fluvial plus large. En ce qui concerne spécifiquement la sécheresse hydrologique, un épisode de sécheresse, associé à une vague de chaleur, dans le fleuve Yangtsé avait réduit la diversité des communautés planctoniques, déstabilisé la structure du réseau et favorisé la domination des cyanobactéries parmi les taxons d'algues dominants (Lyu et al., 2025). Plusieurs études ont démontré la diminution de la richesse spécifique de plusieurs taxons d'invertébrés provoquée par des épisodes de sécheresse extrêmes (Sabater et al., 2022).

Au Québec, les impacts de réchauffement climatique se sont traduits par une hausse quasi généralisée de la température, une baisse significative de la quantité de neige en hiver mais par une hausse de celle des pluies en été. Ces changements thermo-pluviométriques ont induit des conséquences diverses sur l'intensité et la fréquence des événements hydrologiques extrêmes (crues et inondations) dont l'ampleur varie selon les saisons et les régions hydroclimatiques. En ce qui concerne les étiages, il est important de rappeler que les étiages hivernaux sont fortement influencés par les pluies automnales alors que les étiages estivaux le sont par la quantité de neige hivernale.

Pour protéger les habitats des différentes espèces de poisson dans les différentes rivières du Québec méridional, dans sa politique, la FAPAQ (1999) avait recommandé l'utilisation des débits réservés écologiques élaborés par Belzile et al. (1996). Cependant, en raison de la hausse de la température et de ses impacts sur les régimes hydrologiques,

ces seuils minimums des débits que constituent les débits réservés pour protéger l'habitat du poisson ne sont pas toujours atteints chaque année, ce qui engendre la sécheresse éco-hydrologique (non-dépassement des débits réservés écologiques).

D'un point de vue hydroclimatique, il était donc important de déterminer les facteurs qui influencent la variabilité spatiale et temporelle de la durée et de l'intensité de cette sécheresse éco-hydrologique afin de pouvoir les intégrer dans la gestion et la conservation des habitats du poisson dans le cadre des changements climatiques.

En ce qui concerne la variabilité spatiale, il a été mis en évidence une différence entre la saison hivernale et la saison estivale. En hiver, la sécheresse éco-hydrologique est plus intense et dure plus longtemps en rive sud qu'en rive nord. Le principal facteur qui explique cette différence est la superficie des milieux humides. Elle est plus grande dans les bassins versants de la rive nord que dans ceux de la rive sud. Outre ce principal facteur, les températures hivernales contribuent aussi à expliquer spatialement cette différence. Lorsque la fonte de la neige survient tôt en hiver, la durée de la sécheresse diminue en raison de la diminution de la période des étiages. En été, contrairement à la saison hivernale, la durée et l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique ne sont corrélées à aucun facteur ni physiographique ni climatique. Ainsi, il n'existe aucune différence spatiale entre les bassins versants de la rive nord et ceux de la rive sud en raison probablement de la forte variabilité spatiale des averses orageuses et de l'évapotranspiration totale.

Quant à la variabilité temporelle, il a été aussi mis en évidence une différence saisonnière de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydroclimatique. En hiver, la variabilité temporelle à long terme de la durée et de l'intensité se caractérise par une tendance marquée à la baisse alors qu'en été, elle se caractérise par une tendance à la hausse sur les deux rives du fleuve. Toutefois, sur la rive sud au sud du 47°N, la région la plus agricole, cette tendance n'a pas été observée en raison probablement de la hausse de l'infiltration dans le temps après la réduction significative des superficies agricoles dans les bassins versants depuis 1950.

L'application de l'analyse de redondance entre les deux caractéristiques (durée et intensité) de la sécheresse éco-hydrologique et huit indices climatiques a révélé que c'est l'indice de réchauffement climatique global qui est l'indice le mieux corrélé à ces

deux caractéristiques durant les deux saisons. Il est corrélé négativement à la durée mais positivement à l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique. Ce résultat démontre clairement les impacts du réchauffement climatique sur la variabilité temporelle de ces deux caractéristiques de la sécheresse éco-hydrologique.

Ces impacts se traduisent en hiver par une tendance à la diminution de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique alors qu'en été, ils se traduisent par une tendance à leur hausse. Ces tendances doivent être prises en compte dans le cadre de la gestion, des aménagements et de la conservation des habitats du poisson dans le contexte du réchauffement climatique actuel au Québec méridional. Elles doivent aussi être prise en compte dans la prédiction de cette sécheresse par les modèles climatiques et hydrologiques durant les prochaines décennies.

L'absence de données sur les caractéristiques géologiques des bassins versants qui influencent principalement les débits minimums n'a pas permis d'expliquer les différences de la durée et de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique, d'une part, et de la variabilité temporelle à long terme, d'autre part, observées entre les rivières de la même région éco-hydrologique. Sur le plan hydroclimatique, il n'a pas été possible de clarifier certaines interactions de plusieurs indices climatiques sur la variabilité temporelle de la sécheresse éco-hydrologique. C'est un aspect important pour séparer les impacts respectifs du réchauffement climatique et des facteurs de la variabilité naturelle du climat sur la variabilité temporelle de la sécheresse éco-hydrologique. Outre ces limites, il importe de noter que l'étude porte seulement sur 17 bassins versants. Quoique représentatifs des conditions hydroclimatiques qui règnent au Québec méridional (au sud du 49°N), les conclusions qui sont tirées de l'analyse de ces bassins versants ne peuvent pas être généralisées à l'échelle de toute la province dont la superficie s'étend au nord de ce parallèle.

Dans la perspective de la gestion et de l'aménagement des rivières dans le contexte actuel du réchauffement climatique actuel, il serait intéressant de comparer la durée et l'intensité de la sécheresse définie par plusieurs indices des débits réservés afin de pouvoir déterminer les seuils minimaux des durées et des intensités de la sécheresse

qui n'altèrent pas les habitats du poisson en particulier et l'intégrité écologique des écosystèmes fluviaux en général.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anctil, F., Larouche, W., & Hoang, V. D. (2000). Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Quality Research Journal of Canada*, 35(1), 125–146. <https://doi.org/10.2166/wqrj.2000.008>
- Arthington, A. H., Bhaduri, A., Bunn, S. E., Jackson, S. E., Tharme, R. E., Tickner, D., Young, B., Acreman, M., Baker, N., Capon, S. J., Horne, A. C., Kendy, E., McClain, M. E., Poff, N. L., Richter, B. D., & Ward, S. (2018). The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows (2018). *Frontiers in Environmental Science*, 6, Article 45. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045>
- Assani, A. A. (2023). Comparison of spatiotemporal variability of daily maximum flows in cold-season (winter and spring) in southern Quebec (Canada). *Hydrology*, 10, 44, <https://doi.org/10.3390/hydrology10020044>
- Assani, A. A. (2024a). Analysis of the impacts of climate change, physiographic factors and land use/cover on the spatiotemporal variability of seasonal daily mean flows in southern Quebec (Canada), <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02180-9>
- Assani, A. A. (2024b). Spatiotemporal variability of fall daily maximum flows in southern Quebec (Canada) from 1930 to 2018, *Journal of Flood Risk Management*, e12971, <https://doi.org/10.1111/jfr3.12971>
- Assani, A. A., Zeroual, A., Roy, A., Kinnard, C. (2021). Impacts of agricultural areas on spatio-temporal variability of daily extreme flows during the transitional seasons (spring and fall) in southern Quebec, *Water*, 13, 3487, <https://doi.org/10.3390/w13243487>
- Assani, A. A., Zeroual, A., Roy, A., Kinnard, C. (2022). Spatial-temporal variability of seasonal daily minimum flows in southern Quebec: Synthesis on the impacts of climate, agriculture and wetlands, *Hydrology Research*, 53, 1494–1509, <https://doi.org/10.2166/nh.2022.070>

- 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, <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.429>
- 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>
- Belzile, L., Bérubé, P., Hoang, V. D., Leclerc, M. (1997). Méthode éco-hydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Rapport INRS-Eau et Groupe-Conseil Génivar inc., Québec.
- 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>
- Bietz, B. F., Martin, J., Englert, J. (1985). Instream Flow Needs for Fish in Alberta: A User's Guide to Assessment Methods. Edmonton, AB: Alberta Energy and Natural Resources, Fish and Wildlife Division.
- 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>
- Bond, N. R., Lake, P. S. (2003). Characterizing fish–habitat associations in streams as the first step in ecological restoration. *Austral Ecology*, 28(6), 611–621. <https://doi.org/10.1046/j.1442-9993.2003.t01-1-01317.x>
- Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I., Roy, A. G. (2010). Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries, *Journal of Hydrology*, 384(1–2), 65–83, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.011>

- Breshears, D. D., Cobb, N. S., Rich, P. M., Price, K. P., Allen, C. D., Balice, R. G., Romme, W. H., Kastens, J. H., Floyd, M. L., Belnap, J., Anderson, J. J., Myers, O. B., Meyer, C. W. (2005). Regional vegetation die-off in response to global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS), 102(42), 15144–15148. <https://doi.org/10.1073/pnas.0505734102>
- Cai, C., Hua, Y., Yang, H., Wang, J., Wu, C., Wang, H., Shen, X. (2024). Probabilistic forecast of ecological drought in rivers based on numerical weather forecast from S2S dataset, *Water*, 16, 579, <https://doi.org/10.3390/w16040579>
- Corenblit, D., Tabacchi, E., Steiger, J., Gurnell, A. M. (2007). Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: A review of complementary approaches. *Earth-Science Reviews*, 84(1–2), 56–86. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2007.05.004>
- Cunjak, R. A., Prowse, T. D, Parrish, D. L. (1998). Atlantic salmon in winter: The season of parr discontent, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 55(S1), 161–180, <https://doi.org/10.1139/d98-008>
- Claussen, M., Biggs, H. C. (2000). Can perennial tree grasses coexist in equilibrium? The role of climate, fire and herbivory in savanna ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 9(6), 473–484. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00221.x>
- Crausbay, S. D., et al. (2017). Defining ecological drought for the twenty-first century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(12), 2543–2550. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0292.1>
- Di Sabatino, A., Coscieme, L., Cristiano, G. (2021). Effects of antecedent drying events on structure, composition and functional trait of invertebrate assemblage and leaf-litter breakdown in a former perennial river, *Ecohydrology*, 15, e2358, <https://doi.org/10.1002/eco.2358>
- Ehsanzadeh, E., Adamowski, K. (2010). Trends in timing of low stream flows in Canada: Impact of autocorrelation and long-term persistence. *Hydrological Processes*, 24, 970–980. <https://doi.org/10.1002/hyp.7528>

- Feng, X., Ackerly, D. D., Dawson, T. E., Manzoni, S., Skelton, R. P., Vico, G., Thompson, S. E. (2018). The ecohydrological context of drought and classification of plant responses, *Ecology Letters*, 21, 1723–1736, <https://doi.org/10.1111/ele.13139>
- Fossey, M., Rousseau, A. N. (2016a). Can isolated and cumulative effects of land use and climate changes on watershed hydrology be distinguished? *Journal of Hydrology*, 538, 159–171. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.014>
- Fossey, M., & Rousseau, A. N. (2016b). Assessing the long-term hydrological services provided by wetlands under changing climate conditions: A case study approach of a Canadian watershed. *Journal of Hydrology*, 541, 1287–1302. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.032>
- Goodwell, A. E., Kumar, P., Fellows, A. W., Flerchinger, G. N. (2018). Dynamic process connectivity explains ecohydrologic responses to rainfall pulses and drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS), 115(37), E8604–E8613. <https://doi.org/10.1073/pnas.1800236115>
- Gurnell, A. M., Petts, G. E., Hannah, D. M., Smith, B. P. G., Edwards, P. J., Kollmann, J., Ward, J. V., Tockner, K. (2000). Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Fiume Tagliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(1), 31–62. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200101\)26:1](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200101)26:1)
- Hannah, D. M., Wood, P. J., Sadler, J. P. (2004). Ecohydrology and hydroecology: A 'new paradigm'? *Hydrological Processes*, 18(17), 3439–3445. <https://doi.org/10.1002/hyp.5731>
- Jiang, Y., Yang, M., Liu, W., Mohammadi, K., Wang, G. (2022). Eco-hydrological responses to recent droughts in tropical South America, *Environmental Research Letters*, 17, 024037, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac507a>
- Kennen, J. G., et al. (2018). Operationalizing Ecological Drought: An Interdisciplinary Challenge. *Earth's Future*, 6(4), 605–617. <https://doi.org/10.1002/2017EF000669>

- Kinnard, C., Bzeouich, G., Assani, A. (2022). Impacts of summer and winter conditions on summer river low flows in snow-affected catchments, *Journal of Hydrology*, 605, 127393, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127393>
- Khaliq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Gachon, P., Sushama, L., & St-Hilaire, A. (2008). Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. *Journal of Hydrology*, 368, 117–130. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.01.035>
- Khaliq, M. N., Ouarda, T. B. M. J., Ondo, J.-C., Gachon, P., & Bobée, B. (2009). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. *Journal of Hydrology*, 329, 534–552. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.004>
- Klaus, J., et al. (2022). The quest for the integrated understanding of ecological drought across ecosystems. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 2485–2504. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2485-2022>
- Kundzewicz, Z. W. (2002). Non-structural flood protection and sustainability. *Water International*, 27(1), 3–13. <https://doi.org/10.1080/02508060208686972>
- Kupferberg, S. J., Moidu, H., Adams, A., Catenazzi, A., Grefsrud, M., Bobzien, S., Leidy, R., Carlson, S. M. (2022). Seasonal drought and its effects on frog population dynamics. *Ecohydrology*, 15, e2395, <https://doi.org/10.1002/eco.2395>
- Lavigne, M.-P., Rousseau, A. N., Turcotte, R., Laroche, A.-M., Fortin, J.-P., Villeneuve, J.-P. (2004). Validation and Use of a Semidistributed Hydrological Modeling System to Predict Short-Term Effects of Clear-Cutting on a Watershed Hydrological Regime. *Earth Interactions*, 8(3), 1–19. [https://doi.org/10.1175/1087-3562\(2004\)008](https://doi.org/10.1175/1087-3562(2004)008)
- Leigh, C., Datry, T. (2017). Drying as a primary hydrological determinant of biodiversity in river systems: A broad-scale analysis. *Ecography*, 40(4), 487–499. <https://doi.org/10.1111/ecog.02230>

- Lyu, J., Shi, Y., Liu, T., Xu, X., Liu, S., Yang, G., Peng, D., Qu, Y., Zhang, S., Chen, C., Zhang, Y., Gao, J. (2025). Extreme drought-heatwave events threaten aquatic plankton communities. *Nature Communications Earth & Environment*, 6, 171, <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02143-1>
- McEvoy, J., Bathke, D. J., Burkardt, N., Cravens, A. E., Haigh, T., Hall, K. R., Hayes, M. J., Jedd, T., Podebradska, M., Wickham, E. (2018). Ecological drought: Accounting for non-human impacts. *Resources*, 7, 14, <https://www.mdpi.com/2079-9276/7/1/14#>
- Monk, W. A., Wood, P. J., Hannah, D. M., Wilson, D. A. (2007). Selection of river flow indices for the assessment of hydroecological change. *River Research and Applications*, 23(1), 113–122. <https://doi.org/10.1002/rra.964>
- Muma, M., Assani, A. A., Landry, R., Quessy, J.-F., Mesfioui, M. (2011). Effects of the change from forest to agriculture land use on the spatial variability of summer extreme daily flow characteristics in southern Quebec (Canada). *Journal of Hydrology*, 407(1–4), 153–163. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.020>
- Nguyen, N. T., Symmank, M., Keim, R. F. (2022). Drought responses in floodplain forests. *Ecohydrology*, 15, e2421, <https://doi.org/10.1002/eco.2421>
- Nilsson, C., Svedmark, M. (2002). Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: Riparian plant communities. *Environmental Management*, 30(4), 468–480. <https://doi.org/10.1007/s00267-002-2735-2>
- Mokhtar, A., He, H., Alsafadi, K., Mohammed, S., He, W., Zhao, H., Abdullahi, N. M., Gyasi-Agyei, Y. (2022). Ecosystem water use efficiency response to drought. *Ecohydrology*, 15, e2317, <https://doi.org/10.1002/eco.2317>
- Olden, J. D., Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications*, 19(2), 101–121. <https://doi.org/10.1002/rra.700>

- Parolari, A. J., Goulden, M. L., Bras, R. L. (2015). Ecohydrological controls on grass and shrub above-ground net primary productivity in a seasonally dry climate. *Ecohydrology*, 8(8), 1572–1583. <https://doi.org/10.1002/eco.1605>
- Pastor, A. V., Ludwig, F., Biemans, H., Hoff, H., Kabat, P. (2014). Accounting for environmental flow requirements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 5041–5059, <https://doi.org/10.5194/hess-18-5041-2014>
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E., & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- Prowse, T. D. (2001a). River-ice ecology: Hydrologic and geomorphic aspects. *Journal of Cold Regions Engineering*, 15(1), 1–16, <https://doi.org/10.1002/0470848944.hsa177>
- Prowse, T. D. (2001b). River-ice ecology: Biological aspects. *Journal of Cold Regions Engineering*, 15(1), 17–33, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-381X\(2001\)15:1\(17\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-381X(2001)15:1(17))
- Quilbé, R., Rousseau, A. N., Moquet, J.-S., Savary, S., Ricard, S., Garbouj, M. S. (2008). Hydrological responses of a watershed to historical land use evolution and future land use scenarios under climate change conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(1), 101–110. <https://doi.org/10.5194/hess-12-101-2008>
- Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Powell, J., Braun, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163>.
- Rodriguez, L. C., Parker, S., Fiore, N. M., Allison, S. D., Goulden, M. L. (2024). Impact of drought on ecohydrology of southern California ecosystems. *Ecosystems*, 27, 106–121, <https://doi.org/10.1007/s10021-023-00876-8>
- Rolls, R. J., Heino, J., Ryder, D. S., Chessman, B. C., Growns, I. O., Thompson, R. M., Gido, K. B. (2018). Scaling biodiversity responses to hydrological regimes. *Biological Reviews*, 93(2), 971–995. <https://doi.org/10.1111/brv.12381>

- Sabater, S., Freixa, A., Jiménez, L., Lopez-Doval, J., Pace, G., Pascoal, C., Perujo, N., Craven, D., Gonzalez-Trujillo, J. D. (2023). Extreme weather events threaten river ecosystems, *Biological Reviews*, 98, 450–461, <https://doi.org/10.1111/brv.12914>
- Satoh, Y., Yoshimura, K., Pokhrel, Y., Kim, H., Shiogama, H., Yokohata, T., et al. (2022). Timing of unprecedented hydrological drought. *Nature Communications*, 13, 1–11, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30729-2>
- Sun, G., Hallema, D., Asbjornsen, H. (2017). Ecohydrological processes and ecosystem services in the Anthropocene. *Ecological Processes*, 6, 35, <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0104-6>
- Slette, I. J., Post, A. K., Awad, M., Even, T., Punzalan, A., Williams, S., Smith, M. D., Knapp, A. K. (2019). How ecologists define drought, and why we should do better. *Global Change Biology*, 25(10), 3193–3200. <https://doi.org/10.1111/gcb.14747>
- Sylvain, J.-M., Assani, A. A., Landry, R., Quessy, J.-F., Kinnard, C. (2015). Comparison of the Spatio-Temporal Variability of Annual Minimum Daily Extreme Flow Characteristics as a Function of Land Use and Dam Management Mode in Quebec, Canada. *Water*, 7(3), 1232–1245. <https://doi.org/10.3390/w7031232>
- Tonkin, J. D., Siqueira, T., Merder, J., Datry, T., Poff, N. L., Talbot-Jones, J., Olden, J. D. (2026). Extreme events and river biodiversity under climate change. *Nature Reviews Biodiversity*, <https://doi.org/10.1038/s44358-026-00131-7>
- Vose, J. M., Miniati, C. F., Luce, C. H., Asbjornsen, H., Caldwell, P. V., Campbell, J. L., Grant, G. E., Isaak, D. J., Loheide II, S. P., Sun, G. (2016). Ecohydrological implications of drought for forests in the United States. *Forest Ecology and Management*, 380, 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.025>
- White, J. C., Aspin, T. W. H., Picken, J. L., Ledger, M. E., Wilby, R. L., Wood, P. J. (2022). Extreme low-flow effects on riverine fauna. *Ecohydrology*, 15, e2422, <https://doi.org/10.1002/eco.2422>
- Whitworth, K. L., Baldwin, D. S., Kerr, J. L. (2012). Drought, floods and water quality. *Journal of Hydrology*, 450–451, 190–198, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.057>

Zhang, Y., Fu, B., Feng, X., Pan, N. (2022). Response of ecohydrological variables to drought. *Remote Sensing*, 14, 1920, <https://doi.org/10.3390/rs14081920>

Zhang, Z., Ma, J., Wang, T., Song, W., Hao, L. (2023). Relationship between meteorological and ecohydrological drought. *Natural Hazards*, 116, 2549–2564, <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.445>

ANNEXE A

A.1. TENDANCES DE LA DURÉE DE LA SÉCHERESSE ÉCO-HYDROLOGIQUE

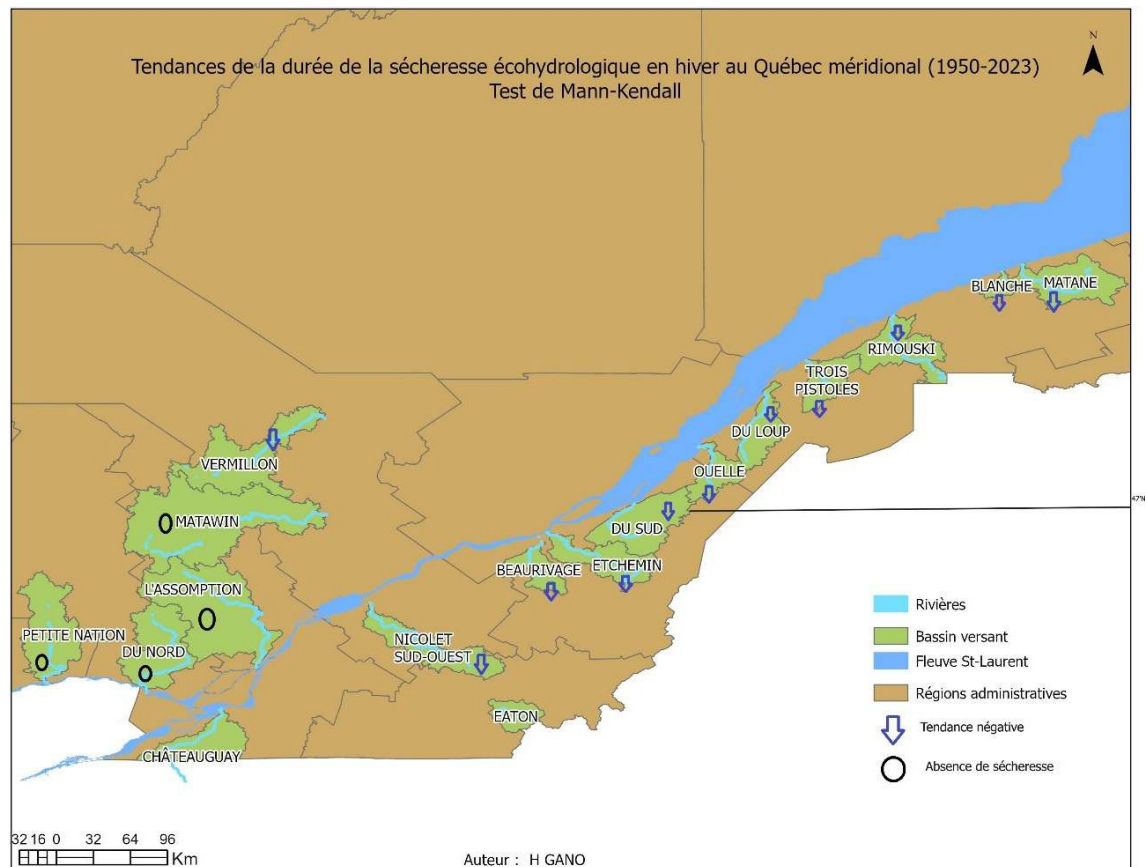


Figure 20. Tendances de la durée de la sécheresse éco-hydrologique en hiver au Québec méridional (1950-2023) - Test de Mann-Kendall.

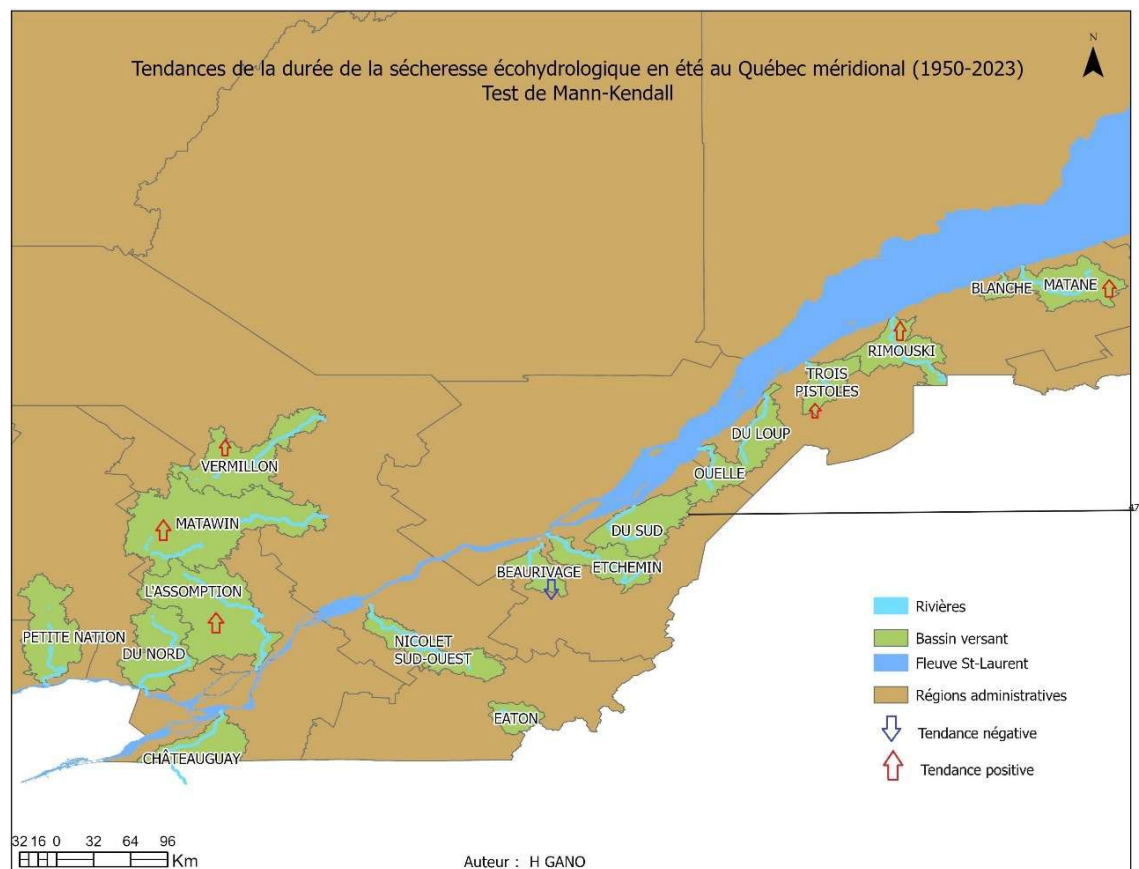


Figure 21. Tendances de la durée de la sécheresse éco-hydrologique en été au Québec méridional (1950-2023) - Test de Mann-Kendall.

A.2. TENDANCES DE L'INTENSITÉ DE LA SÉCHERESSE ÉCO-HYDROLOGIQUE

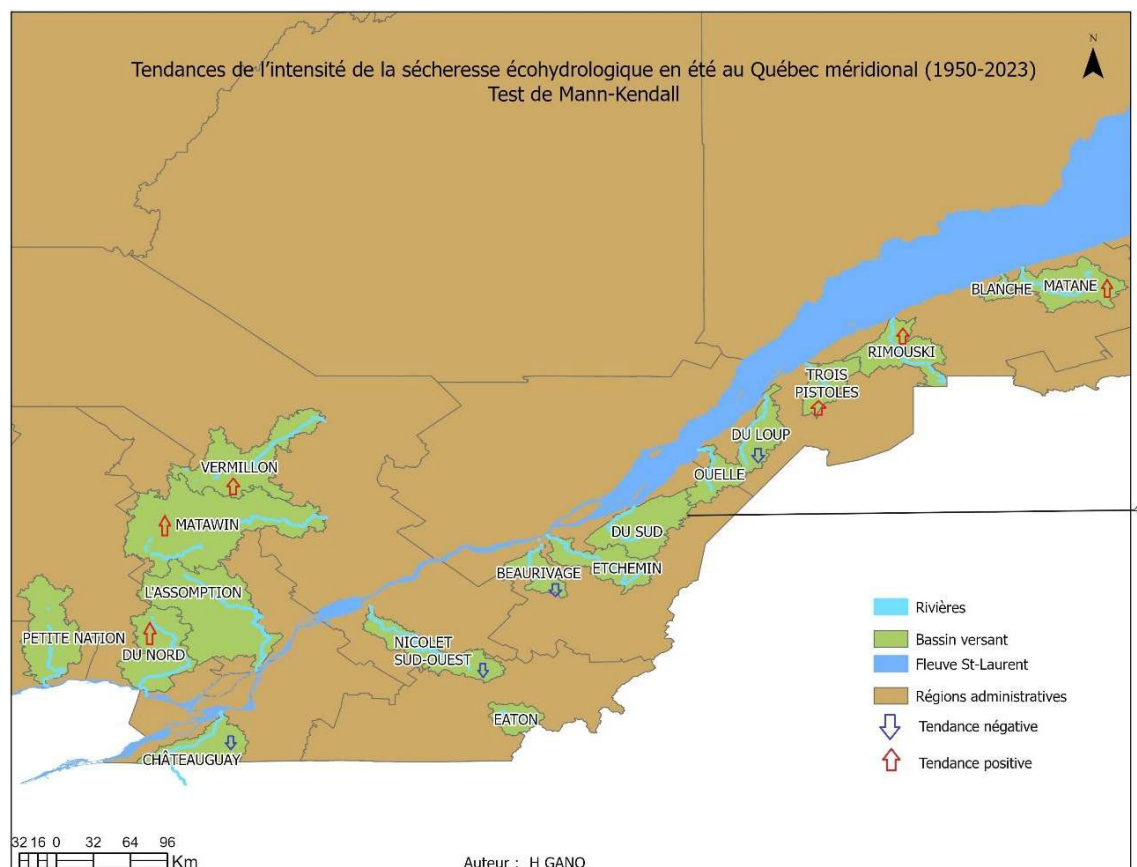


Figure 22. Tendances de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en été au Québec méridional (1950-2023) - Test de Mann-Kendall.

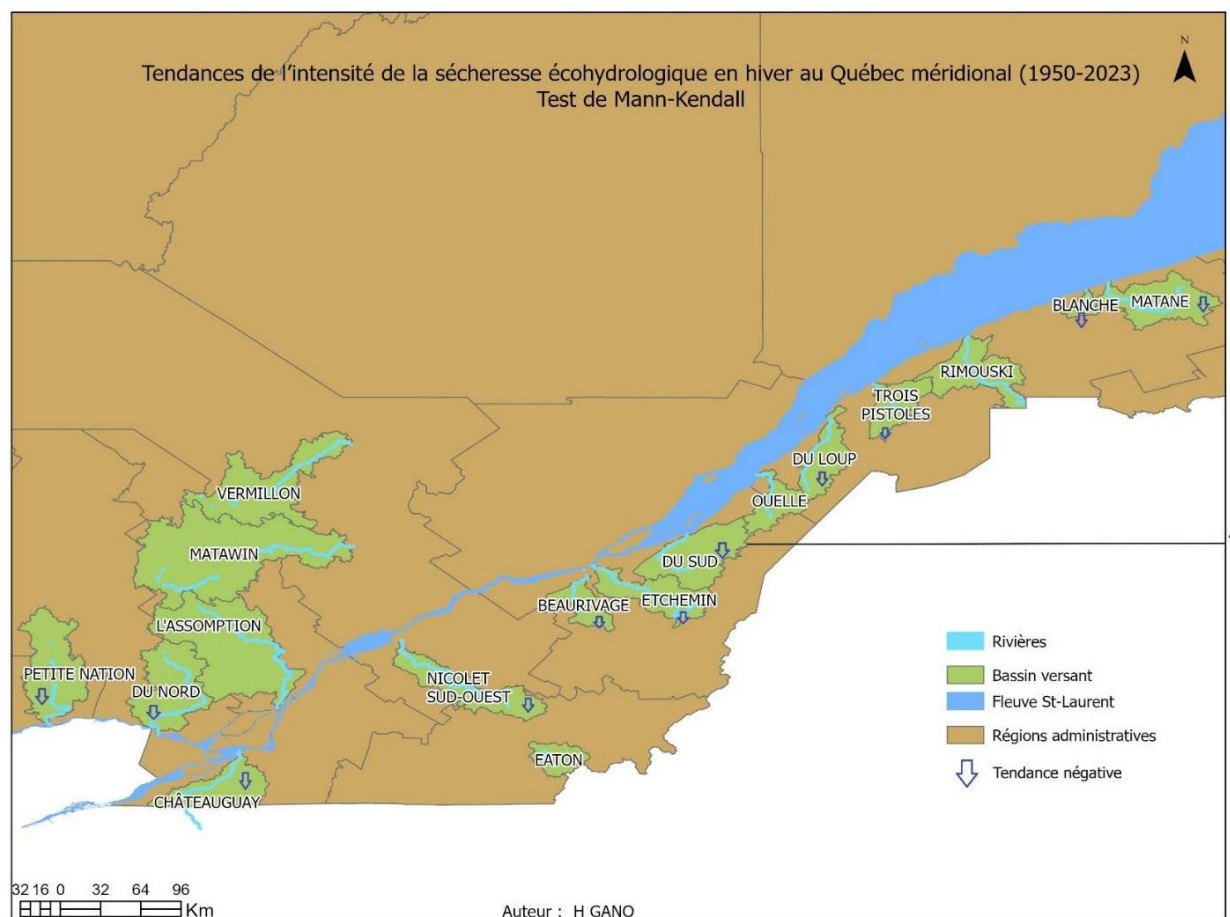


Figure 23. Tendances de l'intensité de la sécheresse éco-hydrologique en hiver au Québec méridional (1950-2023) - Test de Mann-Kendall.