

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

COMPARAISON DES MÉTHODES D'ESTIMATION DES DÉBITS ENVIRONNEMENTAUX AU QUEBEC
MÉRIDIONAL, DANS UN CONTEXTE HYDROLOGIQUE ET CLIMATIQUE ACTUEL ET FUTUR

Par
Laureline Berthot, Candidate au doctorat

Projet de recherche encadré par

André St-Hilaire, directeur, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre ETE

Daniel Caissie, co-directeur, Pêches et Océans Canada

Nassir El-Jabi, co-directeur, Université de Moncton

Pour

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, Direction
générale des politiques de l'eau.

Rapport de recherche R-2032
MARS 2021

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2021
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-962-3 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2022

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	5
1.1 CONTEXTE REGLEMENTAIRE	5
1.2 DE LA BASE D’ACTION DE LA DEHQ A L’INTRODUCTION DES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX.....	7
1.3 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS	8
1.3.1 <i>Problématique</i>	8
1.3.2 <i>Objectifs généraux</i>	9
1.3.3 <i>Objectifs spécifiques</i>	10
TRAVAUX DE RECHERCHE MENES.....	11
1.4 ESTIMER LES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX EN FONCTION DU TEMPS ET DU LIEU	11
1.5 UTILISER DES OUTILS COMPLEMENTAIRES POUR ESTIMER LES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX.....	12
1.5.1 <i>Le périmètre mouillé</i>	12
1.5.2 <i>Température de l’eau</i>	14
1.6 ESTIMER LES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX AVEC LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE	19
DISCUSSION ET CONCLUSION	24
1.7 L’ANALYSE FREQUENTIELLE POUR DETERMINER LES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX	24
1.8 DETERMINER LES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX AU QUEBEC MERIDIONAL	26
REFERENCES DU RAPPORT	29
ANNEXE 1	32
ANNEXE 2	61
ANNEXE 3	93
ANNEXE 4	112
ANNEXE 5	130
ANNEXE 6	149
ANNEXE 7	154

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : SITES SELECTIONNES POUR L'ETUDE SUR LA TEMPERATURE DE L'EAU	14
FIGURE 2 : TEMPERATURES DE L'EAU ASSOCIEES A DES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX POUR TROIS SITES ETUDIES.....	16
FIGURE 3 : REPARTITION DES DIFFERENCES ABSOLUES ENTRE 7Q2-S ET Q95-S.....	16
FIGURE 4 : SITES POUR L'ETUDE DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES DEBITS D'ETIAGE	19
FIGURE 5 : VARIATION DES VALEURS MOYENNES DES METRIQUES (%MAF) POUR LES HORIZONS 1990, 2020 ET 2050, POUR LES SIX SCENARIOS CLIMATIQUES	22
FIGURE 6 : VARIATION DES VALEURS DES METRIQUES (%MAF) POUR LES HORIZONS 1990, 2020 ET 2050, POUR LES SIX SCENARIOS CLIMATIQUES	22
FIGURE 7 : MOIS AU PLUS FAIBLE DEBIT A L'HORIZON 2050 POUR UNE PERIODE INTERANNUELLE	23

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : BILAN PRÉLIMINAIRE DES RÉSULTATS	17
TABLEAU 2 : MOYENNES DES TEMPÉRATURES DE L'EAU ET DE DÉBIT PAR MÉTRIQUES, EN DISTINGUANT LES RIVIÈRES À EAUX CHAUDES (34) ET FROIDES (19).....	18
TABLEAU 3 : NOMBRE DE STATIONS RETENUS POUR LES CALCULS DES MÉTRIQUES 7Q2 ET 7Q10	21

INTRODUCTION

La Direction de l'Expertise Hydrique du Québec (DEHQ), rattachée au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre le Changement Climatique (MELCC), définit le débit d'étiage ainsi : un débit très faible observé pendant une période plus ou moins longue, au cours de l'hiver, de l'été et au début de l'automne ([MELCC 2020](#)). L'estimation du débit d'étiage répond à trois besoins ([MELCC 2020](#)): (1) Évaluer les débits à prélever dans les cours d'eau ; (2) Maintenir un débit minimal dans les cours d'eau et (3) Estimer les charges de contaminants déversées dans les cours d'eau en protégeant le milieu aquatique et n'affectant pas les usages liés à l'eau. Son application concerne avant tout *la production hydroélectrique, la gestion des eaux retenues par des barrages, dans les lacs et les réservoirs, le détournement de cours d'eau, l'approvisionnement des villes et industries en eau potable, la fabrication de neige artificielle, l'irrigation, les piscicultures et le traitement des eaux usées d'origines domestique et industrielle* ([MELCC 2020](#)). La présente étude porte sur la problématique du prélèvement d'eau dans les rivières du Québec méridional pendant les périodes d'étiage, pour soutenir une gestion de l'eau qui tient compte de la sensibilité des cours d'eau aux prélèvements, et de la préservation et du maintien des écosystèmes riverains.

1.1 Contexte réglementaire

Au Québec, un prélèvement d'eau est l'*action de prendre de l'eau de surface ou de l'eau souterraine par quelque moyen que ce soit* – hors retenues d'eau et ouvrages hydrauliques servant à la production d'énergie hydroélectrique (art.31.74 de la Loi Qualité Environnement, [LQE 2009](#)). D'après le MELCC, la gestion des prélèvements d'eau est portée par les textes réglementaires suivant : (1) Loi sur l'eau ou Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection ([LSE 2009](#)) et (2) Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection ([MELCC 2014](#)). La Loi sur l'eau ([LSE 2009](#)) met en œuvre les orientations actées dans l'Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent ([MELCC 2005](#)) prévoyant la protection, la conservation et la gestion de ces ressources. Au Québec, celles-ci obtiennent un statut juridique comme faisant partie du patrimoine de la collectivité, dont l'État est le gardien. Le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection ([MELCC 2014](#)), permet l'utilisation du formulaire de Demande d'autorisation de prélèvement d'eau en vertu de l'art.31.75

de la LQE (2009). A noter que l'art.31.75 précise qu'un débit maximum prélevé de 75 m³/jour ne nécessite pas d'autorisation, sauf si l'eau est destinée à alimenter des particuliers, à des fins commerciales ou à un transport d'eau depuis le fleuve Saint-Laurent. Une demande n'est pas requise en cas d'urgence temporaire et non récurrente. Le Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection (MELCC 2014) joint les règlements de Déclaration des prélèvements d'eau (12 août 2009), de Redevance exigible pour l'utilisation de l'eau (1 décembre 2010), et celui cadrant l'Autorisation de certains projets de transport d'eau hors du bassin du fleuve Saint-Laurent (22 juin 2011). Dans la dernière version de la LQE (2009), l'art.31.76 préconise trois notions à considérer lors de l'octroi d'autorisation de prélèvement : (1) la gestion durable, équitable et efficace, (2) le principe de précaution et (3) la prise en compte des effets du changement climatique.

La réglementation sur les débits d'étiage a débuté avec la Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats (MFFP 1999). Le débit réservé écologique correspond au *débit minimum requis pour maintenir, à un niveau jugé acceptable, les habitats du poisson*. Aujourd'hui, l'art.17 de la Réglementation sur les habitats fauniques, appliquant la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune (MFFP 2015), précise que *dans un habitat de poisson [...] dans le cas d'un cours d'eau, le prélèvement ne peut excéder 15% du débit du cours d'eau à l'endroit où le pompage est effectué*. Cette exigence est reformulée dans le Guide de conception des installations de production d'eau potable (Vol.1, MELCC 2015), où le MELCC pose deux conditions limites pour estimer les débits à prélever en période d'étiage : (1) le débit maximum prélevé en un point est de 15% du 7Q2 d'origine (débit d'étiage de récurrence de 2 ans sur 7 jours consécutifs), duquel on soustrait les prélèvements en amont et (2) il est possible d'utiliser la méthode hydraulique et la méthode des habitats préférentiels pour demander à prélever au-delà de 15% du 7Q2. La DEHQ propose alors deux méthodes pour calculer un débit d'étiage, l'estimation du débit d'étiage historique et l'estimation du débit d'étiage pour différentes récurrences et différentes durées (MELCC 2020). La première méthode consiste à calculer le débit d'étiage à une date précise à partir de la moyenne des valeurs journalières consécutives précédant cette date pour la durée voulue, avec la valeur de la date incluse. La seconde méthode consiste à estimer un débit d'étiage pour une période donnée (année, saison, mois, période particulière) ainsi que sa probabilité d'occurrence durant celle-ci (MELCC 2020). En plus du 7Q2, le 7Q10 (débit d'étiage de récurrence de 10 ans sur 7 jours consécutifs) et le 5Q30

(débit d'étiage de récurrence de 5 ans sur 30 jours consécutifs) sont calculés. Le 7Q10 et le 5Q30 sont utilisés pour répondre aux objectifs environnementaux de rejets ([MELCC 2007](#)).

1.2 De la base d'action de la DEHQ à l'introduction des débits environnementaux

D'après [Belzile et al. \(1997\)](#), la méthode du 7Q2 provient d'une étude québécoise interne au MELCC et non disponible au public de [Beaudelin et Bérubé \(1994\)](#), la méthode du 7Q10 d'une étude américaine de [Reiser et al. \(1989\)](#). À noter que la méthode du 5Q30 n'est plus considérée car de faible intérêt pour les commanditaires de cette présente étude. La base de données du DEHQ regroupe le suivi hydrométrique de 749 stations géo référencées, allant de quelques à plus de 90 années de données, réparties dans les treize régions hydrographiques du Québec. Soit 230 stations de mesures de niveau d'eau (N en m) et 519 stations de mesures de débit (Q en m³/s). Pour appliquer une méthode sur un cours d'eau instrumenté, l'évolution de l'utilisation du cours d'eau (présence d'ouvrages hydrauliques), de l'occupation du sol et le climat sont pris en compte. Les ouvrages hydrauliques peuvent modifier le régime d'écoulement d'un cours d'eau et la DEHQ distingue trois régimes d'écoulement différents : naturel, influencé journallement et influencé mensuellement. Pour estimer un débit d'étiage pour un pas de temps journalier, les régimes naturel et influencé journallement peuvent être utilisés ensemble sans correction préalable. Aussi, le MELCC donne des méthodes d'estimation du débit d'étiage en fonction de la quantité de données disponibles (<10 ans ou ≥10 ans), pour des cours d'eau non instrumentés liés à un bassin versant dont la taille est inférieure à 5 km², ainsi que pour les régions nordiques du Québec où les données disponibles sont en faibles quantités, avec une taille des bassins versants très souvent supérieure à 1000 km² et une occupation du sol spécifique ([MELCC 2020](#)). Enfin, les conditions météorologiques changeant selon la latitude au Québec, les dates saisonnières prises en compte par le MELCC varient entre le 1^{er} décembre et le 31 mai en hiver et entre le 1^{er} juin et le 30 novembre en été.

Pour rappel, les deux méthodes du 7Q2 et du 7Q10 ont été choisies pour gérer le partage de l'eau, les structures hydrauliques et assurer la qualité de l'eau suite à un rejet d'eaux usées ou de contaminants ([MELCC 2020](#)). Les questions sont alors de savoir si ces deux méthodes peuvent répondre aux trois principes précités de la LQE, pour autoriser un prélèvement d'eau :

- Est-ce que ces méthodes permettent une gestion durable, équitable et efficace ?

- Est-ce que le principe de précaution est respecté ?
- Est-ce que les effets du changement climatique sont pris en compte ?

Selon la littérature scientifique, la méthode du 7Q2 pourrait ne pas assurer la protection des habitats de poisson en tout temps et les débits issus de la méthode du 7Q10 sont faibles et insuffisants pour assurer la protection de ces mêmes habitats ([Belzile et al. 1997](#), [Caissie D. et al. 2007](#), [Caissie J. et al. 2015](#)). Cette présente étude propose alors de développer et d'appliquer la notion de débit environnemental dans la gestion des ressources en eau du Québec méridional. Le débit environnemental correspond à la « *quantité, la période, la qualité et le niveau d'eau douce nécessaire au maintien des écosystèmes aquatiques qui maintiennent à leur tour, la diversité culturelle, l'économie, les moyens de subsistance durables ainsi que le bien-être des humains* » ([Arthington et al. 2018](#)). Le but étant de sensibiliser les décideurs publics à mener une politique de gestion de partage des eaux en période d'étiage à partir d'études éco hydrologiques concertées, à l'aide de méthodes hydrologiques ([Tennant 1976](#), [Olden et Poff 2003](#), [Caissie et El-Jabi 1995](#)), hydrauliques ([Hersh et Maidment 2006](#)), de simulation d'habitat ([Monk et al. 2008](#), [Richter et al. 2011](#)), ou exhaustives ([Poff et al. 2010](#), [Richter et al. 1996](#), [Tharme 2003](#), [Pahl-Wostl et al. 2013](#), [Poff et Zimmerman 2010](#), [Linnansaari et al. 2013](#), [Arthington 2012](#)). Des méthodes actuellement préconisées dans les Provinces Maritimes du Canada, aux États-Unis, et en Grande-Bretagne, seront testées dans cette présente étude.

1.3 Problématique et objectifs

1.3.1 Problématique

Le MELCC interroge sa gestion actuelle de prélèvement d'eau de surface et souterraine au Québec. Le Guide de conception des installations de production d'eau potable du MELCC ([MELCC 2015](#)), préconise une limite de prélèvement dans une rivière, tenant compte des effets cumulatifs en amont, à 15% du 7Q2 durant les périodes d'étiage. Se référant à la base de calcul de l'article 17 du *Règlement sur les habitats fauniques* ([MFFP 2015](#)), celui-ci correspond au débit minimum d'une moyenne mobile de 7 jours pour un temps défini (annuel, mensuel, saisonnier) et une période de retour de 2 ans. La source expliquant son utilisation et son impact est peu documentée ([Beaudelin et Bérubé 1994](#), [Ancil et al. 2000](#)) et des membres de la communauté scientifique soutiennent que cet indice ne permet pas la protection des écosystèmes lotiques ([Caissie et El-Jabi 1995](#), [Belzile et al. 1997](#), [Bérubé et al. 2002](#)). De son côté, la Direction d'Expertise Hydrique

du Québec utilise les débits d'étiage 7Q2, 7Q10 et 5Q30 pour gérer le partage de l'eau entre demandeurs, gestionnaires de structures hydrauliques et assurer la qualité de l'eau à la suite d'un rejet d'eaux usées ou de contaminants ([MELCC 2020](#)). Le MELCC a alors chargé l'INRS d'évaluer la pertinence du 7Q2 comme débit plancher au-delà duquel il n'est plus permis de prélever. Le MELCC souhaite aussi, avoir plus de connaissance sur l'application de méthodes d'estimation de débits environnementaux plus propices aux rivières du Québec méridional. La présente étude porte sur la comparaison de méthodes d'estimation de débits environnementaux dans des contextes hydrologiques et climatiques actuels et futurs.

1.3.2 Objectifs généraux

[Tharme \(2003\)](#) a répertorié quatre catégories de méthodes d'estimation des débits environnementaux: hydrologique, hydraulique, simulation d'habitat et exhaustive. Au Canada, des études liées aux caractéristiques des régimes hydriques ([Daigle et al. 2011](#), [Caissie D. et al. 2007](#), [Caissie J. et al. 2015](#)), ainsi que sur la détermination des débits environnementaux ont été réalisées ([Caissie et El-Jabi 1995](#), [Belzile et al. 1997](#)), cependant, les études de validation sont rares. Dans la présente étude, les méthodes hydrologiques et hydrauliques ont été développées théoriquement, en fonction des ressources disponibles, pour les contextes hydrologiques et climatiques actuels et futurs. Les résultats sont présentés sous forme d'articles.

Article 1 : Réaliser une étude comparative et classer les méthodes d'estimation hydrologiques. Présenter les résultats pour différentes échelles spatio-temporelles. Identifier des groupes de cours d'eau ayant un comportement hydrologique relativement homogène et ordonner les méthodes d'estimation de la plus à la moins conservatrice par rapport à des seuils hypothétiques ;

Article 2 : Faire une étude incluant une variable hydraulique pour établir les débits planchers sous lesquels le périmètre mouillé change plus rapidement avec une diminution du débit et valider les précédents classements ;

Article 3 ou Chapitre : Étudier le lien entre la température de l'eau et les débits environnementaux ;

Article 3/4 : Étudier l'impact possible des changements climatiques sur les méthodes d'estimation utilisées pour définir les débits environnementaux. Les méthodes sélectionnées dans les étapes précédentes pour déterminer les débits environnementaux seront appliquées pour les scénarios hydrologiques possibles, RCP4.5 et RCP8.5, pour les horizons 2030 et 2050 ([GIEC 2014](#)).

1.3.3 Objectifs spécifiques

Au cours de ces études, des discussions seront menées sur les :

- Méthodes d'estimation hydrologiques applicables dans le contexte du Québec méridional;
- Résultats de l'étude hydrologique en fonction des régions hydrographiques et de régions hypothétiques définies à partir d'une analyse multivariée ;
- Résultats hydrologiques pour différentes temporalités (annuelle et saisonnière) ;
- Caractéristiques des cours d'eau et de leurs paramètres hydrauliques ;
- Avantages et inconvénients d'utiliser l'analyse statistique fréquentielle ou l'analyse statistique de l'observation pour estimer les débits environnementaux actuellement et à l'avenir, compte tenu des changements climatiques;
- Les outils pouvant être utilisés pour répondre au principe de précaution : le périmètre mouillé et la température de l'eau.

A noter que ces études visent à poser les bases pour l'application éventuelle d'une méthode exhaustive, décrite comme étant un outil d'aide à la décision collective entre autres par [Richter et al. \(1996\)](#), [Poff et Zimmerman \(2010\)](#) et [Pahl-Wostl et al. \(2013\)](#). En effet, les résultats pourront susciter un intérêt pour choisir localement, à travers une concertation entre les experts (biologistes, hydrauliciens, hydrologues...) et les parties prenantes (MELCC, opérateurs publics et privés, peuples autochtones), d'appliquer un/des débit(s) environnemental(aux) selon leurs propres contextes hydrologiques et climatiques.

Note au lecteur et à la lectrice sur les données utilisées dans cette présente étude :

Les données hydrologiques, hydrauliques, la base de données de température de l'eau (BQMA) et les débits simulés avec le modèle hydrologique HYDROTEL ([Fortin et Royer 2004](#)) proviennent de la DEHQ, qui a produit l'Atlas hydro climatique du Québec méridional ([MELCC 2020](#)). Des données hydrauliques ont été ajoutées à partir d'un terrain réalisé durant l'été 2018.

TRAVAUX DE RECHERCHE MENÉS

1.4 Estimer les débits environnementaux en fonction du temps et du lieu

Résumé de l'article 1

Le Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec (MELCC) révisé sa politique de partage des eaux pour mieux protéger ses écosystèmes riverains tout en continuant à répondre aux demandes de prélèvements dans les cours d'eau du Québec méridional. Actuellement, l'impact de l'effet cumulatif des prélèvements d'eau sur un même cours d'eau est pris en compte. Toutefois, c'est le choix de limiter les prélèvements sur la base des métriques 7Q2 et 7Q10 (débits minimums d'une moyenne mobile de 7 jours et une période de retour de deux et dix ans) qui est questionné. En effet, la littérature scientifique remet en cause le potentiel de ces métriques pour préserver et maintenir la santé des écosystèmes lotiques pendant les périodes d'étiage. Dans ce premier volet, la problématique porte sur le choix d'utiliser une ou plusieurs méthodes d'estimation des débits environnementaux selon l'échelle spatiale et/ou temporelle utilisée. Cette étude hydrologique faite sur un échantillon de 98 stations hydrométriques (> 20 ans de données) réparties dans les huit régions hydrographiques du Québec méridional, a permis de comparer huit méthodes d'estimation testées ou appliquées dans les provinces Atlantiques du Canada, aux États-Unis et au Royaume-Uni, ayant des similitudes hydro-climatologiques avec le Québec méridional. En plus des 7Q2 et 7Q10, les méthodes utilisées sont le Q90 et Q95 (95^e et 90^e percentile des débits classés), le AQ50 et LQ50 (les débits médians du mois d'août et du mois au plus faible débit) et le 70%AQ50 et 70%LQ50 (70% des débits médians du mois d'août et du mois au plus faible débit). Une analyse multivariée basée sur 71 indices hydrologiques liés à de faibles débits a permis de former six groupes de stations délimitant de nouvelles régions (PC-HC), afin de comparer les résultats spatialement avec les actuelles régions hydrographiques (ROX). Les résultats ont aussi été présentés pour plusieurs temporalités : interannuelle, mensuelle, estivale et hivernale. À des fins de comparaison, trois seuils de débits planchers, en dessous desquels il n'est pas recommandé de prélever, ont été utilisés, d'après la méthode de Tennant basée sur un pourcentage du débit moyen annuel. La loi de distribution GEV a été appliquée pour calculer les 7Q2 et 7Q10 et les valeurs de débits environnementaux ont aussi été comparées par rapport à la taille des bassins versants. Il ressort des résultats que

l'emplacement géographique, la temporalité et la taille du bassin versant sont des paramètres à considérer pour l'évaluation d'un débit environnemental. Aussi, les résultats ont montré que :

- Les débits minimums hivernaux sont inférieurs aux débits minimums estivaux ;
- 23 % à 26 % des méthodes calculées donnent des débits environnementaux inférieurs aux deux hauts seuils de restriction (25%MAF et 30%MAF), selon l'échelle temporelle ;
- Le 7Q2, 7Q10, Q95 et le Q90 sont déconseillés pour les rivières ayant de faibles débits.

Enfin, il est recommandé de définir plusieurs débits environnementaux pour un territoire aussi étendu (730 000 km²), au lieu d'appliquer uniquement le 7Q2 dans tout le Québec méridional.

Annexe 1 : Berthot L. , A. St-Hilaire , D. Caissie , N. El-Jabi , J. Kirby & S. Ouellet-Proulx (2020): Southern Quebec environmental flow assessments: spatial and temporal scales sensitivity, Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques, DOI: 10.1080/07011784.2020.1834881

1.5 Utiliser des outils complémentaires pour estimer les débits environnementaux

1.5.1 Le périmètre mouillé

Une première étude a été faite pour recommander l'usage de méthodes d'estimation de débits environnementaux régionalement adaptées, avec l'usage notamment, du AQ50 (débit médian du mois d'août), donnant les plus hautes valeurs de débit. Dans ce second volet, les huit méthodes d'estimation des débits environnementaux (dont le 7Q2 et le 7Q10) sont à nouveau calculées, pour comparer, cette fois-ci, la valeur de leur périmètre mouillé associé, pour un même cours d'eau. En effet, l'étude menée vise à évaluer la pertinence d'utiliser le périmètre mouillé comme un outil additionnel pour l'évaluation des débits environnementaux, en tenant compte de la morphologie et de l'habitat aquatique potentiel des rivières durant les périodes d'étiage. Le périmètre mouillé est un bon indicateur de la disponibilité des habitats aquatiques et de la production alimentaire dans les rivières. Le débit et le périmètre mouillé sont liés par une fonction de puissance. Le point de rupture de la courbe de régression de puissance indique la valeur de débit à partir de laquelle le périmètre mouillé diminue fortement, limitant par conséquent, l'habitat disponible et la production alimentaire pour une section de rivière donnée. Ici, c'est la méthode du maximum de courbure de la relation débit-périmètre mouillé qui a été appliquée et

la valeur de son périmètre mouillé associé utilisée comme un seuil de protection des écosystèmes riverains. Ce seuil est distinct des seuils de débits planchers (méthode de Tennant) faible (< 10% du débit moyen annuel) et acceptables (25% et 30% du débit moyen annuel), aussi utilisés dans cette étude. A savoir que le seuil de 10% du débit moyen annuel permettrait de couvrir 60% du substrat alors que le seuil de 30% du débit moyen annuel pourrait couvrir jusqu'à 100% du substrat. Pour assurer le maintien des habitats aquatiques et la production alimentaire pendant les périodes d'étiage dans les rivières du Québec méridional, [Belzile et al. \(1997\)](#) ont suggéré l'utilisation du débit médian du mois d'août (AQ50) ou de septembre, ou un pourcentage du débit moyen annuel (25%MAF, 30%MAF, 50%MAF), à partir d'une étude réalisée sur 17 espèces de poissons réparties dans 15 éco-régions. Dans la présente étude, un échantillon de 43 sites issus de 35 rivières a été présélectionné. Les résultats ont souligné le fait que les valeurs de débit du 7Q10 (débit minimum d'une moyenne mobile de 7 jours et une période de retour de dix ans) et de la méthode du maximum de courbure sont la plupart du temps considérées comme faibles (< 10%MAF) pour protéger les écosystèmes riverains. En considérant ensemble les seuils de conservation de débit et de périmètre mouillé, les résultats ont montré que les seuils de 25% et 30% du débit moyen annuel et ainsi que les méthodes d'estimation de débits environnementaux pour un pas de temps estival (comme le AQ50 et le 7Q2 estival ; débit minimum d'une moyenne mobile de 7 jours et une période de retour de deux ans), offrent assez d'habitat disponible aux écosystèmes riverains durant les périodes d'étiage.

Annexe 2 : Berthot L., A. St-Hilaire , D. Caissie , N. El-Jabi , J. Kirby & S. Ouellet-Proulx (202X): The wetted perimeter to assess environmental flow in Southern Quebec rivers (Canada), *soumis au Journal of Hydrology: Regional Studies, en cours de révision*

Annexe 3: Cette annexe fait suite à la Figure 6 de l'Annexe 2 présentant seulement 5/43 sites étudiés. Les valeurs standardisées sont indiquées en fin d'Annexe 3.

1.5.2 Température de l'eau

(Les paragraphes suivants résument les éléments qui seront développés dans un article à venir.)

Contexte

Dans ce troisième volet, la variation de la température de l'eau associée aux différentes valeurs de débits environnementaux par station hydrométrique présélectionnée est étudiée. Le but est d'évaluer la pertinence d'utiliser la température de l'eau comme un outil complémentaire pour considérer la santé des écosystèmes riverains dans l'évaluation des débits environnementaux. Pour rappel, le 7Q2 est utilisée dans la politique de prélèvement d'eau en rivière ([MELCC 2015](#)), et le 7Q10 est utilisé pour répondre aux objectifs environnementaux de rejets ([MELCC 2007](#)). Pour cette étude, un échantillon de 53 sites pour 48 rivières a été choisi. Les données de température de l'eau proviennent de la banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA; MELCC). Ces sites sont répartis dans les huit régions hydrographiques du Québec méridional ([Figure 1](#)).

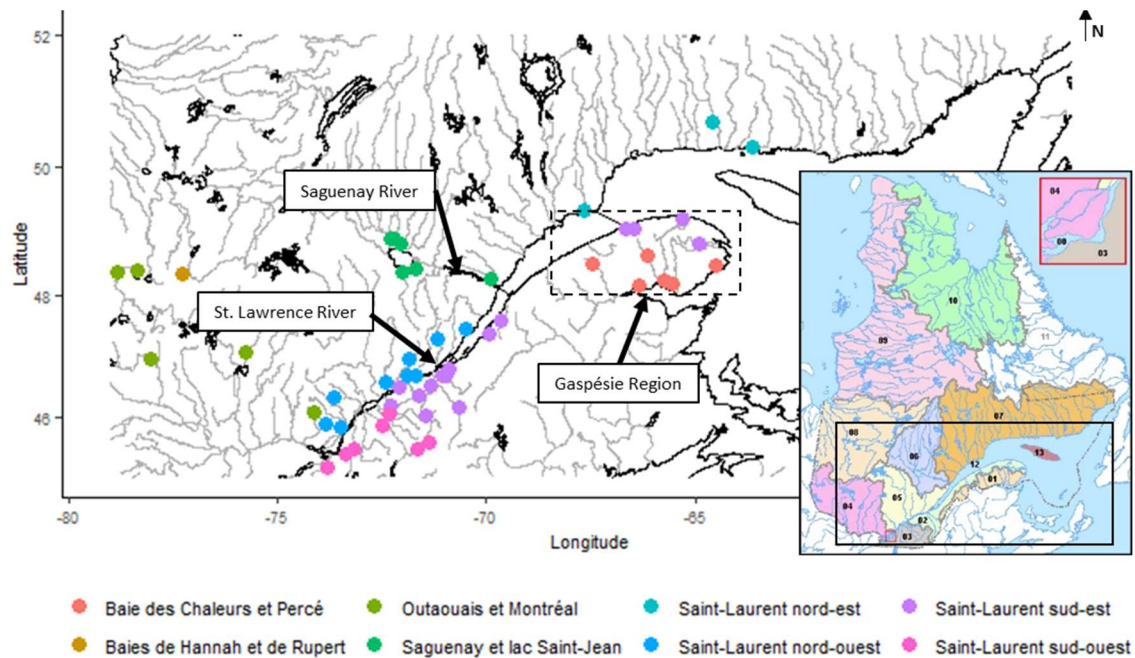


Figure 1 : Sites sélectionnés pour l'étude sur la température de l'eau

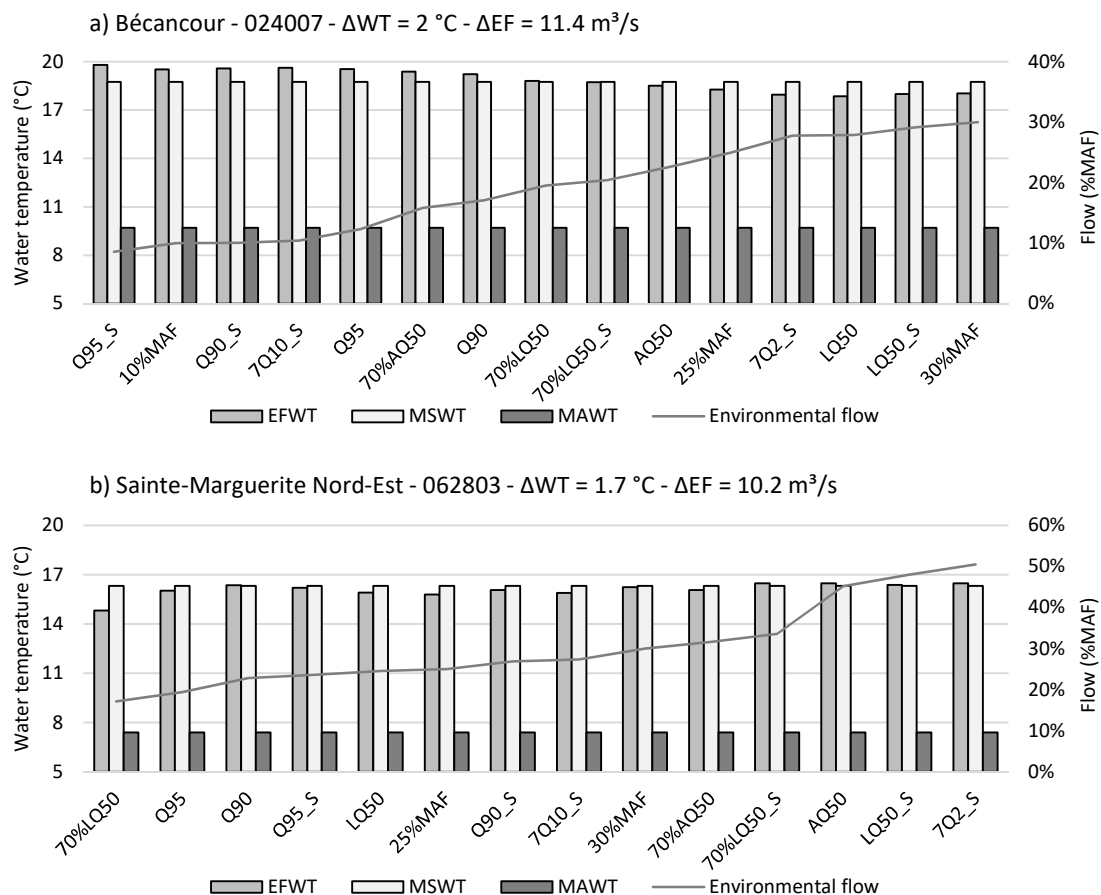
Méthode

Des valeurs moyennes de température d'eau ont été recherchées pour quatre métriques interannuelles (LQ50, Q90, Q95, 70%LQ50), huit métriques estivales (Q90-S, Q95-S, 7Q2-S, 7Q10-

S, LQ50-S, 70%LQ50-S, AQ50, 70%AQ50) et les trois seuils de la méthode de Tennant (10%MAF, 25%MAF et 30%MAF). Les métriques 7Q2 et 7Q10 pour un pas de temps interannuel n'ont pas été retenues, car non conservatrices durant l'été, d'après les deux précédentes études. Pour obtenir les températures moyennes de l'eau, des valeurs mesurées de température de l'eau ont été recherchées pour des débits historiques égalant des intervalles de débits environnementaux calculés ($\pm 15\%$), par correspondance de date de mesure (jour et mois), pour les 53 sites étudiés.

Résultats et discussion

Les résultats sont présentés par site dans l'Annexe 4. Trois exemples ont été sélectionnés dans la [Figure 2](#). A noter qu'il peut ne pas y avoir de valeur de température d'eau correspondante à une valeur de débit environnemental (15 valeurs, [Fig. 2a](#); 14 valeurs, [Fig. 2b](#); 11 valeurs, [Fig. 2c](#)).



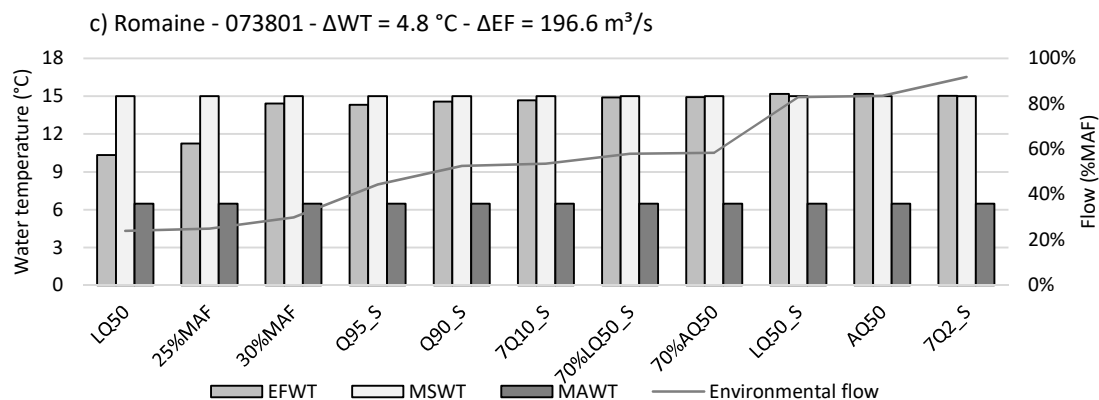


Figure 2 : Températures de l'eau associées à des débits environnementaux pour trois sites étudiés

Dans la [Figure 2](#), les débits sont présentés de la plus petite à la plus grande valeur. Ont été ajoutées, les valeurs moyennes de températures estivales (MSWT) et annuelles (MAWT) de l'eau. Il était attendu d'observer une augmentation de la température de l'eau avec la diminution des valeurs de débit ([Fig. 2a](#)). Or, les sites présentent majoritairement une faible variation de la température de l'eau en fonction des différentes valeurs de débit sans tendance ascendante ou descendante distinctive ([Fig. 2b](#)) ou une augmentation de la température de l'eau avec l'augmentation du débit ([Fig. 2c](#)). Aussi, l'usage d'un intervalle de $\pm 15\%$ du débit environnemental peut aboutir à donner une même moyenne de température de l'eau pour plusieurs métriques d'un même site.

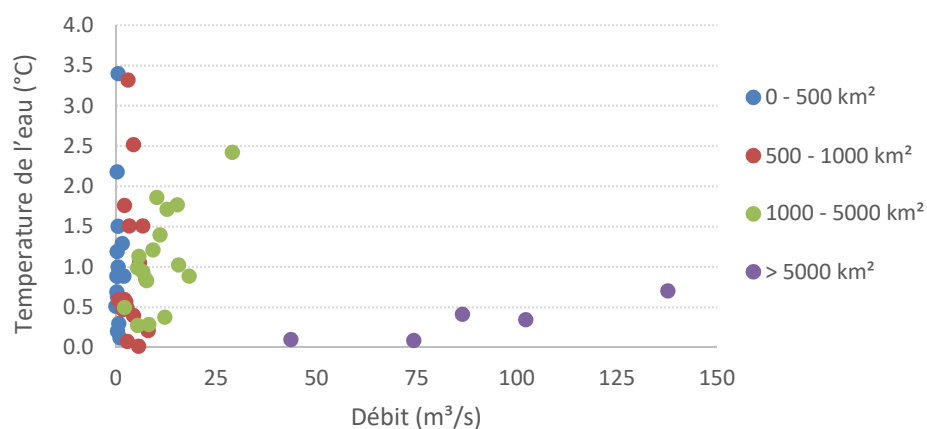


Figure 3 : Répartition des différences absolues entre 7Q2-S et Q95-S

La [Figure 3](#) présente la répartition des différences de valeurs de température de l'eau et de débit entre les métriques 7Q2-S (représentative des valeurs élevées) et Q95-S (représentative des faibles valeurs) pour les sites étudiés, et différents intervalles de taille de bassin versant. En plus de

constater une relation entre la taille du bassin versant et les valeurs de débit ([Daigle et al. 2011](#)), seules les rivières associées à de grands bassins versants (> 5000 km²) semblent se distinguer avec de faibles variations de la température de l'eau (< 1°C) entre les deux métriques 7Q2-S et Q95-S.

Le [Tableau 1](#) résume les résultats préliminaires de l'étude. Le nombre de rivières et de stations hydrométriques par région hydrographique sont indiqués, ainsi que les moyennes des différences des valeurs maximales et minimales de la température de l'eau et des débits environnementaux par site. Trois colonnes indiquent les variations régionales des différences des valeurs de température et de débit entre les métriques 7Q2-S et Q95-S, ainsi que la taille moyenne des bassins versants. À première vue, la variabilité régionale semble influencée par des spécificités propres à certaines rivières et/ou démontre une limite de la méthode utilisée.

Tableau 1 : Bilan préliminaire des résultats

Région	Rivière	Station	ΔWT (°C)	ΔEF (m ³ /s)	ΔWT (°C) de	ΔEF (m ³ /s) de	BV (km ²)
					7Q2-S – Q95-S	7Q2-S – Q95-S	
R01	6	6	2.6	8.6	1.2	6.9	1194
R02	13	15	1.6	4.5	0.7	3.4	748
R03	7	7	2.6	3.1	1.1	1.8	649
R04	4	5	2.4	16.7	0.6	13.1	2512
R05	9	9	3.1	5.8	1.4	4.9	819
R06	6	7	3.1	47.1	0.9	33.7	3435
R07	3	3	2.1	95.7	0.6	75.9	7233
R08	1	1	7.9	21.1	1.8	15.4	2010

Chaque cours d'eau est caractérisé par un intervalle de température de l'eau qui les sépare entre les rivières à *eaux chaudes* (principalement le long du Saint-Laurent) et les rivières à *eaux froides* (principalement en Gaspésie), qui peuvent être regroupées dans des écorégions avec leurs propres spécificités ([Belzile et al. 1997](#)). Dans le [Tableau 2](#), la moyenne des températures de l'eau et des valeurs de débit par métrique ont été calculées pour ces groupes de cours d'eau : à eaux chaudes (> 17°C en été) et à eaux froides (< 17°C en été). Pour les rivières à eaux chaudes, seules

les métriques LQ50-S, AQ50 et 7Q2-S donnent des valeurs de débit supérieures au 30%MAF. La différence de variation (MAX - MIN) de la température de l'eau est de 0,8 °C pour une variation du débit de 6,1 m³/s. Pour les rivières à eaux froides, seules les métriques calculées pour un pas de temps estival donnent des valeurs de débit supérieures au 30%MAF. La différence de variation (MAX - MIN) de la température de l'eau est de 1,7 °C pour une variation du débit de 45,8 m³/s.

Tableau 2 : Moyennes des températures de l'eau et de débit par métriques, en distinguant les rivières à eaux chaudes (34) et froides (19)

<i>Eaux chaudes</i>				<i>Eaux froides</i>		
	Métriques	Température de l'eau (°C)	Débit (m³/s)	Métriques	Température de l'eau (°C)	Débit (m³/s)
1	10%MAF	19.3	2.1	10%MAF	13.8	5.9
2	Q95	18.9	3.0	Q95	14.5	7.2
3	Q95-S	18.6	3.1	70%LQ50	14.4	8.0
4	70%LQ50	18.8	3.4	Q90	14.2	8.5
5	Q90-S	18.8	3.7	LQ50	14.2	12.8
6	Q90	19.1	3.8	25%MAF	14.4	14.8
7	7Q10-S	18.8	3.8	30%MAF	15.2	17.8
8	LQ50	19.1	4.8	Q95-S	14.6	24.2
9	70%LQ50-S	19.0	5.0	Q90-S	14.9	28.6
10	70%AQ50	19.1	5.1	7Q10-S	14.9	29.1
11	25%MAF	18.8	5.2	70%AQ50	15.5	33.3
12	30%MAF	19.4	6.2	70%LQ50-S	15.4	33.3
13	LQ50-S	19.3	7.1	AQ50	15.6	47.6
14	AQ50	19.2	7.3	LQ50-S	15.5	47.6
15	7Q2-S	19.2	8.1	7Q2-S	15.4	51.7
	MAX - MIN	0.8	6.1	MAX - MIN	1.7	45.8

À l'aide d'articles sur l'écologie des rivières du Québec méridional, il s'agira en partie de comprendre l'évolution des intervalles de températures observées dans les différents cours d'eau. Quand la température diminue en même temps que le débit, est-ce que cela témoigne d'un apport en eau souterraine ? Ensuite, il faut qualifier l'impact de ces variations de

températures de l'eau sur les écosystèmes riverains. Le lien avec la qualité de l'eau serait fait et les résultats mis en perspective par rapport aux changements climatiques. Qu'est-ce que donnerait une élévation de la température de l'air par rapport à la température de l'eau ? En effet, durant les périodes d'étiage estivales, il est principalement question de l'alimentation des poissons et selon la localisation du cours d'eau, de la migration de l'anguille d'Amérique et de la Fraye des salmonidés ([Belzile et al. 1997](#)). Les notions de sensibilité et de santé des écosystèmes riverains seront aussi abordées.

Annexe 4 : Cette annexe présente les 53 sites étudiés des température de l'eau en fonction des débits environnementaux.

1.6 Estimer les débits environnementaux avec les effets du changement climatique

(Les paragraphes suivants résument les éléments qui seront développés dans un article à venir.)

Contexte

Pour prévenir la demande croissante de prélèvements estivaux et hivernaux d'eau, cette quatrième partie porte sur l'étude de la variation des valeurs des débits environnementaux entre les horizons 1990 et 2050, en se basant sur des débits simulés à partir de scénarios de changements climatiques.

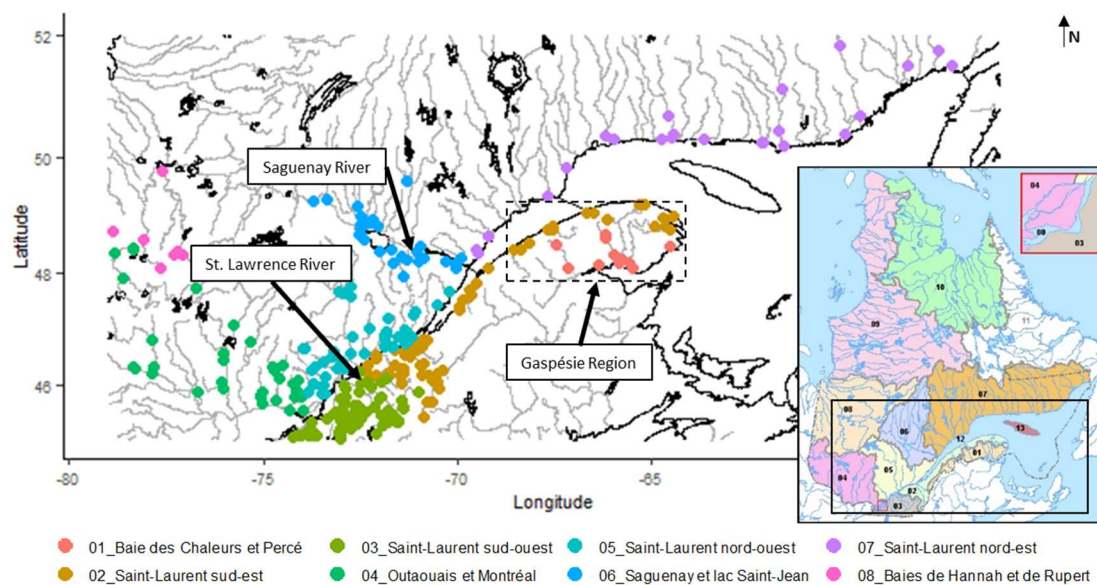


Figure 4 : Sites pour l'étude de l'impact des changements climatiques sur les débits d'étiage

Cette étude vise à évaluer le besoin d'adapter les méthodes d'estimation des débits environnementaux dans les rivières du Québec méridionale en fonction des prédictions. Un échantillon de 284 sites issus des huit régions hydrographiques a été sélectionné ([Figure 4](#)).

Méthode

Dans la base de données de la Direction de l'Expertise Hydrique du Québec, six séries de données de débits simulés, deux pessimistes, deux intermédiaires et deux optimistes, parmi ceux issus des scénarios de changements climatiques RCP4.5 et RCP8.5 du GIEC, ont été sélectionnés. C'est le logiciel HYDROTEL (modèle LN24HA) qui a été utilisé pour simuler les débits pour des périodes de 30 ans, de 2011 à 2040 et de 2041 à 2070, à partir d'une série de débits reconstituée pour la période de 1981 à 2010. Par la suite, ces périodes seront désignées par les termes horizon 1990, horizon 2020 et horizon 2050. Les débits environnementaux calculés dans le premier article ont été repris, soit six métriques interannuelles (7Q2, 7Q10, Q90, Q95, LQ50, 70%LQ50), huit métriques estivales (7Q2-S, 7Q10-S, Q90-S, Q95-S, LQ50-S, 70%LQ50-S, AQ50, 70%AQ50) et six métriques hivernales (7Q2-W, 7Q10-W, Q90-W, Q95-W, LQ50-W, 70%LQ50-W). Les trois limites de Tennant (10%MAF, 25%MAF et 30%MAF) ont aussi été réutilisées pour comparer les résultats.

Les calculs ont été faits pour les périodes interannuelles, estivales et hivernales. Aussi :

- Les séries de débit n'ont pas été post-traitées et les valeurs comparées dans la partie résultat ont été standardisées par le débit moyen annuel (%MAF);
- La priorité a été donnée aux métriques non restreintes par les conditions statistiques d'analyse fréquentielle (hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité).

Le [Tableau 3](#) indique le nombre de stations pour lesquelles le 7Q2 et le 7Q10 ont été calculés, par horizon et par temporalité. Les noms des modèles climatiques retenus sont aussi indiqués.

Tableau 3 : Nombre de stations retenus pour les calculs des métriques 7Q2 et 7Q10

		RCP4.5			RCP8.5			
Global Climate Model	CM5 IAL XXX R41	CM5 INM XXX R41	CM5 CE2 XXX R43	CMX CE2 CO1 KET	CM5 CMC XXX R81	CMX CE2 CO1 KDQ		
Qualificatif	<i>Optimistic</i>	<i>Intermediate</i>	<i>Pessimistic</i>	<i>Optimistic</i>	<i>Intermediate</i>	<i>Pessimistic</i>		
Horizon	1990	<i>Inter-annual</i>	278	281	231	201	246	230
		<i>Summer</i>	263	280	105	209	265	275
		<i>Winter</i>	282	122	229	229	120	207
	2020	<i>Inter-annual</i>	280	280	170	217	262	184
		<i>Summer</i>	281	272	40	226	241	124
		<i>Winter</i>	282	246	56	250	257	21
	2050	<i>Inter-annual</i>	180	246	266	244	247	219
		<i>Summer</i>	219	268	273	260	230	206
		<i>Winter</i>	19	270	224	264	230	206

Résultats et discussion

Les [Figures 5 et 6](#) présentent la variation des moyennes ([Figure 5](#)) et des valeurs ([Figure 6](#)) des métriques (%MAF) pour les horizons 1990, 2020 et 2050. Ces résultats prennent en compte les six scénarios de changements climatiques, pour les 284 sites. Les valeurs sont classées de la plus petite à la plus grande médiane pour l'horizon 1990. Il ressort deux principales observations (1) les débits associés aux métriques estivales diminuent avec le temps et (2) les débits associés aux métriques hivernales et interannuelles augmentent avec le temps. Par conséquent, la taille des boxplots ([Figure 6](#)) augmente avec le temps et il s'agira d'estimer quand :

- La métrique AQ50 ne sera plus assez conservatrice par rapport aux limites de Tennant;
- La métrique LQ50 deviendrait une alternative plus conservatrice en hiver;
- Le calcul des 7Q10 et 7Q2 est limité par la non stationnarité des séries temporelles;
- Les sites de la rive sud du Saint-Laurent seront plus impactés (diminution de la protection des écosystèmes riverains avec des débits plus faibles en été) que les sites de la rive nord.

L'Annexe 5 reprend ces graphiques pour l'ensemble des régions hydrographiques, ainsi que le pourcentage de différences entre les horizons 1990 et 2020 et les horizons 2020 et 2030 en fin d'Annexe 5.

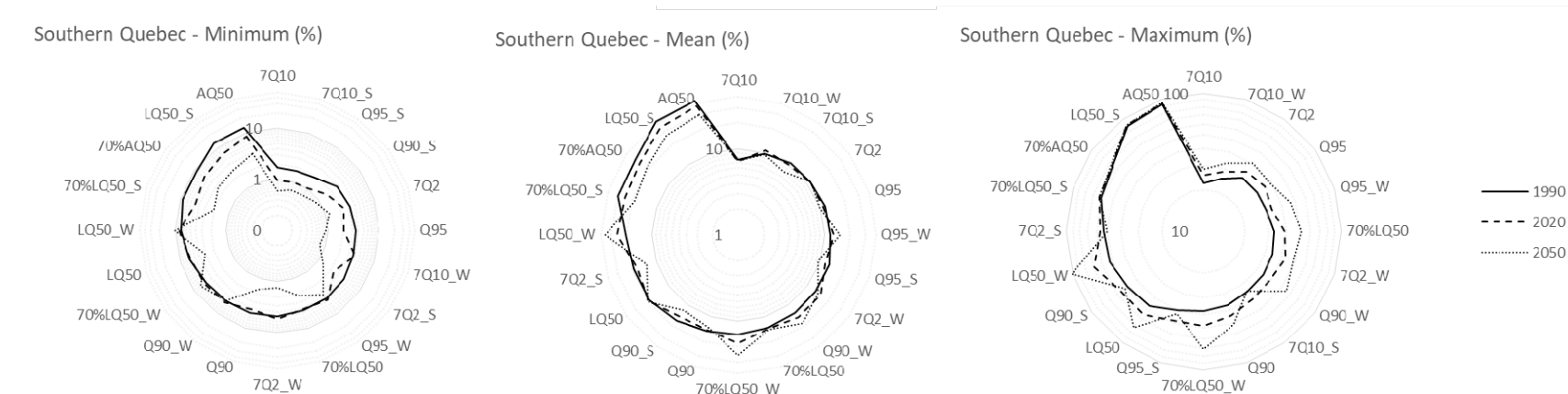


Figure 5 : Variation des valeurs moyennes des métriques (%MAF) pour les horizons 1990, 2020 et 2050, pour les six scénarios climatiques

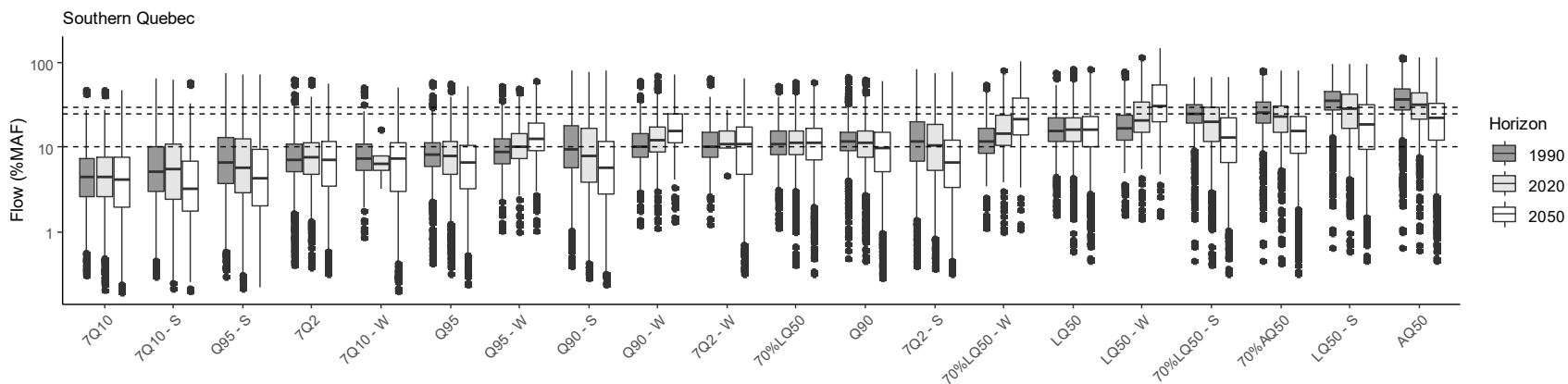


Figure 6 : Variation des valeurs des métriques (%MAF) pour les horizons 1990, 2020 et 2050, pour les six scénarios climatiques

La [Figure 7](#) présente la répartition des stations hydrométriques en indiquant le mois au plus faible débit à l'horizon 2050, pour une période interannuelle. Entre les horizons 2020 et 2050, le mois au plus faible débit passe de la saison hivernale à l'estivale (de février aux mois d'août et septembre) au Sud et à l'Ouest du Québec méridional ou recul d'un mois (de mars à février) pour quelques stations situées sur la Côte Nord. Le même exercice a été fait pour les saisons estivale et hivernale dans l'Annexe 6, démontrant aussi un décalage d'un mois (recul) pour la région gaspésienne.

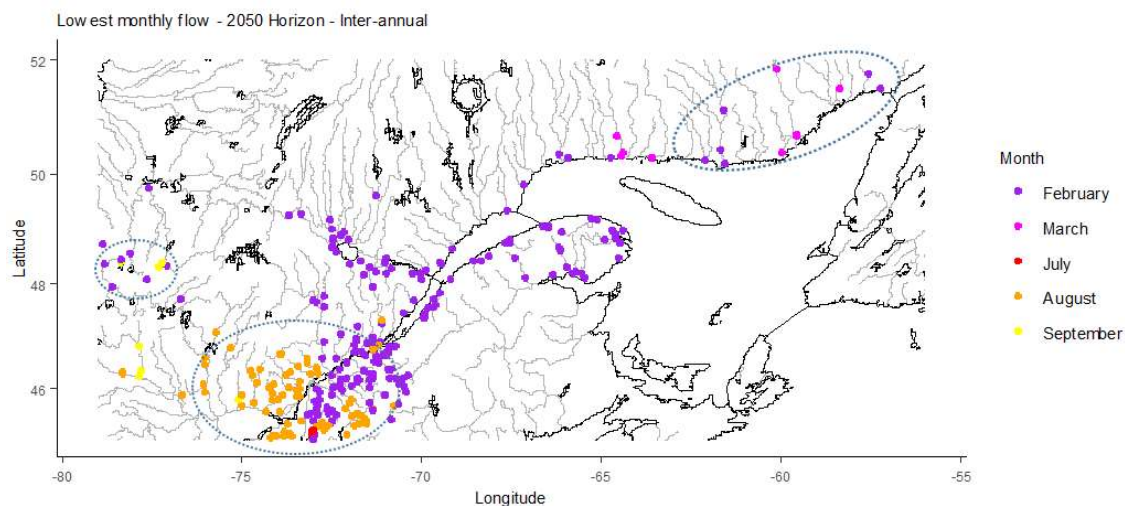


Figure 7 : Mois au plus faible débit à l'horizon 2050 pour une période interannuelle

Enfin, l'Annexe 7 présente le pourcentage de variation de chaque métrique entre les horizons 2020 et 2050 et les trois temporalités (interannuel, estival et hivernal). Après avoir étudié la potentielle variation de l'amplitude, de l'occurrence, des dates et des durées des différentes valeurs de chaque métriques pour les trois horizons, l'article tâchera d'évaluer quelles métriques seront les plus probablement conservatrices à l'avenir.

Annexe 5 : Métriques et limites de Tennant simulées pour des changements climatiques

Annexe 6 : Cartes des mois au plus faible débit

Annexe 7 : Cartes des variations des métriques entre les horizon 2020 et 2050

Note au lecteur et à la lectrice (mise à jour août 2021) :

Article 2 : une seconde version a été soumise à *Ecological Indicators* et **Article 3** : Berthot L., A. St-Hilaire, D. Caissie, N. El-Jabi, J. Kirby & S. Ouellet-Proulx (202X): Environmental flow assessment in the context of climate change: A case study in Southern Quebec (Canada), *soumis au Journal of Water and Climate Change*, en cours de révision.

DISCUSSION ET CONCLUSION

1.7 L'analyse fréquentielle pour déterminer les débits environnementaux

L'analyse fréquentielle appartient à la famille des statistiques de prédiction, appliquée pour calculer les métriques 7Q10 et 7Q2. Elle diffère de la statistique descriptive utilisée pour les calculs des métriques AQ50, 30%MAF ou Q90, qui se base sur l'étude des débits historiques d'une rivière. Plus précisément, l'analyse fréquentielle univariée porte sur l'étude d'évènements hydrologiques extrêmes tirés d'une série temporelle correspondant à l'évolution du débit (variable expliquée) en fonction du temps (variable explicative). Dans un premier temps, il faut créer une variable contenant les évènements extrêmes à étudier pour le(s) pas de temps souhaité(s). Pour les métriques 7Q10 et 7Q2, les débits minimums d'une moyenne mobile de 7 jours ont été extraits pour les pas de temps annuel, estival (juillet, août, septembre) et hivernal (janvier, février, mars). Afin d'avoir une variable représentative de chaque cours d'eau, le choix a été fait de garder les stations hydrométriques (1) ayant un minimum de vingt ans de données, (2) sans débit manquant et (3) placées sur des rivières à écoulement naturel. Dans un second temps, il faut que la variable étudiée soit statistiquement significative, autrement dit, que les débits la constituant soient statistiquement indépendants les uns des autres et identiquement distribués. Pour cela, les tests statistiques non-paramétriques de Mann-Kendall, Wald-Wolfowitz et Wilcoxon vérifient respectivement si la variable est stationnaire, indépendante et homogène (H_0 acceptée pour une $p\text{-value} \geq 0.05$). C'est cette étape qui détermine la taille de l'échantillon de stations étudiées (Annexe 1 ; Annexe 2 ; [Tableau 3](#)). Enfin, trois lois de distribution en adéquation avec la distribution des débits minimums ont été choisies à l'aide des tests de Kolmogorov-Smirnov et du Chi-carré : Generalized Extreme Values (GEV), Weibull (deux paramètres) et Gumbel. Puis, les critères d'information Akaike et bayésien ont permis de sélectionner la GEV comme étant la de distribution la plus adaptée.

Ainsi, tout au long des travaux menés dans ce rapport, les résultats de différentes métriques ont été comparé entre des rivières à écoulement naturel, avec un cycle hydrologique naturel, non influencé par les changements climatiques. Si l'hydrologie d'un cours d'eau ne suivait plus un cycle *naturel*, l'hypothèse de stationnarité ne serait pas vérifiée (H_0 rejetée pour une $p\text{-value} \geq 0.05$). Autrement dit, il y aurait une tendance dans la distribution des données de débits au cours du

temps. Les tendances généralement observées pour de grandes fenêtres temporelles, appuient le besoin de développer l'usage de l'analyse fréquentielle. Or, la présence d'une tendance impliquerait de faire de l'analyse fréquentielle univariée non stationnaire, dont les résultats devront être post-traités avant d'être interprétés. Pour éviter cela, les débits simulés de la partie 2.3 ont été scindés en trois périodes de trente ans, afin de vérifier l'hypothèse de stationnarité (pas de tendance). La question des changements climatiques est posée quand la fréquence des événements hydrologiques extrêmes (sécheresses et inondations) augmentent dans une courte période de temps. C'est l'étude des séries temporelles historiques et ou simulées, de chaque stations hydrométriques, qui permet de définir si ces événements rares font partie d'un cycle hydrologique naturel ou modifié par les changements climatiques. Par conséquent, l'analyse fréquentielle semble être un outil très pertinent car :

- Permettant d'identifier l'influence des changements climatiques sur le cycle hydrologique naturel en tenant compte des valeurs extrêmes de ce cycle;
- Pouvant être adaptée à la non stationnarité en éliminant la présence d'une tendance;
- Pouvant être plus complexe avec l'analyse fréquentielle multivariée, qui tient compte de plusieurs variables explicatives (durée, amplitude...) d'un même événement extrême.

Or, l'analyse fréquentielle univariée fait appel à un domaine statistique très pointu, nécessitant des bases de données de qualité requérant 20 à 30 ans de données au minimum, et n'est pas le premier choix pour calculer les débits environnementaux, protéger et maintenir les écosystèmes riverains au Québec méridional ([Belzile et al. 1997](#)). Poursuivre l'usage de l'analyse fréquentielle pour calculer les débits environnementaux est un risque d'autant plus considérable quand il est attendu d'avoir des événements extrêmes plus intenses pour l'horizon 2050 (Annexe 5). A l'horizon 2050, l'impact climatique le plus certain (Annexe 5, Annexe 6, Annexe 7), sera d'avoir un débit d'étiage plus élevé en hiver qu'en été, à l'inverse de ce qui a été observé du passé à nos jours (Annexe 1). Par conséquent, l'analyse fréquentielle univariée (et/ou multivariée) pourrait continuer de prévenir l'impact des changements climatiques mais aussi, aider à catégoriser et cibler les rivières qui auront des probabilités plus ou moins fortes, de subir des épisodes intenses de sécheresse et/ou de stress hydriques en période d'étiage. Enfin, comme pour toutes les métriques calculées, l'interprétation des résultats est limitée à la zone de répartition des stations hydrométriques étudiées. Hors contraintes liées à l'analyse fréquentielle, le nombre de stations étudiées pour la détermination des débits environnementaux ne serait pas diminué et les comparaisons régionales plus représentatives.

1.8 Déterminer les débits environnementaux au Québec méridional

Les métriques 7Q2 et 7Q10 sont appliquées dans les rivières du Québec méridionale dans le cadre, respectivement, de la gestion du partage de l'eau durant les périodes d'étiage ([MELCC 2015](#)) et des objectifs environnementaux de rejet ([MELCC 2007](#)). Dans le présent rapport, visant à déterminer les débits environnementaux des rivières, les résultats pour ces débits plancher montrent que le 7Q10 n'est pas recommandé aux pas de temps interannuel, estival et hivernal pour assurer le maintien et la protection des écosystèmes riverains et que le 7Q2 peut être envisagé seulement si calculé pour une période estivale. Ces métriques ne sont pas les plus conservatrices pour les considérer comme de potentiels débits environnementaux, d'autant plus quand elles sont appliquées comme aujourd'hui, dans tous les cours d'eau du Québec méridional. Ces conclusions obtenues à partir de comparaisons avec les limites de conservation proposées par [Tennant \(1976\)](#), rejoignent celles des travaux de [Belzile et al. 1997](#), préconisant l'usage de métriques basées sur le débit moyen d'une période (annuelle, saisonnière, mensuelle) et non pas sur des événements extrêmes ponctuels. Pour déterminer les débits environnementaux, la littérature scientifique distingue quatre catégories de méthodes : hydrologiques, hydrauliques, habitats préférentiels et exhaustives. Parmi les méthodes exhaustives, la méthode ELOHA (*Ecological limits of hydrologic alteration* ; [Poff et al. 2010](#)) est d'intérêt car répondant aux principes d'une gestion équitable, durable et efficace, énoncés par le MELCC. Aussi, la méthode ELOHA est transversale aux quatre catégories de méthodes :

- (1) Modéliser et décrire le profil hydrologique de la rivière ciblée ;
- (2) Classer la rivière d'après ses caractéristiques géomorphologiques ;
- (3) Analyser une potentielle altération du débit par rapport au régime naturel de la rivière ;
- (4) Faire le lien entre l'évolution du débit et l'écologie de la rivière ciblée.

A ces étapes scientifiques, s'ajoute un processus social pour le choix, l'acceptation et la mise en place du débit environnemental de la rivière ciblée. A noter que les travaux de [Belzile et al. 1997](#) rejoignent la méthode ELOHA, sans le processus de décision et d'acceptation sociale.

Dans le présent rapport, les résultats des différents travaux menés permettent de pousser la réflexion sur cinq aspects liés à la détermination des débits environnementaux :

- (1) La localisation des rivières étudiées du Québec méridional et leurs caractéristiques ;
- (2) Le choix de la temporalité pour le calcul d'une ou plusieurs métriques ;
- (3) L'utilisation d'outils supplémentaires : a) le périmètre mouillé ;

- (4) L'utilisation d'outils supplémentaires : b) la température de l'eau ;
- (5) L'impact des changements climatiques sur la détermination des débits environnementaux.

Le Québec méridional représente une zone d'étude étalée sur près de 730 000 km². En l'absence de données écologiques, il s'agissait de questionner l'usage d'une seule ou de plusieurs métriques sur tout le territoire (Annexe 1). Les résultats ont d'abord montré que les rivières groupées dans les régions hydrographiques, délimitées à partir de caractéristiques hydrologiques, climatologiques et géomorphologiques, pouvaient aussi être réunies dans des groupes (PC-HC) créés à partir d'indices hydrologiques d'étiage. Ce constat offre deux réflexions : (1) déterminer un débit environnemental pour chaque ensemble de rivières classées à partir d'indices d'étiage (PC-HC) et (2) prévoir plusieurs débits environnementaux pour s'adapter à divers profils hydrologiques réunis dans un même bassin versant ou une même région hydrographique. Ensuite, il apparaît que la Direction de l'Expertise Hydrique du Québec donne le choix de la temporalité utilisée dans la méthode de calcul des débits d'étiage. De même pour la gestion du partage de l'eau, le terme *7Q2 originel*, n'indique pas la temporalité souhaitée. Outre le fait que le calcul de ces indices dépendent de la base de données disponible, la valeur de débit résultant change d'ordre de grandeur, qu'il soit calculé pour un pas de temps interannuel, estival ou hivernal ([Figure 6](#)). Les résultats présentés dans le présent rapport montrent que les métriques calculées pour une période estivale donnent des valeurs de débits plus élevés que celles calculées pour une période interannuelle ou hivernale. Ce constat met de l'avant la nécessité de calculer en priorité, quand cela est possible, un débit environnemental pour la période de prélèvement visée, estivale ou hivernale. Dans le premier article, il a été assumé que la méthode de Tennant pouvait s'appliquer pour identifier des débits seuils de protection des écosystèmes des rivières du Québec méridional, soit le 25%MAF et le 30%MAF. Le seuil de 10%MAF indiquait une limite minimale non conservatrice. En utilisant le périmètre mouillé à large échelle, puis localement pour une section de rivière donnée, il a été possible de tester la pertinence de ces seuils hypothétiques, par rapport à la méthode de maximum de courbature indiquant le débit à partir duquel l'habitat du poisson diminuait fortement. Les résultats montrent que les métriques estivales, le 25%MAF et 30%MAF donnent les valeurs les plus conservatrices. Pour un site donné, le 25%MAF ou 30%MAF peut être la limite minimale non conservatrice. Ce point a pu confirmer l'existence de sites à hauts risques en période d'étiage. De même, la température de l'eau est une façon concrète et localisée de

mieux comprendre l'impact des débits plancher sur les écosystèmes riverains. Pour rappel, l'étiage estival correspond à la phase d'alimentation des poissons. Ce paramètre physico-chimique étant intrasèquement lié à la qualité du milieu, soit la chimie de l'eau ou plus directement la présence de nutriments, il est de fait, un facteur incontournable de sa préservation. De plus, le 7Q10 étant préconisé pour répondre aux objectifs environnementaux de rejet, il apparaît opportun d'évaluer ce qu'un très faible débit associé à une certaine température de l'eau peut induire en termes de qualité de l'eau. Sans oublier que la température de l'eau est aussi un moyen de mesurer l'apport en eau souterraine en rivière. Enfin, le dernier aspect lié à la détermination des débits environnementaux porte sur l'impact des changements climatiques sur les débits des rivières. Les premiers résultats montrent une augmentation du débit d'étiage en hiver et une diminution du débit d'étiage en été. Soit, l'étiage estival est plus élevé que l'hivernal aujourd'hui et l'inverse est attendu, à l'horizon 2050. En plus de la modification du cycle hydrologique, c'est tout le milieu de vie des écosystèmes riverains qui risque d'être modifié, d'autant plus si la demande en eau durant l'été se poursuit sans restrictions. Prévoir les débits environnementaux à l'horizon 2050, pourrait passer par la mise en place d'une gestion ou réglementation écosystémique et une mise à jour régulière des observations biologiques.

Finalement, l'utilisation des métriques recommandées par [Belzile et al. \(1997\)](#), adaptées à des zones spécifiques, paraît pertinente et d'actualité pour la protection d'espèces cibles. À l'image du travail réalisé par [Tennant \(1976\)](#) et des méthode exhaustives ([Poff et al. 2010](#), [Richter et al. 1996](#), [Tharme 2003](#), [Pahl-Wostl et al. 2013](#), [Poff et Zimmerman 2010](#), [Linnansaari et al. 2013](#), [Arthington 2012](#)) proposées, la détermination des débits environnementaux impliquerait alors de:

- Développer des modèles de gestion et de réglementations écosystémiques à différentes échelles d'application notamment à l'aide des organismes de bassins versants ;
- Définir les seuils de protection des écosystèmes riverains des rivières du Québec ;
- Rendre accessible des outils pour la détermination des débits environnementaux (périmètre mouillé, température de l'eau, chimie de l'eau, apport en eau souterraine...) ;
- Questionner les besoins, les usages, les réglementations et la performance du réseau ;
- Approfondir la recherche sur l'impact de l'usage intensif de l'eau de surface en période de stress hydrique, de la modification des parcours et de l'impact des infrastructures sur les ressources en eau de surface, l'impact de l'imperméabilisation et de l'usage des sols.

RÉFÉRENCES DU RAPPORT

- Anctil, F., W. Larouche, et V. D. Hoang. 2000. « Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec ». *Water Quality Research Journal of Canada* 35 (1): 125-146.
- Arthington, A. H., J. G. Kenne, E. D. Stein, and J. A. Webb. 2018. "Recent Advances in Environmental Flows Science and Water Management: Innovation in the Anthropocene." *Freshwater Biology* 63 (8): 1022–1034. doi:[10.1111/fwb.13108](https://doi.org/10.1111/fwb.13108).
- Arthington, A. H. 2012. *Environmental flows: saving rivers in the Third Millennium*. *Freshwater ecology series*. Berkeley, CA : University of California. doi : [10.1525/california/9780520273696.001.0001](https://doi.org/10.1525/california/9780520273696.001.0001).
- Beaudelin, P. et Bérubé, P. 1994. « Cadre d'analyse des projets de petites centrales hydroélectriques. » Document de régie interne. Québec : Ministère de l'Environnement et de la Faune.
- Belzile, L., P. Bérubé, V. D. Hoang, and M. Leclerc. 1997. « Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. » Rapport scientifique, Ministère de l'Environnement et de la Faune et Pêches et Océans Canada.
- Bérubé, P., M. Leclerc, and L. Belzile. 2002. "Presentation of an ecohydrological method for determining the conservative flow for fish habitats in Quebec's rivers (Canada)". In: *Proceedings of the 4th IAHR International Symposium on Ecohydraulics*. Capetown, South Africa. 23p.
- Caissie, D., and N. El-Jabi. 1995. "Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada." *Canadian Journal of Civil Engineering* 22 (2): 235-246. doi:[10.1139/l95-033](https://doi.org/10.1139/l95-033).
- Caissie, D., N. El-Jabi, and C. Hebert. 2007. "Comparison of hydrologically based instream flow methods using a resampling technique." *Canadian Journal of Civil Engineering* 34 (1): 66-74. doi:[10.1139/l06-095](https://doi.org/10.1139/l06-095).
- Caissie, J., D. Caissie, and N. El-Jabi. 2015. « Hydrologically based environmental flow methods applied to rivers in the Maritime Provinces (Canada)." *River Research and Applications* 31 (6) : 651-662. doi:[10.1002/rra.2772](https://doi.org/10.1002/rra.2772).
- Daigle, A., A. St-Hilaire, D. Beveridge, D. Caissie, and L. Benyahya. 2011. 'Multivariate analysis of the low-flow regimes in eastern Canadian rivers.' *Hydrological Sciences Journal* 56 (1): 51 – 67. doi:[10.1080/02626667.2010.535002](https://doi.org/10.1080/02626667.2010.535002).
- Fortin, J.-P. et A. Royer. 2004. HYDROTEL : Le modèle hydrologique HYDROTEL, Bases théoriques. Guide théorique adressé aux utilisations du modèle hydrologique
- GIEC. 2014. Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évaluation du Climat. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 1535 p.
- Hersh, R. S., and D. R. Maidment. 2006. "Assessment of Hydrologic Alteration Software." The University of Texas at Austin CRWR Online Report 06–11.
https://repositories.lib.utexas.edu/bitstream/handle/2152/7019/crwr_onlinereport06-11.pdf?sequence=2
- Linnansaari, T., W. A. Monk, D. J. Baird, and R. A. Curry. 2013. "Review of Approaches and Methods to Assess Environmental Flows across Canada and Internationally." Canadian Science Advisory Secretariat document 2012-039, vi þ 73 pp.
- LQE. 2009. *Loi sur la qualité de l'environnement, C-Q-2, à jour au 1^{er} septembre 2020*, art. 31.74. Accès le 29 janvier 2021. <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cs/Q-2>
- LSE. 2009. *Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection, adoptée le 11 juin 2009*. Accès le 29 janvier 2021.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/protection/index.htm>
- MELCC. 2020. Direction de l'Expertise Hydrique et Atmosphérique du Québec. *Lignes directrices pour l'estimation des débits d'étiage sur le territoire québécois*. Mise à jour en juin 2020, accès 29 janvier 2021. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/debit-etiage/methode/>
- MELCC. 2015. Direction de l'Expertise Hydrique et Atmosphérique du Québec. *Guide de conception des installations de production d'eau potable, Volume 1*. Accès 29 janvier 2021.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/index.htm>
- MELCC. 2014. *Règlement sur le prélèvement des eaux et leur protection adopté en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement et la Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et favorisant une meilleure gouvernance de l'eau et des milieux associés, C-Q-2, r.35.2, à jour au 1^{er} août 2020*.
- MELCC. 2007. *Calcul et interprétation des objectifs environnementaux de rejet pour les contaminants du milieu aquatique, 2e édition*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN-978-2-550-49172-9 (PDF), 56 p. et 4 annexes.
- MELCC. 2005. *Entente sur les ressources en eaux durables du bassin des Grands Lacs et du fleuve Saint-Laurent*, 13 décembre 2005.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/grandslacs/2005/Entente.pdf>
- MFFP. 2015. *Règlement sur les habitats fauniques adopté en vertu de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, C-61.1, r.18, à jour au 1^{er} août 2020*, art. 17.
- MFFP. 1999. *Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats*. Direction de la faune et des habitats. 23 p. Bibliothèque nationale du Québec, 1999 ISBN : 2-550-34603-3. https://mffp.gouv.qc.ca/faune/habitats-fauniques/pdf/poli_debits_reserves.pdf

- Monk W. A, Wood P. J, Hannah D. M and Wilson D. A. 2008. "Macroinvertebrate community response to inter-annual and regional river flow regime dynamics." *River Research and Applications* 24 (7): 988-1001. doi: [10.1002/rra.1120](https://doi.org/10.1002/rra.1120)
- Olden, J. D., and N. L. Poff. 2003. "Redundancy and the Choice of Hydrologic Indices for Characterizing Streamflow Regimes." *River Research and Applications* 19 (2): 101–121. doi:[10.1002/rra.700](https://doi.org/10.1002/rra.700).
- Pahl-Wostl, C., A. Arthington, J. Bogardi, S. E. Bunn, H. Hoff, L. Lebel, E. Nikitina, et al. 2013. "Environmental Flows and Water Governance: Managing Sustainable Water Uses." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5 (3–4): 341–351. doi:[10.1016/j.cosust.2013.06.009](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.009).
- Poff, N. L., and J. K. H. Zimmerman. 2010. "Ecological Responses to Altered Flow Regimes: A Literature Review to Inform Environmental Flows Science and Management." *Freshwater Biology* 55 (1): 194–205. doi: [10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x).
- Poff, N. L., B. D. Richter, A. H. Arthington, S. E. Bunn, R. J. Naiman, E. Kendy, M. Acreman, et al. 2010. "The Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA): A New Framework for Developing Regional Environmental Flow Standards." *Freshwater Biology* 55 (1): 147–170. doi: [10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x).
- Reiser D. W., T. A. Wesche and C. Estes. 1989. "Status of instream flow legislation and practices in North America." *Fisheries* 14 (2): 22-29. doi: [10.1577/1548-8446\(1989\)014<0022:SOIFLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1989)014<0022:SOIFLA>2.0.CO;2)
- Richter, B. D., M. M. Davis, C. Apse, and C. Konrad. 2011. "A presumptive standard for environmental flow protection." *River Research Applications* 28 (8): 1312-1321. doi [10.1002/rra.1511](https://doi.org/10.1002/rra.1511).
- Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell, and D. P. Braun. 1996. "A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems." *Conservation Biology* 10 (4): 1163–1174. doi:[10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x).
- Tennant, D. L. 1976. "Instream Flow Regimens for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources." *Fisheries* 1 (4): 6–10. doi: [10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2)
- Tharme, R. E. 2003. "A Global Perspective on Environmental Flow Assessment: Emerging Trends in the Development and Application of Environmental Flow Methodologies for Rivers." *River Research and Applications* 19 (5–6): 397–441. doi:[10.1002/rra.736](https://doi.org/10.1002/rra.736).

ANNEXE 1

Southern Quebec environmental flow assessments: spatial and temporal scales sensitivity

Laureline Berthot¹, André St-Hilaire¹, Daniel Caissie², Nassir El-Jabi³, Judith Kirby⁴ and Sébastien Ouellet-Proulx⁴

¹*Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada;*

²*University of Moncton, Civil engineering, Moncton, Canada;*

³*Fisheries and Oceans Canada, Freshwater Habitat Science Section, Moncton, New Brunswick, Canada;*

⁴*Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, Direction générale des politiques de l'eau, Québec, Canada*

¹ Corresponding author at : Centre Eau Terre Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique, 490, rue de la Couronne, Québec, G1K 9A9, Canada. E-mail address: laureline.berthot@ete.inrs.ca (L.Berthot).

ABSTRACT

Faced with increasing demands for water withdrawals and a changing climate, the Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change is reviewing its water withdrawal guidelines to protect riverine ecosystems. For Southern Quebec, guidelines currently limit water withdrawals to a maximum of 15% of the 7Q2 (mean 7-day low flow with a return period of two years) during low flow periods. In this context, one of the issues raised is to investigate measures that help to preserve riverine ecosystems during low flow periods by establishing cut-off flow restrictions. This study compared eight low flow metrics to investigate which can be considered useful metrics to assess environmental flow in Southern Quebec rivers. Using 98 hydrometrics stations with a minimum of 20 years of daily flow data from eight hydrological regions, those low flow metrics were compared to three thresholds based on Tennant Method for monthly and annual temporal scales. The relevance of current hydrological regions delineation was investigated by looking at results within these regions, compared to six groups of stations defined using multivariate analyses. This study emphasizes that assessing environmental flows is linked to the hydrological context of the area of interest, the temporal scale of the historical data available, and the catchment size. The results showed that (1) winter low flows were lower than summer low flows; (2) 23% to 26% of the values were under the conservative thresholds for all the metrics depending of the time scale; and (3) the 7Q2, 7Q10 (mean 7-day low flow with a return period of ten years), Q95 and Q90 (95th and 90th percentile on the flow duration curve) are the less conservative for rivers having a low regime flow. To conclude, assessing several regionally adapted environmental flow metrics is recommended rather than systematically using the 7Q2 for Southern Quebec.

KEYWORDS: Environmental flows, temporal scale, hydrological regions, riverine ecosystem sustainability, water sharing guidelines.

RÉSUMÉ

Face à la demande croissante de prélèvements d'eau et aux changements climatiques, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec révisé sa politique de partage des eaux pour protéger ses écosystèmes riverains. Au Québec méridional, les prélèvements d'eau sont actuellement limités à un maximum de 15% du 7Q2 (débit minimum d'une moyenne mobile de 7 jours et une période de retour de deux ans) durant les périodes d'étiage. Dans ce contexte, une étude hydrologique a été faite pour déterminer les débits planchers, en dessous desquels il n'est plus permis de prélever d'eau. Dans cette étude, les résultats de huit métriques ont été comparés à trois seuils issus de la méthode de Tennant, pour des temporalités mensuelles et annuelles, afin de pointer celles pouvant être considérées comme des débits environnementaux. Les débits journaliers, ayant au moins 20 ans de données, proviennent de 98 stations situées dans huit régions hydrographiques. La pertinence de celles-ci a été étudiée en considérant les résultats dans ces régions, mais aussi dans six groupes de stations définis à l'aide d'analyses multivariées. Il ressort que la détermination d'un débit environnemental est liée au contexte hydrologique de la zone d'étude, à la temporalité et à la taille du bassin versant. De plus, les résultats ont montré que (1) les débits hivernaux étaient inférieurs aux estivaux ; (2) 23 % à 26 % des métriques calculées étaient inférieures aux seuils de restriction, selon l'échelle temporelle ; et (3) le 7Q2, 7Q10 (débit minimum d'une moyenne mobile de 7 jours et une période de retour de dix ans), Q95 et Q90 (95^e et 90^e percentile des débits classés), sont déconseillés pour les rivières ayant de faibles débits. Enfin, il est recommandé de définir plusieurs débits environnementaux, au lieu d'un seul (7Q2), au Québec méridional.

MOTS-CLÉS : Débits environnementaux, échelle temporelle, régions hydrologiques, durabilité des écosystèmes riverains, politique de partage de l'eau.

1. Introduction

Environmental flows are defined as “the quantity, timing, and quality of freshwater flows and levels necessary to sustain riverine ecosystems which, in turn, support human cultures, economies, sustainable livelihoods, and well-being” ([Arthington et al. 2018](#)). Over ten years after the [Brisbane Declaration \(2007\)](#), this definition asserts an economic dimension provided by the environmental flow assessments and an interdependency between human conditions and the riverine ecosystems sustainability. According to [Poff et al. \(1997\)](#), riverine ecosystems have adapted to their natural flow regime and their sustainability comes from the river dynamics defined by water quality, physical habitat, biotic interactions and energy sources. Floods and medium flows maintain the river structure, establish a link with floodplain habitats, ensure sediment sorting and flushing, stimulate upstream migration and spawning, while low flows may prevent invasive species spread, while protecting habitats ([Acreman and Dunbar 2004](#)). For 17 fish species of interest identified by [Belzile et al. \(1997\)](#), the summer period concerns mainly the feeding phase of the fish life cycle for the growth and survival of the larval and juvenile fish in the Southern Quebec rivers.

To characterise the hydrological regime of a river, [Poff et al. \(1997\)](#) developed the *natural flow paradigm*, which can be viewed as benchmark flow conditions for conserving the ecological integrity of rivers, using five main flow characteristics: magnitude, frequency, duration, timing and variability of a flow event. Over twenty years later, many jurisdictions of Canadian provinces and across the world define environmental flows using one or two metrics assessed at relatively broad regional scales, in spite of potentially important hydroclimatic variability within these regions ([Linnansaari et al. 2012](#)). However, over two hundred methodologies exist and have been classified in four categories: hydrological, hydraulic rating, habitat simulation and holistic methods ([Tharme 2003](#); [Acreman and Dunbar 2004](#); [Arthington 2012](#)). From hydrological to holistic methods, recent work describes environmental flow assessment as a regional to local issue, to be defined with local stakeholders (water managers, scientific experts, public and private users), and requiring sufficient financial support,

knowledge and time ([Poff et al. 2010](#); [Acreman and Ferguson 2010](#); [Pahl-Wostl et al. 2013](#)).

In Southern Quebec, the Department of Environment and Fight Against Climate Change (DEFACC) commissioned a hydrological study to test the relevance of using only the 7Q2 flow metric (low flow with a return period of two years and seven-day duration), throughout the province to manage water withdrawals and riverine ecosystems protection during low flow periods. In the 1990s, this flow metric was used to regulate water withdrawal for golf courses and fish farming and a limitation of 70% of 7Q2 has been proposed to maintain a minimum flow in rivers ([Beaudelin and Bérubé 1994](#)). Subsequently, seasonally low flow restrictions to preserve fish habitats of identified eco-hydrological regions were proposed by [Belzile et al. \(1997\)](#), which are used by the Department of Wildlife, Forests and Parks ([MFFP 1999](#)). Today, the 7Q2 flow metric appears three times in guidelines linked to low flow periods:

- (1) To limit the cumulative effect of water withdrawals to 15% of the 7Q2 ([DEFACC 2015](#));
- (2) As a minimum flow to manage water sharing, hydraulic structure and water quality following a wastewater or a contaminant discharge ([DEHAQ 2015](#));
- (3) To minimize the risks associated with its predicted decrease during summer according to the RCP4.5 climate change scenario ([GIEC 2014](#)) for the 2050 horizon ([DEFACC 2018](#)).

Presently, no study exists to support the use of the 7Q2 as a low flow limit to sustain riverine ecosystems, on the contrary, this flow metric has been observed to result in extremely low flows in small streams in some regions of Atlantic Canada (e.g., [Caissie et al. 2007](#)).

Our first objective was to compare the 7Q2 environmental flow metric with other environmental flow methods used in other jurisdictions for different temporal scales (e.g. yearly and monthly). Through the comparisons, potential environmental flow metrics results were classified from the most to the less conservative and permissive one, using

[Tennant \(1976\)](#) and [Caissie and El-Jabi \(1995\)](#) thresholds. In addition, the spatial relevance of the selected metrics was investigated. Our second objective was to compare the current hydrological regions with newly defined hydrological regions, using a multivariate analysis. Current hydrologic regions of Southern Quebec ([DEHAQ 2020](#)), a region of about 730 000 km² ([DEFACC 2018](#)) with several thousand streams and rivers, were defined using climate and geographical criteria. Finally, a third objective was to investigate the relationship between the more conservative and permissive environmental flows and catchment size.

2. Methodology

2.1 Hydrological data

Historical daily flow data come from 98 hydrometric stations spread in the eight hydrological regions of Southern Quebec: Baie des Chaleurs et Percé, Saint-Laurent sud-est, Saint-Laurent sud-ouest, Outaouais et Montréal, Saint-Laurent nord-ouest, Saguenay et lac Saint-Jean, Saint-Laurent nord-est and the Baies de Hannah et de Rupert ([DEFACC 2018](#)). Three criteria were used to select the hydrometric stations:

- (1) Being located in one of the aforementioned hydrological regions;
- (2) Having a natural flow regime (i.e., unimpeded by dams or reservoirs);
- (3) Daily discharge time series must be ≥ 20 years, as required by [Caissie et al. \(2007\)](#).

The selected stations, with record lengths from 20 to 90 years, are located in tributaries of the Saguenay, Outaouais and St. Lawrence Rivers, in the Gaspésie region, on the north-east St-Lawrence coast and in the Baies de Hannah et de Rupert region.

Given that some of the metrics compared in the present study are used in Atlantic Canada, New England (USA) and the United Kingdom, it is important to note that their climates vary according to oceanic and continental influences. Mean annual precipitation are from 800 to more than 2000 mm, mean annual runoff from 400 to more than 2000 mm and mean annual of maximum flows from around 1600 to 12600 mm ([HCAN 2013](#)).

[Ouellet Dallaire et al. \(2019\)](#) present maps that showed high similarities between the Southern Quebec area and regions of Atlantic Canada in terms of hydrological, geomorphic and physio-climatic characteristics.

2.2 Low flow metrics

The chosen flow metrics were: the mean 7-day low flow with a return period of two and ten years (7Q2 and 7Q10), the 90th and the 95th percentiles on the flow duration curve (Q90 and Q95), derivatives from the median monthly flow (Q50), and derivatives from 70% of the median monthly flow (70%Q50). The 7Q10 flow metric was used in the United-States mainly as a minimum flow calculation to maintain water quality (for dilution purpose); however, it has been used in some cases to calculate environmental flows ([Linnansaari et al. 2012](#)). The 7Q10 was criticised in the literature because of the low flow values it provided, particularly for rivers with relatively low baseflows ([Belzile et al. 1997](#)). The 7Q10 was deemed insufficient for fisheries protection as an environmental flow method by [Caissie et al. \(2007\)](#) and fish habitat protection ([Tennant 1976](#)). Nevertheless, the 7Q10 was included in the present study for comparison purposes with other flow metrics. The Q90 flow metric was tested in New Brunswick, as a potential environmental flow method ([Caissie and El-Jabi 1995](#), [Caissie et al. 2007](#)) and results showed that it most likely provided insufficient flows for fish and fisheries protection, particularly during low flow periods (similar results to the 7Q10). The Q95 flow metric was developed in the United-Kingdom ([Acreman and Ferguson 2010](#)) and the median monthly flow metric (Q50) in New England, U.S. ([USFWS 1981](#)). Both of these flow metrics have been used to calculate environmental flows in these respective regions. The Q50 flow metric for the month of August (AQ50) was also used in New England mainly through regional studies for ungauged river ([Linnansaari et al. 2012](#)). Notably, the Q50 for August is also called the Aquatic Base Flow ([Linnansaari et al. 2012](#)). The AQ50 flow metric will also be calculated in the present study, as well as the median flow for the lowest flow month (i.e., lowest Q50 or LQ50), as the lowest flow month could be different than the month of August. In [Caissie et al. \(2014\)](#), the LQ50 was shown to be a relevant environmental flow metric in New Brunswick (generally occurring in August and September). The 70% of Q50 which is a variant of the Q50

method has been used in the province of Prince Edward Island for environmental flow calculations ([Caissie et al. 2014](#)). This flow metric was also be calculated in the present study, including the 70%Q50 for August (70%AQ50) as well as the 70%Q50 during the lowest flow month (70%LQ50). Therefore, the above flow metrics were selected to evaluate potential environmental flow methods in Southern Quebec with a specific attention to the results of the 7Q2 flow metric.

2.3 Environmental flows in Southern Quebec

To evaluate and compare the potential environmental flow metrics, several thresholds were calculated using the mean annual flow (MAF). [Tennant \(1976\)](#) established environmental flow thresholds based on biological and hydrological data from a ten-year study of Montana, Wyoming and Nebraska rivers (U.S.). In addition, 17 years of USGS flow data from stations in 21 other states were also used in their study. [Tennant \(1976\)](#) concluded that, in general, flows lower than the 10%MAF most likely cannot conserve the riverine ecosystems and suggested a value closer to 30%MAF to maintain good habitat conditions. Also, other studies have used environmental flows based on the MAF, while this metric has to be adapted to different climatic regions ([Acreman and Dunbar 2004](#)). For example, 25% of the MAF (25%MAF) was historically used as a target environmental flow in Nova Scotia ([Linnansaari et al. 2012](#)) and in New Brunswick ([Caissie and El-Jabi 1995](#)) to preserve the ecological integrity of rivers. In the present study, three thresholds (30%, 25% and 10% of MAF) were used as potential benchmarks for comparison. In addition, recommendation of [Belzile et al. \(1997\)](#) related to low flow restrictions to preserve fish habitats in Southern Quebec can be considered for discussion. These are the Aquatic Base Flow (AQ50) during summer periods, to maintain rearing and feeding habitat of all species and the eel migration in localised areas, the 25%MAF during winter periods for the protection of incubating eggs, and the 50% of the MAF in the Montérégie and the Outaouais regions, respectively along the St. Lawrence River on the south coast and along the Outaouais River ([Belzile et al. 1997](#)). To compare low flow metrics, this study focuses on winter (January to March) and summer (July to September) low flow periods.

2.4 Frequency analysis, statistical non-parametric tests and multivariate analysis

The 7Q2 and 7Q10 flow metrics are calculated using low flow frequency analysis. This is a predictive statistical method to calculate the probability of reaching or exceeding a flow value for a specific river ([Meylan et al. 2008](#)) as shown in the Equation (1) for low flows:

$$t(x) = \frac{1}{1 - p} \quad (1)$$

$t(x)$: return period of a flow related to a given event x (years);

p : probability of exceedance, such as $p=1-F(x, \Theta)$, where F is the cumulative probability distribution and where x and Θ are the probability distribution parameters.

In this study, several probabilistic distributions for low flow frequencies ([WMO 2008](#), [Smakhtin 2001](#)) were tested, including Generalized Extreme Value (GEV), Weibull and Gumbel. A statistical distribution was fitted to annual and monthly minimum of the seven-day moving averages using the maximum likelihood method. Independence (Wilcoxon-Mann-Whitney test), stationarity (Mann-Kendall test) and homogeneity (Breusch-Pagan test) conditions were tested. The Kolmogorov-Smirnov and Chi-square tests were applied to confirm the hypothesis that the selected statistical distributions were adequate, given the fitted samples. Finally, Akaike and Bayesian information criteria were used to select the distribution that best fitted the empirical quantile values or observed flood values. As for New Brunswick environmental flows characterization ([El-Jabi and Caissie 2018](#)), the GEV distribution presented best fit while the overall second best fit was with the Weibull distribution. Therefore, following [Kite \(1978\)](#) advocating the type III extreme-value distribution function to assess low flows, GEV was thus selected, with cumulative probability density function defined in Equation (2):

$$F(x; \mu, \sigma, \varepsilon) = \exp \left\{ - \left[1 + \varepsilon \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\varepsilon} \right\} \quad (2)$$

With ε , μ and σ , which are respectively the shape, location and scale parameters of the distribution, σ and $1 + \varepsilon \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) > 0$. When independency, stationary and/or homogeneity

conditions were not accepted, standardized residuals, high-leverage points and normal Q-Q plots were made to identify outliers data and remove them.

Hydrometric stations were sorted by their low flow characteristics using a Principal Component Analysis (PCA), based on a methodology used by [Daigle et al. \(2011\)](#). PCA is a multivariate statistical approach computing linear combinations (principal components, or PC) of original variables to maximize the explained variance while maintaining orthogonality between PCs. As in [Daigle et al. \(2011\)](#), PCA was used to reduce 71 hydrological flow indices, drawn mainly from [Hersh and Maidment \(2006\)](#) and [Olden and Poff \(2003\)](#) studies, calculated and standardized for each station, while retaining at least one low flow indices per characteristic (amplitude, duration, frequency, timing, variability). Then, the selected hydrological indices were used in an agglomerative (ascendant) hierarchical clustering, often used for regional analyses ([Poff and Ward 1989](#)), to statistically group the hydrometric stations by similarities in several clusters, called PC-HC. A hierarchical clustering calculates a Euclidean distance as a measure of similarity between stations using the selected indices, and groups them using **average-linkage (comparison of group average distances)**. After grouping station in PC-HC regions, two non-parametric ANOVA tests were used to compare groups. This analysis allowed to confirm that each PC-HC group was significantly different from the others. The Kruskal-Wallis test permits a grouping of populations with equal medians (H_0 not rejected for $p\text{-value} > 0.05$). Then, the Wilcoxon-Mann-Whitney test was used as a post-hoc test to confirm or infirm that group pairs were from the same population (H_0 accepted for $p\text{-value} > 0.05$).

3. Results

3.1 Overview of low flow results

[Figure 1](#) represents the number of hydrometric stations (of the 98 pre-selected) having their eight associated flow metrics value below the two hypothetic conservative (30%MAF, 25%MAF) and non-conservative (10%MAF) thresholds. Results are presented for inter-annual and monthly temporal scales. March and August were selected as they typically represent the lowest flow month of the winter and summer periods. When compared to the 10%MAF threshold, the 7Q10, Q95 and 7Q2 flow metrics present

the lowest flow values with respectively 43, 24 and 29 stations under this limit for inter-annual data ([Figure 1a](#)). When comparing flow metrics to the same threshold seasonally, August ([Figure 1b](#)) and March ([Figure 1c](#)) values of the 7Q10, Q95 and Q90 indicate that 20 to 27 stations are below. The AQ50 flow metric have the highest values for all the periods. Moreover, the differences of the number of stations show that the summer values are the highest, then the winter values and finally the inter-annual values. Results of the 7Q2 flow metric for August are close to the 70% AQ50, whereas higher than the 70% AQ50 for March and the inter-annual period. Considering the results for the 98 stations, it appears that (1) winter low flow metrics are lower than summer low flow metrics; (2) the AQ50 presents the highest values for the three temporal scales, and is considered as the most conservative metric, and (3) 23% (26%) of the AQ50 values results, are $\leq 25\%$ MAF (and 30% MAF) conservation threshold.

3.2 New hydrological regions

PCA was used to select explanatory hydrological indices (HI) used to generate new regions among 71 listed by [Daigle et al. \(2011\)](#) to explain low flow characteristics of the hydrometric stations as defined by [Poff et al. 1997](#): amplitude (A), duration (D), frequency (F), timing (T), variability (V). Factorial loadings allowed the removal of redundant (i.e. highly correlated) variables and to select six HI that explained 79% of the variance. [Table 1](#) lists the HI retained to make the ascendant hierarchical clustering. The original abbreviation of the HI are also provided for cross-reference with [Daigle et al. \(2011\)](#). [Figure 2](#) presents the hydrometric stations grouped by PC-HC and the eight hydrological regions limits. PCA and the hierarchical clustering permitted a grouping of the Saguenay and Gaspésie stations (PC-HC1; areas south and north shores of St-Lawrence River). PC-HC2 stations are located along the St-Lawrence River whereas the PC-HC3 and PC-HC5 stations are in the southwestern area. The PC-HC6 stations are in the north-western area with four stations located on the Quebec north shore. The PC-HC4 stations are mainly in the western part of the province (both southern and northern part of the province). [Figure 3](#) shows new PC-HC groups of stations resulting from hierarchical clustering. The groups PC-HC1, PC-HC2 and PC-HC5 have a mean catchment size of approximately 1600km² but different number of stations (30; 15; 7) and

mean of MAF (25.7; 21.2; 17.2 L.s⁻¹.km⁻²). The groups PC-HC4 and PC-HC6 have different mean catchment size (18 087; 8 509 km²), number of stations (19; 16) and similar mean of MAF (19.1; 19.3 L.s⁻¹.km⁻²). The PC-HC3, a region of eleven stations, has the smallest mean catchment size (628 km²) and the lowest mean of MAF (16.6 L.s⁻¹.km⁻²). Non-parametric ANOVA tests were used to investigate inter-region differences in environmental flow metrics for the original regions (R0s) as well as for the PC-HC groups. Hydrological regions and PC-HC groups were significantly different, as were metric results.

3.3 Comparison of low flow metrics within historical and new hydrological regions

In [Figures 4 and 5](#), the box plots present the range of mean values of the inter-annual flow metrics divided by the MAF for hydrological regions and PC-HC groups. Each time, the flow metrics were ordered from the less to the more conservative, with the latter implying the lower risk of impacts on the ecosystem. Results were compared to the three %MAF thresholds (dotted lines). The classification of flow metrics is the same for R01 and PC-HC, R02 and PC-HC2, and R04 and PC-HC5, taken in pairs, and for R05, R06, PC-HC4 and PC-HC6. The R03, R07, R08 and PC-HC3 regions have metric orders that are different than all other regions. Using [Tennant's \(1976\)](#) threshold ($\geq 30\% \text{MAF}$), in ascending order, the 70%AQ50, LQ50 and AQ50 flow metrics can be considered as adequate within hydrological regions ([Figure 4](#)), and the 70%AQ50 and Q90 flow metrics meet this criterion for PC-HC ([Figure 5](#)). They are the 7Q2, Q90, 70%AQ50, AQ50 and LQ50 flow metrics for hydrological regions and the 7Q2, LQ50, 70%AQ50 and 70%LQ50 flow metrics for PC-HC, according to [Caissie and El-Jabi \(1995\)](#) threshold ($\geq 25\% \text{MAF}$). Metric orders seem to be independent from the mean catchment sizes and the number of hydrometric stations. More precisely, the AQ50 flow metric is the most conservative environmental flow approach with 80% to 100% of flows higher than the 30%MAF threshold for six R0s and four PC-HC. The 7Q10 flow metric is the less conservative approach with 50% to 100% of values above 10%MAF for three R0s and three PC-HC. Considering the 7Q2 flow metric, more than half of the results were between 10%MAF and 25%MAF thresholds for six R0s and four PC-HC. In the PC-HC2 and PC-HC3 groups, none of the metrics can be considered as protective as the

environmental flow guidelines suggested by [Tennant \(1976\)](#) and [Caissie and El-Jabi \(1995\)](#).

The inter-quartile range (IQR differences between 75th and 25th percentiles) of the boxes in [Figures 4 and 5](#) portrays the variability as a percentage of MAF of each flow metrics by regions of PC-HC groups. By R0 and by flow metric, the minimum of the differences varied from 1.8% (R06; 7Q2) to 6.8% (R05; 7Q10) and the maximum from 4.2% (R01; AQ50) to 28.7% (R08; AQ50). For PC-HC groups, IQR represented a minimum of 0.6% (PC-HC2; 7Q2) to 5.2% (PC-HC4; 70%LQ50) and a maximum from 7.5% (PC-HC2; LQ50) to 35.1% (PC-HC6; AQ50). Looking at the mean of those percentages by flow metrics through R0 and PC-HC groups, the mean differences is lower for the 7Q10, 7Q2, 70%LQ50, Q95, Q90 and LQ50 flow metrics of the PC-HC comparing to the R0, whereas for the 70%AQ50 and the AQ50 flow metrics, IQR are smaller in R0 compared to PC-HC. This indicates that PC-HC groups are generally more homogeneous than the historic hydrological regions in the context of environmental flow metrics selection.

3.4 Monthly low flow metrics within PC-HC

[Figure 6](#) presents radial plots of the eight metrics applied to monthly flows, standardized by dividing their value by the MAF, for each PC-HC group. The y-axis has been limited to 100% of the MAF and presented on a logarithmic scale thus truncating higher monthly results. The plots show the four periods for each PC-HC, which are from the higher to the lower flow values, from March to July, September to January, July to September and from January to March. The lowest monthly flow values have been found for August and September during summer, for all PC-HC. During winter, the lowest flow month for PC-HC1, PC-HC4 and PC-HC6 is March, and February for the rest of the PC-HC.

For August and September, the classification of the flow metrics, in ascending order from the less to the more conservative, is: 7Q10, Q95, Q90, 7Q2, 70%LQ50 / 70%AQ50 and the LQ50 / AQ50 for all PC-HC except the PC-HC4 having the 7Q2 flow metric on the second to last. The metrics order for the summer is quite similar to the inter-annual PC-HC2 and PC-HC3 metric orders ([Figure 5](#)), excepting that the 7Q2 is

more conservative than the Q95 and Q90 flow metrics for summer results. For monthly results, it appeared that the 7Q10 and Q95, the 70%LQ50 and 70%AQ50 and the LQ50 and AQ50 values were pairs of very similar values for all PC-HC, as for the 7Q2 and 70%LQ50 values for PC-HC5 and PC-HC6. Differences were found when comparing monthly metrics to the 10%MAF, 25%MAF and 30%MAF thresholds. PC-HC2 and PC-HC3 summer results were similar to inter-annual results ([Figure 5](#)). All the flow metrics are under the 25%MAF limit, with the 7Q10, Q95, Q90 under the 10%MAF, with the addition of the 7Q2 for PC-HC3. For PC-HC1 and PC-HC5, the 7Q2, 70%LQ50 / 70%AQ50 and LQ50 / AQ50 flow metrics are above the 30%MAF threshold. At last, PC-HC4 and PC-HC6 presented all flow metrics above the 30%MAF.

In February and March, the classification of the flow metrics is different for each group. However, the winter metric orders of PC-HC1, PC-HC4, PC-HC5 and PC-HC6 are quite similar to their inter-annual classifications respectively ([Figure 5](#)), with, as for summer results, the 7Q2 that is more conservative than the Q95 and Q90. The 7Q10, Q95 and Q90 are the less conservative, with the 7Q10 and the Q95 having similar values for all PC-HC. As for summer values, the winter Q90 and 70%LQ50 are substantially similar for PC-HC1, PC-HC4, PC-HC5 and PC-HC6, as the 7Q2, 70%LQ50 and 70%AQ50 for PC-HC2, and the 7Q2, 70%LQ50 and AQ50 for PC-HC3. The AQ50 is the more conservative flow metric except for PC-HC2 and PC-HC5 where LQ50 is similar and for PC-HC3 where LQ50 is more conservative. When compared to the 30%MAF threshold, the 70%AQ50 and AQ50 flow metrics are above it for PC-HC1 and PC-HC6, as the 7Q2, LQ50, 70%AQ50 and AQ50 for PC-HC4 and PC-HC5, with the 70%LQ50 in addition to the latter.

For monthly results, it appears that:

- (1) Winter low flow values are lower than summer flows;
- (2) Summer values influenced inter-annual values for the PC-HC2 and PC-HC3 and winter values influenced inter-annual values for the rest of PC-HC;
- (3) None of the flow metric methods are conservative enough to protect the aquatic ecosystems, in PC-HC2 and PC-HC3, when using [Tennant \(1976\)](#) and [Caissie and](#)

[El-Jabi \(1995\)](#) recommendations during both of low flow periods. These two groups represent 25% of the hydrometric stations considered in this study, generally located along the St-Lawrence River on the south shore.

3.5 Environmental flow values and catchment size

[Figure 7](#) presents the more conservative and restrictive inter-annual flow metrics (in m³/s) above the 30%MAF threshold, as a function of catchment sizes for each PC-HC and for all Southern Quebec (Inter-annual, August and March data as in [Figure 1](#)). As expected, [Figure 7](#) shows that low flow metrics of rivers and catchment size are correlated ([Daigle et al. 2011](#)). The equation and the R² values of the power functions of each environmental flow plotted were shown. The R² value is 0.89 for Southern Quebec results, and from 0.92 to 0.99 for the PC-HC, with the coefficients of the power functions close to 1. In [Figure 7](#), for Southern Quebec, PC-HC3 and PC-HC4 graphs, a high outlier value of catchment size is presented albeit excluded from the model. The largest drainage area (146 000km²), is that of the Mille-Iles River. Also, when none of the calculated flow metric was conservative enough, the 30%MAF was proposed as an environmental flow. Compared to the 30%MAF threshold, the 70%AQ50 flow metric was the more conservative and restrictive for the Southern Quebec inter-annual values. The AQ50 is the most conservative flow metric for the Southern Quebec, August and March monthly results. For PC-HC, the results are the same as in [Figure 5](#), regarding the selection of the more conservative and restrictive flow metric, using the power functions. Thus, using PC-HC groups lead to the selection of different sufficiently conservative flow metrics for these hydrological regions, but the correlation with catchment size remains strong (R² > 0.9) in each case.

[Table 2](#) is a review of the results for 21 different contexts: for inter-annual, summer and winter periods, by PC-HC and for the whole of Southern Quebec. [Table 2](#) gives also the number of hydrometric stations and their location, the mean catchment size, the summer and winter low flow months, and characteristics of rivers for each PC-HC. The 10%MAF, 30%MAF ([Tennant 1976](#)) and the 25%MAF ([Caissie and El-Jabi 1995](#)) are used as potential thresholds to discuss the risk of using some flow metrics for

riverine ecosystems in contrast with human's benefits. For the whole Southern Quebec, the LQ50 ($> 25\%MAF$) and the 70%AQ50 ($> 30\%MAF$) flows metrics are the less risky and pose greater restrictions on water withdrawal. It is respectively the same for PC-HC5 and PC-HC6 groups with the 70%LQ50 and the LQ50 flow metrics and the Q90 and the 70%AQ50 flow metrics. Because all of their values were superior to the 30%MAF, the 70%AQ50 and the Q90 flow metrics are the less risky and more restrictive metrics for PC-HC1 and PC-HC4 respectively. In groups PC-HC2 and PC-HC3, flow metrics considered were $\leq 25\%MAF$, hence the latter (or 30%MAF) was proposed as possible environmental flow metrics. These two groups include approximately 25% of the hydrometric stations.

Obviously, the selected, less risky flow metric to protect the aquatic ecosystems of the rivers changes depending of the hydrological context, for the whole of Southern Quebec or for each PC-HC groups. The selected metric changes also depending on the temporal scale (annual or monthly). Chosen flow metrics for inter-annual results are mainly based on descriptive statistics (70%AQ50, LQ50, 70%LQ50, 30%MAF, 25%MAF, Q90). For the summer periods, presenting the highest flow values, and for winter periods, frequency analyses flow metrics (7Q10, 7Q2) can be chosen for PC-HC1, PC-HC4, PC-HC5 and PC-HC6 and for PC-HC4 and PC-HC5 groups. Frequency analyses flow metrics are interested to consider extreme flow events related to the climate change.

4. Discussion and conclusion

A total of 98 natural flow regime gauged rivers with discharge time series ≥ 20 years were pre-selected for this study. Indeed, gauged rivers with shorter time series and ungauged rivers for which regional statistical analyses would be required were not taken into account. Those limits are discussed in [Caissie and El-Jabi \(1995\)](#), [Richter \(2010\)](#), as well as their adaptation to altered flow regimes ([Richter et al. 1996](#); [Poff and Zimmerman 2010](#)).

The main questions that triggered this hydrological study were: should environmental flow guidelines vary temporally and spatially to improve the management of water withdrawals in Southern Quebec rivers? More precisely: are the historical

hydrological regions adequately defined for the low flow characteristics of Southern Quebec rivers? Which thresholds can be fixed to protect fish habitat and preserve the river's ecological integrity during low flow periods? Is the single use of the 7Q2 flow metric relevant across all Southern Quebec rivers? Finally, is there a link between environmental flow and catchment size?

First, a principal component analysis and an ascendant hierarchical clustering were used to group hydrometric stations in six PC-HC clusters. Using this method, rivers in the same group need not to be geographically close (e.g. PC-HC1), but can be (i.e. along the St-Lawrence River in PC-HC2). The new PC-HC groups show less inter-station variance for the lowest flow metrics (7Q10, 7Q2, Q95, Q90), when compared to inter-station variance in historical hydrological regions. Hence, the PC-HC groups can be a useful alternative to define environmental flow guidelines by regions that have more similar low flow metrics than the historical regions.

To discuss the relevance of the 7Q2 flow metric, results were compared to those of the 7Q10, Q90, Q95, 70%LQ50, LQ50, 70%LQ50 and AQ50 at different temporal scales (monthly and annually).. In summary:

- PC-HC grouped hydrometric stations according to homogenous low flow values, in contrast with contiguous geographical regions. In addition, the relationship between key low flow metric and catchment size is often slightly to significantly better in PC-HC regions than for the whole of Southern Quebec;
- The 7Q10, Q95, Q90 and 7Q2 flow metrics are potentially more risky for the riverine ecosystems compared to the 70%LQ50, LQ50, 70%AQ50, AQ50, 70%Q50 flow metrics, depending of the time scale;
- 7Q10 and Q90 flow metrics could be proposed as environmental flow metrics for rivers having the highest flow regime;
- Accounting for different temporal scale is essential to assess environmental flows for specific study areas and seasonal metrics may be more adequate than those based on inter-annual means;
- Around 25% of the hydrometric stations located along the south shore of the St

Lawrence River have very low winter and summer flows with all of the metrics resulted in flows lower than 25%MAF and 30%MAF. Those rivers are near to the Montérégie region, where [Belzile et al. \(1997\)](#) proposed the use of 50% of the MAF;

- The percentage of the mean annual flow, as 30%MAF ([Tennant 1976](#)) or the 25MAF ([Caissie and El-Jabi 1995](#)), can be a relevant flow metrics;
- Inter-annual flow metrics can be greatly influenced by summer (PC-HC2 and PC-HC3) and winter low flow variability (PC-HC1, PC-HC4, PC-HC5 and PC-HC6);

The AQ50 flow metric is potentially the less risky as an environmental flow during summer, as stated by [Belzile et al.\(1997\)](#), to protect fish habitats. The main recommendation is the need of using several adapted flow metrics to assess environmental flows and protect riverine ecosystems in opposition of using only one flow metric such as the 7Q2 to manage water withdrawals for the entire region.

Table 1. Hydrological indices retained to be used in the ascendant hierarchical clustering

HI	Definition
A7	Mean of the minimums of all May flow values over the entire record ($\text{L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$)
A27	5-year annual minimum daily discharge ($\text{L.s}^{-1}.\text{km}^{-2}$)
D16	3-day minimum divided by the median of the entire record (unitless)
F2	Average number of flow events with flows below a threshold equal to 5% of the mean flow value for the entire flow record (unitless)
T3	Average Julian date of the seven annual 1-day minimum discharges (Julian date)
V8	Coefficient of variation of annual 7-day minimum flow (unitless)

Table 2. Review of the results and the more conservative and restrictive flow metrics. For inter-annual, summer and winter periods, by PC-HC, for 25%MAF and 35%MAF thresholds, and depending of the MAF or catchment size.*Quoting hydrological sub-classification from [Ouellet Dallaire, Lehner and Creed \(2019\)](#)

		Southern Quebec	PC-HC1	PC-HC2	PC-HC3	PC-HC4	PC-HC5	PC-HC6
Hydrometric stations		98	30	15	11	19	7	16
Location of stations in the southern Quebec		-	Along the Saguenay river, Gaspésie area	Along the St-Lawrence river	Along the St-Lawrence river and in the south-western	Western	South-western	North-western and Quebec north shore
Mean of catchment size		-	1 687 km ²	1 545 km ²	628 km ²	18 087 km ²	1 602 km ²	8 509 km ²
Lower summer monthly flow		August	September	August	August	September	September	September
Lower winter monthly flow		March	March	February	February	March	March	March
Rivers sizes, regime flow, variability between summer and winter periods, spring melt*		-	Medium rivers and regime flows, high variability, late melt	Medium rivers and regime flows, low variability, early melt	Small rivers, low regime flows and variability, early melt	Large rivers, high regime flows and variability, late melt	Medium rivers and regime flows, low variability, early to late melt	Large rivers, low to high regime flows, high variability, late melt
Inter-annual	> 30%MAF	AQ50	70%AQ50	30%MAF	30%MAF	Q90	LQ50	70%AQ50
	> 25%MAF	70%AQ50	70%AQ50	25%MAF	25%MAF	Q90	70%LQ50	Q90

	≤ 10%MAF	-	-	7Q10, 7Q2, Q95	7Q10, 7Q2, Q95, Q90, 70%AQ50, 70%LQ50	-	-	-
Summer period	> 30%MAF	AQ50	70%AQ50 / 7Q2 / 70%LQ50	30%MAF	30%MAF	7Q10 / Q95	70%AQ50 / 7Q2 / 70%LQ50	Q95 / 7Q10
	> 25%MAF	LQ50 / AQ50	Q95	25%MAF	25%MAF	7Q10 / Q95	25%MAF	Q95 / 7Q10
	≤ 10%MAF	-	-	7Q10, Q95, Q90	7Q10, Q95, Q90, 7Q2	-	-	-
Winter period	> 30%MAF	AQ50	70%AQ50	30%MAF	30%MAF	7Q2	70%LQ50 / 70%AQ50	70%AQ50
	> 25%MAF	LQ50 / AQ50	70%AQ50	25%MAF	25%MAF	7Q10	Q95 / 7Q10	25%MAF
	≤ 10%MAF	-	-	-	7Q10, Q95, Q90	-	-	-

Figure 1. Number of stations with metrics under the 30%MAF, 20%MAF and 10%MAF thresholds for inter-annual (a), March (b) and August (c) flow metrics

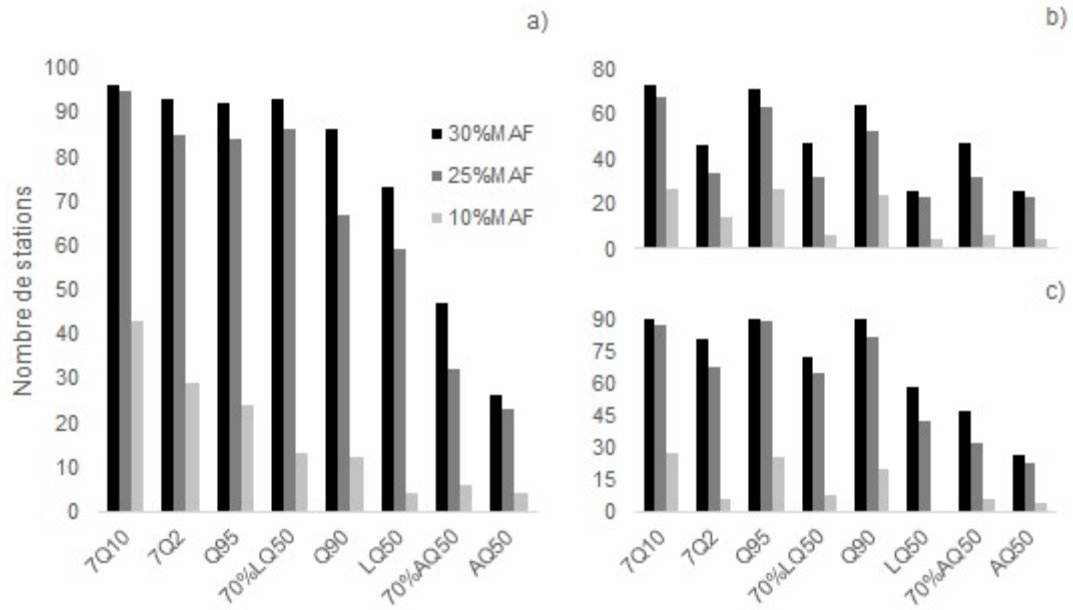
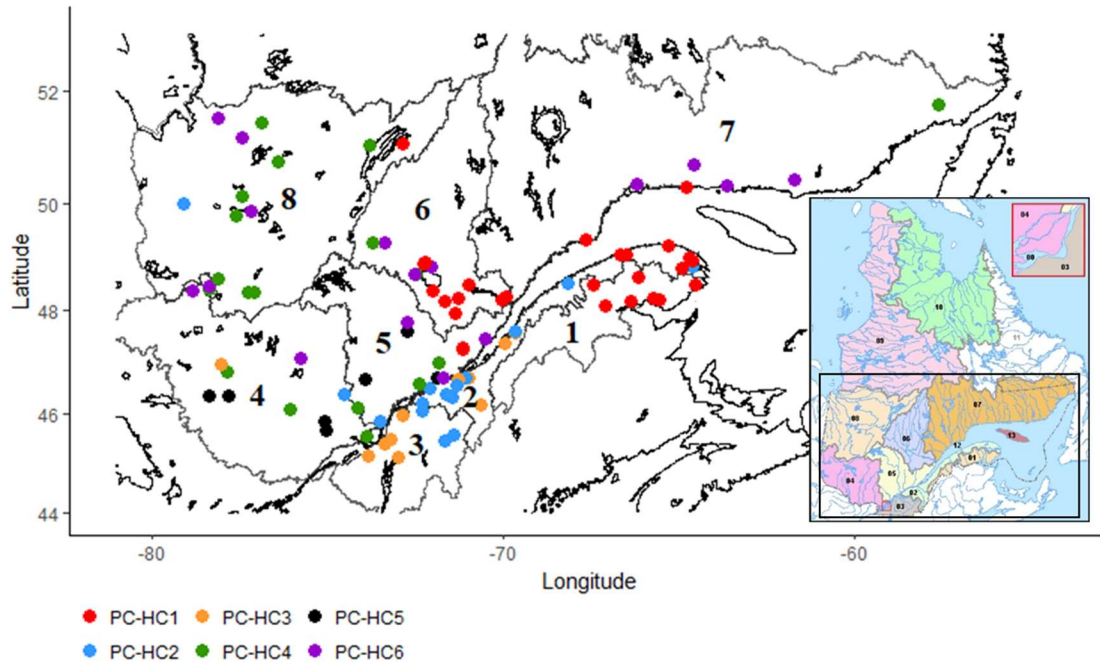


Figure 2. Hydrometric stations by PC-HC groups compared to original hydrological regions showed by numbers (Quebec map from [DEHAQ 2020](#))



Height

0 10 20 30 40 50 60

PC-HC2: 15 ; 1 545km² ; 21.2 L.s⁻¹.km⁻²

PC-HC3: 11 ; 628km² ; 16.6 L.s⁻¹.km⁻²

PC-HC1: 30 ; 1 687km² ; 25.7 L.s⁻¹.km⁻²

PC-HC6: 16 ; 8 509km² ; 19.3 L.s⁻¹.km⁻²

PC-HC5: 7 ; 1 602km² ; 17.2 L.s⁻¹.km⁻²

PC-HC4: 19 ; 18 087km² ; 19.1 L.s⁻¹.km⁻²

Figure 1 displays eight box plots (R01 to R08) showing the distribution of the number of species (S) for different species richness estimators (7Qi10, 7Q2, 70%LO50, Q95, Q90, LO50, 70%AQ50, AQ50) across various sample sizes (n) and Monte Carlo Simulation (MCS) values. Each plot includes a horizontal dashed line representing the expected distribution under the null hypothesis.

- R01: $n=7$, MCS=1 418 km²**
- R02: $n=20$, MCS=791 km²**
- R03: $n=8$, MCS=625 km²**
- R04: $n=14$, MCS=12 235 km²**
- R05: $n=14$, MCS=871 km²**
- R06: $n=15$, MCS=3 914 km²**
- R07: $n=7$, MCS=8 942 km²**
- R08: $n=13$, MCS=19 679 km²**

The x-axis for all plots lists the estimators: 7Qi10, 7Q2, 70%LO50, Q95, Q90, LO50, 70%AQ50, and AQ50. The y-axis represents the number of species (S), with scales varying by plot (e.g., 0-50 for R01, 0-80 for R08). The dashed lines indicate the null hypothesis distribution, which is generally centered around $S=25$ for most plots.

Figure 5. Inter-annual metrics results divided by MAF for PC-HC groups, (#: number of stations, MCS: Mean Catchment Size, horizontal lines: 10%MAF, 25%MAF and 30%MAF)

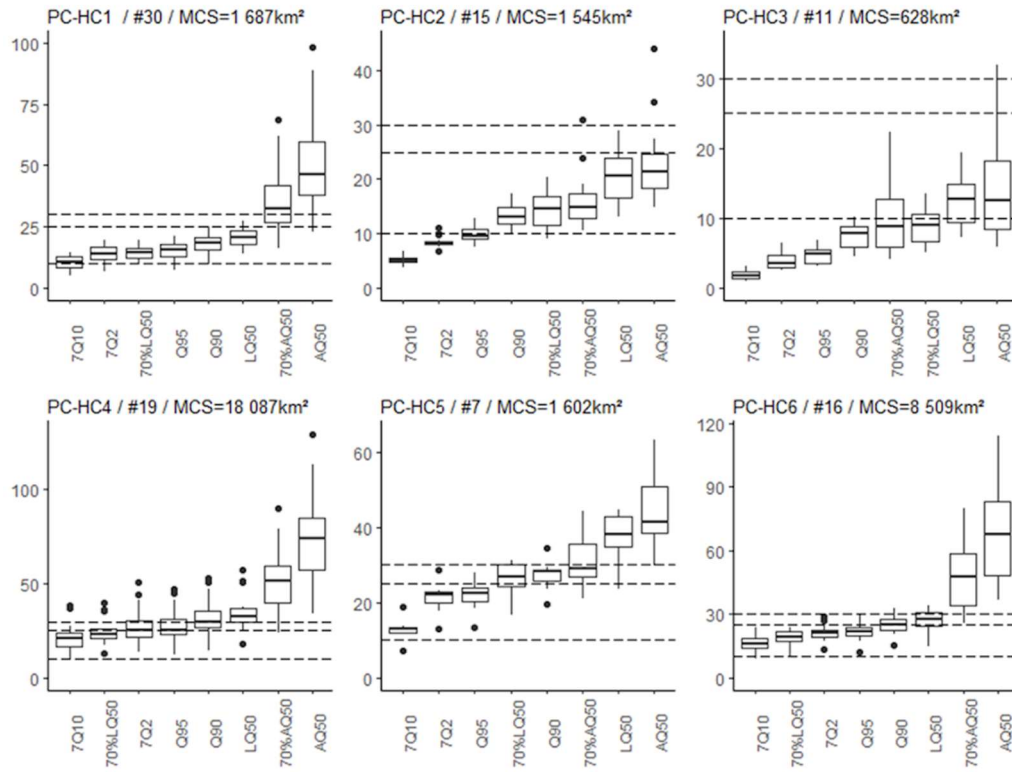


Figure 6. Mean of monthly metric results divided by MAF for PC-HC groups. Solid black lines and dotted grey lines with round markers, from inside to outside, are respectively the 10%MAF, 25%MAF, 30%MAF, 70%AQ50 and the AQ50 flow metrics.

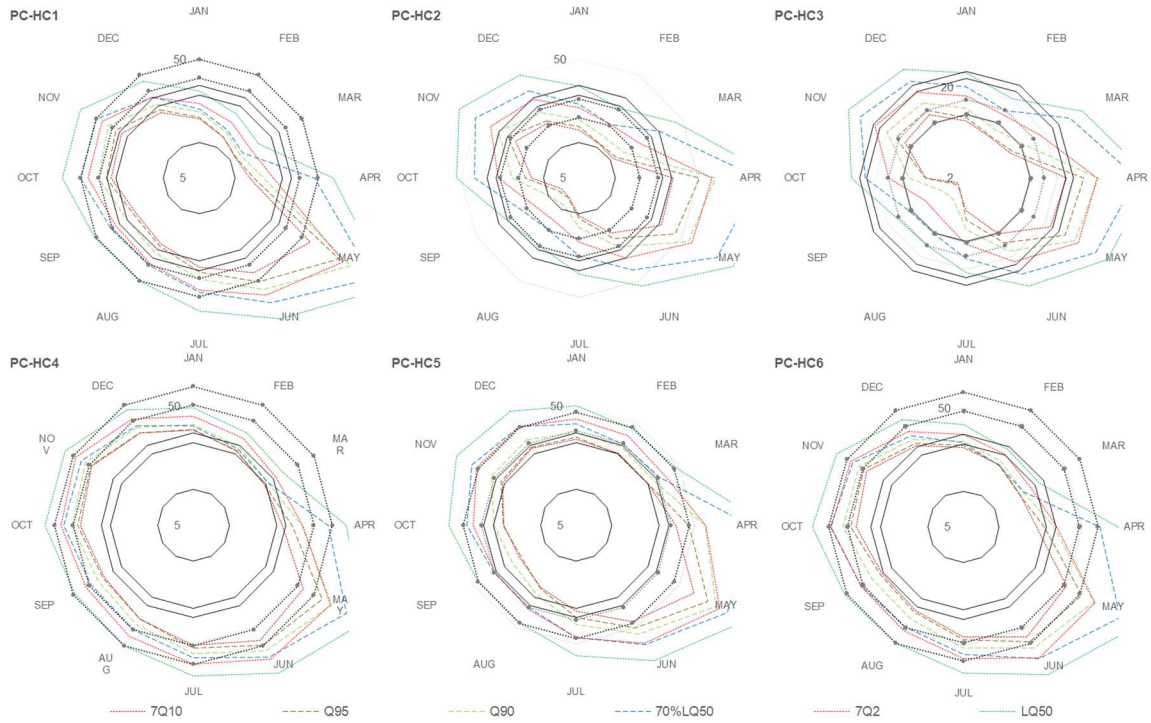
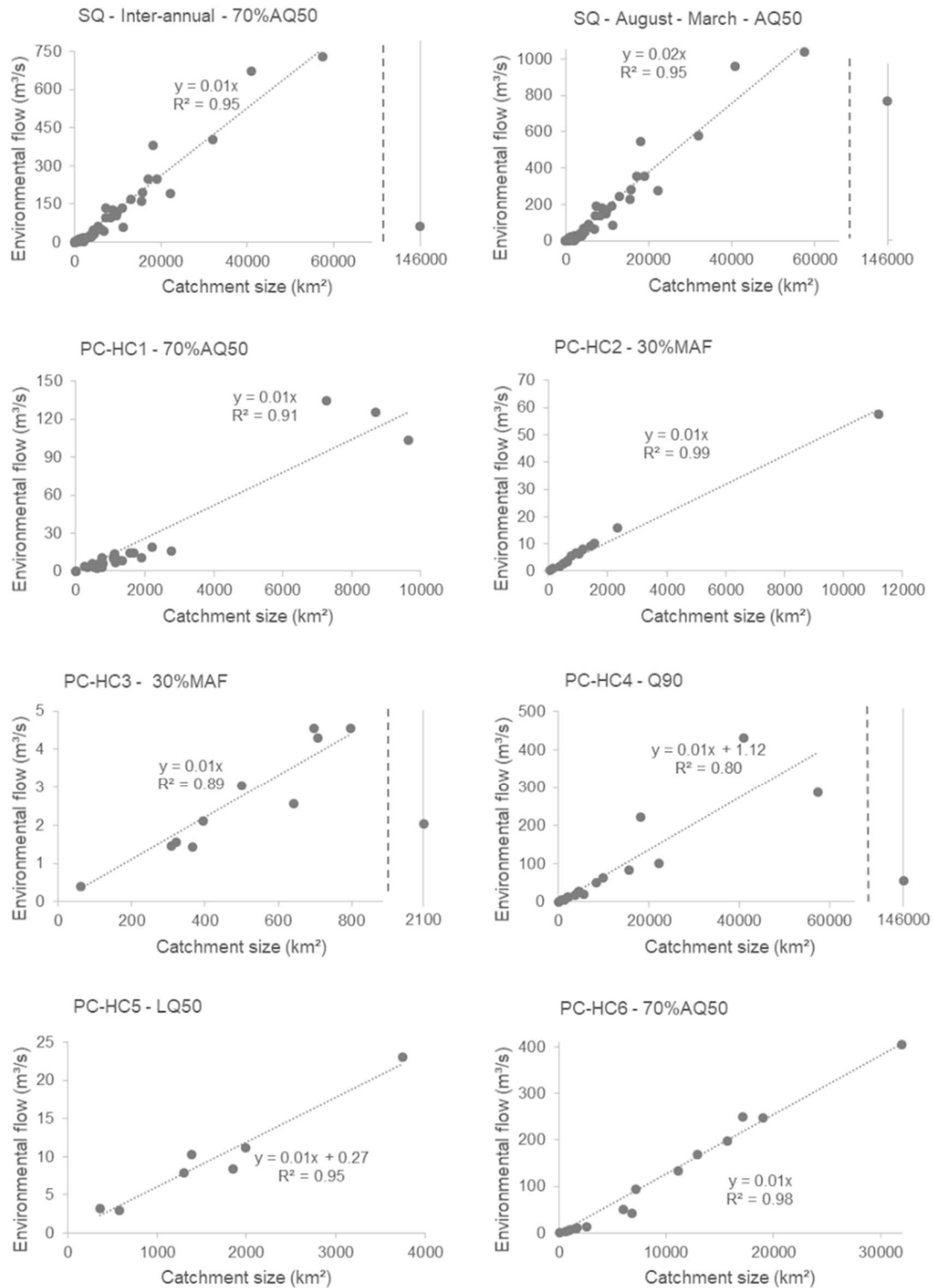


Figure 7. Most conservative and restrictive inter-annual flow metrics above the 30%MAF threshold, depending on catchment sizes for each PC-HC and Southern Quebec (SQ)



Acknowledgments

The authors wish to acknowledge the financial contribution of the Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change. The contribution of the Quebec Water Expertise Direction in terms of expertise and data sharing is also acknowledged.

References

- Acreman, M. C., and M. J. Dunbar. 2004. "Defining environmental river flow requirements: A review." *Hydrology and Earth System Sciences* 8 (5): 861-876. doi: [10.5194/hess-8-861-2004](https://doi.org/10.5194/hess-8-861-2004).
- Acreman, M. C., and A. J. D. Ferguson. 2010. "EFs and the European Water Framework Directive." *Freshwater Biology* 55 (1): 32-48. doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02181.x.
- Arthington, A. H. 2012. *Environmental flows: saving rivers in the third millennium*. Berkley: Freshwater ecology series – University of California. doi: 10.1525/california/9780520273696.001.0001.
- Arthington, A. H., J. G. Kenne, E. D. Stein, and J. A. Webb. 2018. "Recent advances in environmental flows science and water management: Innovation in the Anthropocene." *Freshwater Biology* 63 (8): 1022-1034. doi: [10.1111/fwb.13108](https://doi.org/10.1111/fwb.13108).
- Beaudelin, P., et P. Bérubé. 1994. "Cadre d'analyse des projets de petites centrales hydroélectriques." Document de régie interne, Ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec.
- Belzile, L., P. Bérubé, V. D. Hoang et M. Leclerc. 1997. "Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec." Rapport scientifique, Ministère de l'Environnement et de la Faune et Pêches et Océans Canada.
- Brisbane Declaration. 2007. "Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being". Paper presented at the 10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference, Brisbane, September 3-6.
- Caissie, D., N. El-Jabi. 1995. "Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada." *Canadian Journal of Civil Engineering* 22(2): 235-246. doi: 10.1139/195-033.
- Caissie, D, N. El-Jabi, and C. Hébert. 2007. "Comparison of hydrologically based instream flow methods using a resampling technique." *Canadian Journal of Civil Engineering* 34(1): 66-74. doi: 10.1139/L06-095.
- Caissie, J., D. Caissie, and N. El-Jabi. 2014. "Hydrologically based environmental flow methods applied to rivers in the Maritime Provinces (Canada)." *River Research and Applications* 31(6): 651-662. doi: [10.1002/rra.2772](https://doi.org/10.1002/rra.2772).
- Daigle, A., A. St-Hilaire, D. Beveridge, D. Caissie, and L. Benyahya. 2011. "Multivariate analysis of the low flow regimes in eastern Canadian rivers." *Hydrological Sciences Journal* 56(1): 51-67. doi: 10.1080/02626667.2010.535002.

- DEFACC (Department of Environment and Fight Against Climate Change) 2018. *Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. Québec : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques.
- DEFACC (Department of Environment and Fight Against Climate Change) 2015. *Guide de conception des installations de production d'eau potable, Volume 1*. Québec : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques.
- DEHAQ (Direction de l'Expertise Hydrique et Atmosphérique du Québec) 2015. « Lignes directrices pour l'estimation des débits d'étiage sur le territoire québécois » Direction d'expertise hydrique du MELCC, February. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/debit-etiage/methode/index.htm>
- DEHAQ (Direction de l'Expertise Hydrique et Atmosphérique du Québec) 2020. « Rivières (bassins versants) : Les régions hydrographiques ». Direction d'expertise hydrique du MELCC. Accessed 23rd January 2020. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/regionshydro/index.htm#liste>
- El-Jabi, N., and D. Caissie. 2018. "Characterization of natural and environmental flows in New Brunswick, Canada." *River Research and Applications* 35(1): 14-24. doi: [10.1002/rra.3387](https://doi.org/10.1002/rra.3387).
- GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) 2014. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hersh, R. S., and D. R. Maidment. 2006. "Assessment of hydrologic alteration software". The University of Texas at Austin CRWR Online Report 06–11.
- Kite, G. W. 1978. *Frequency and Risk Analysis in Hydrology*. Water Resources Publications: Fort Collins, Colorado, 224 p.
- Linnansaari, T., W. A. Monk, D. J. Baird, and R. A. Curry. 2012. "Review of approaches and methods to assess Environmental Flows across Canada and internationally." Canadian Science Advisory Secretary document 2012-039, vi + 73 pp.
- MFFP (Ministère de la Faune, des Forêts et des Parcs) 1999. *Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats*. 4th éd. Québec : Direction de la faune et des habitats, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.
- Meylan, P., A. C. Favre, and A. Musy. 2008. *Hydrologie fréquentielle: Une science prédictive*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Olden, J. D., and N. L. Poff. 2003. "Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes." *River Research and Applications* 19(2): 101–121. doi: [10.1002/rra.700](https://doi.org/10.1002/rra.700).
- Ouellet Dallaire, C., B. Lehner and I. F. Creed. 2019. "Multidisciplinary classification of Canadian river reaches to support the sustainable management of freshwater systems." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 77(2): 326-341.

- Pahl-Wostl, C, A. Arthington, J. Bogardi, S. E. Bunn, H. Hoff, L. Lebel et al. 2013. "Environmental flows and water governance: managing sustainable water uses." *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5(3-4): 341-351. doi: [10.1016/j.cosust.2013.06.009](https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.06.009).
- Poff, N. L. and J. K. H. Zimmerman. 2010. "Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform environmental flows science and management." *Freshwater Biology* 55(1): 194-205. doi: [10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02272.x).
- Poff, N.L., B. D. Richter, A. H. Arthington, S. E. Bunn, R. J. Naiman, E. Kendy, M. Acreman et al. 2010. "The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): a new framework for developing regional environmental flow standards." *Freshwater Biology* 55(1): 147-170. doi: [10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02204.x).
- Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks and J. C. Stromberg. 1997. "The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration." *Biosciences* 47(11): 769-784.
- Poff, N. L. and J. V. Ward. 1989. "Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns." *Canadian Journal for Fisheries and Aquatic Sciences* 46(10): 1805-1818. doi: [10.1139/f89-228](https://doi.org/10.1139/f89-228).
- Richter, B.D., 2010. "Re-thinking environmental flows: From allocations and reserves to sustainability boundaries." *River Research and Applications* 26(8): 1052-1063. doi: [10.1002/rra.1320](https://doi.org/10.1002/rra.1320).
- Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell, and D. P. Braun. 1996. "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems." *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174. doi: [10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x).
- HCAN (Hydrologie du Canada) 2013. « Hydrologie du Canada » Ressources naturelles Canada, July, 08. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/volume/surveillance/relevés/hydrologie.html>
- Smakhtin, V.U. 2001. "Low flow hydrology: A review." *Journal of Hydrology*, 240(3-4): 147-186. doi: [10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1).
- Tharme, R. E. 2003. "A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers." *River Research and Applications* 19(5-6): 397-441. doi: [10.1002/rra.736](https://doi.org/10.1002/rra.736).
- Tennant, D. L. 1976. "Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources." *Fisheries* 1(4): 6-10. doi: [10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2).
- USFWS (United States Fish and Wildlife Service) 1981. *Interim regional policy for New England streams flow recommendations*. Newton Corner (Massachusetts): Memorandum from H.N. Larsen.
- WMO (World Meteorological Organization) 2008. **Manual on Low flow. Estimation and Prediction**. Operational Hydrology Report No.50. Genève: Chairsperson, Publications Board.

ANNEXE 2

The wetted perimeter to assess environmental flows in Southern Quebec rivers (Canada)

Laureline Berthot², André St-Hilaire¹, Daniel Caissie², Nassir El-Jabi³, Judith Kirby⁴ and Sébastien Ouellet-Proulx⁴

¹*Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada;*

²*Université de Moncton, Civil engineering, Moncton, Canada;*

³*Fisheries and Oceans Canada, Freshwater Habitat Science Section, Moncton, New Brunswick, Canada;*

⁴*Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, Direction générale des politiques de l'eau, Québec, Canada.*

² Corresponding author at : Centre Eau Terre Environnement, Institut National de la Recherche Scientifique, 490, rue de la Couronne, Québec, G1K 9A9, Canada. E-mail address: laureline.berthot@ete.inrs.ca (L.Berthot).

ABSTRACT

Study Region

Environmental flows assessment in the province of Quebec (Canada), is mainly based on hydrological assessment of historic data during low flow periods. The mean 7-day low flow with a return period of two years (7Q2) and ten years (7Q10) are currently used by the Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change to prescribe minimum flow and/or maximum water abstraction while maintaining the functions and health of riverine ecosystems.

Study Focus

This study investigated the use of the wetted perimeter as an additional environmental flows assessment method that can be used by water managers. Twenty environmental flow metrics were computed for inter-annual, summer and winter periods, for 43 sites from 35 rivers, and analysed according to the changes in wetted perimeter with flow. The flow associated with maximum curvature of the flow-wetted perimeter function was analyzed.

New hydrological insights for the Region

Results permitted to understand local changes of river hydraulics and possible aquatic habitat availability associated with different environmental flows prescriptions. The median discharge of the summer month with the lowest flow (usually August) provided the highest wetted perimeter in relative terms. During summer periods, the 7Q2 flow metric was deemed sufficient. The wetted perimeter is a tool giving information of both river morphology and potential aquatic habitat as a function of flow and is relevant for environmental flows assessment.

Keywords: Environmental flows, Wetted perimeter, Water sharing policy, Southern Quebec rivers

The wetted perimeter to assess environmental flows in Southern Quebec rivers (Canada)

1. Introduction

Riverine ecosystems are naturally adapted to their flow regime and sustained fish habitat, biotic interactions and energy sources ([Poff et al., 1997](#)). Fish habitat can be defined as “water frequented by fish and any other areas on which fish depend directly or indirectly to carry out their life processes, including spawning grounds and nursery, rearing, food supply and migration areas” ([Canadian Fisheries Act, 2020](#)). Biotic interactions are referred to as the “competitive, mutualistic, and trophic interactions among (and within) species”, that are essential for ecosystem and community structures ([Resh et al., 1988](#)), and can be affected by anthropogenic factors like hydraulic infrastructures, channelization, urbanization, water withdrawals, etc. ([Poff et al., 1997](#), [Zeiringer et al., 2018](#)). Seasonal flow variability, geomorphology, light, water temperature and physicochemical environment can affect the energy sources of rivers and their water quality ([Resh et al., 1988](#), [Poff et al., 1997](#)). During low flow periods, some ecological functions need to be maintained, especially when water abstractions occur ([Arthington, 2012](#)): suitability of water temperature, dissolved oxygen, and water chemistry; availability of adequate habitat for aquatic organisms; accessibility to feeding and spawning areas and natural timing of stream flows, etc. To do so, environmental flows can be prescribed during the water allocation permitting process to mitigate possible adverse impacts of water withdrawals on riverine ecosystems during low flow periods. They correspond to the “quantity, timing, and quality of freshwater flows and levels necessary to sustain riverine ecosystems which, in turn, support human cultures, economies, sustainable livelihoods, and well-being” ([Brisbane Declaration, 2007](#), updated by [Arthington et al., 2018](#)). Methods exist to assess environmental flows of natural rivers ([Hersh and Maidment, 2006](#), [Olden and Poff, 2003](#)), as well as modified flow regimes ([Richter et al., 1996](#), [Zeiringer et al., 2018](#)). One approach focuses on maintaining the basic attributes of the natural flow regime, which is characterized using flow metrics grouped into five categories ([Poff et al., 1997](#)): frequency of hydrological

events, seasonal timing, magnitude, duration and variability. Each category is associated with maintaining specific ecological functions ([Arthington, 2012](#)).

In the literature on environmental flows, the use of the wetted perimeter is one of four hydraulic rating methods listed by [Tharme \(2003\)](#). The present study examined the use of the wetted perimeter, a hydraulic parameter, for inter-annual, summer and winter low flow periods, to better understand how the addition of this proxy for some habitat variables may influence environmental flows assessment in Southern Quebec rivers. The wetted perimeter has previously been used as an indicator of potential fish food production ([Tegos et al., 2018](#)), and fish habitat availability ([Duncan et al., 2009](#)). As such, low wetted perimeters are associated with low food production and low/poor fish habitat ([Gippel and Stewardson, 1998](#)). Consequently, the overall biological productivity for low wetted perimeter conditions can be less than the productivity in higher flow and higher wetted perimeter conditions ([Jowett, 1997](#)). The present study is a cross-comparison of different environmental (low) flow metrics and their associated wetted perimeter. This comparison should provide more insight in determining which low flow metric(s) is (are) more appropriate as threshold(s) for environmental flows prescription. Those low flow values were added to the environmental flow that can be estimated as the value corresponding to the maximum curvature of the wetted perimeter versus flow function (a flow threshold below which, the wetted perimeter decreases more rapidly with decreasing flows; [Gippel and Stewardson, 1998](#)). Giving higher values than the slope method ([Gippel and Stewardson, 1998](#)), flows below this maximum curvature point are also associated with a rapid decline in food production and fish habitat. In [1976, Bartshi](#) evaluated that decreasing the wetted perimeter (WP) below 80% of the WP associated with the mean annual flow provides conditions that do not preserve the riverine ecosystems while [Stalnaker and Arnette \(1976\)](#) noticed that the break in the slope of the WP-discharge function corresponds to around 80% of the maximum wetted perimeter. For [Tennant \(1976\)](#), 10% of the mean annual flow typically covers 60% of the river bed and between 30%MAF and 100%MAF of the mean annual flow generally covers nearly 100% of the river bed substrate.

The Tennant method (Tennant, 1976) defined the mean annual flow (MAF) metrics (a percentage of MAF) required to maintain ecosystem functions from a ten-year

study of United States rivers in Montana, Nebraska and Wyoming. According to his study, a 30%MAF threshold from April to September, and 10%MAF from October to March are identified as thresholds related respectively to fair and degraded conditions to sustain the riverine ecosystems. Sustaining only 10%MAF all year long is also described as a life-threatening condition for aquatic biota in rivers ([Tennant, 1976](#)). The Tennant method can be adapted to different eco-climatic contexts ([Acreman and Dunbar, 2004](#)), as did [Belzile et al. \(1997\)](#) who proposed different specific cut-off flows for different regions in Quebec. Since then, they have been used as recommendations by the Quebec Department of Forests, Wildlife and Parks ([MFFP, 1999](#)). [Belzile et al. \(1997\)](#) calculated minimum flow restrictions necessary to protect 17 fish species in 15 different ecoregions in Southern Quebec (Canada), in relation to critical phases of their life cycle. Minimum flow thresholds remain a popular hydrological technique for environmental flows determination. To protect fish habitats, [Belzile et al. \(1997\)](#) proposed the use of 25%MAF, 30% MAF and 50% MAF, the median monthly flow of August or September metrics and the 50% of a mean specific period flow metrics. Albeit inspired by the needs of key fish species for each region, [Belzile et al. \(1997\)](#) did not directly or indirectly addressed specific habitat conditions preserved by their flow metrics. With regard to water abstraction management for Southern Quebec rivers, both 7-day low flow with a return period of two years (7Q2) and ten years (7Q10) have been used ([MELCC, 2014](#)) to provide guidelines for analysing water withdrawals, maintaining a minimum flow in the rivers and, if necessary, mitigating possible cumulative impacts ([MELCC, 2015](#)). Using 7Q2 and 7Q10 flow metrics, the Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change guidelines intend to manage water sharing, flow maintenance downstream of hydraulic structures and water quality following a wastewater or a contaminant discharge ([MELCC, 2015](#)). Moreover, [Berthot et al. \(2020\)](#) compared different minimum flow metrics and concluded that 7Q2 flow metric should not be used systematically in Southern Quebec rivers as it was deemed insufficient in some regions to sustain the riverine ecosystems, according to the aforementioned MAF criteria. The variability of low flow conditions in this region lead us to investigate possible impacts of different environmental flow metrics on aquatic habitat using the wetted perimeter as an assessment criterion. The relationship between the wetted perimeter and discharge is

known to be non-linear and previous studies have used the point of maximum curvature of this relationship as one criterion to assess environmental flows while accounting for the shape of the channel ([Shang, 2007](#)). Then, the relevance of using of the 7Q2 and 7Q10 flow metrics in Southern Quebec rivers during low flow periods was analysed in this context.

2. Methodology

2.1 Selection of the study sites

The hydraulic database, from the Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change, contains more than three thousand spot discharge measurements, including the width, depth and velocity, for 382 sites from 147 rivers. The conditions to select the sites in the present study were:

- (1) Being associated and geographically close to identified hydrometric stations with a minimum of 20 years of daily flow time series to calculate environmental flow metrics as suggested by [Caissie et al. \(2007\)](#);
- (2) Having hydraulic and flow measurements taken in rivers with a natural flow regime and measurements taken at the same location as the gauging sections;
- (3) Having a minimum of four discharge measurements that include width and depth;
- (4) Having a statistically significant power function regression model of wetted perimeter as a function of flow, with $R^2_{adj} > 0.65$ and a good visual fit. It should be noted that the regression models were forced to the origin (i.e. zero wetted perimeter corresponds to zero flow).

A Grubbs and Beck test was used to identify and remove the outliers before analysing the power function equations ([Grubbs and Beck, 1972](#)). The wetted perimeter was estimated using the method of [Mackey et al., \(1998\)](#), i.e. approximating the stream section as rectangular with $W \gg D$ in Equation (1):

$$WP = W + 2 * D \quad (1)$$

WP: mean stream section wetted perimeter (m);

W : mean stream section river width (m);

D : mean stream section depth (m).

The power function regression model linking the hydraulic parameters (width, depth and velocity) and the flow was computed as in [Leopold and Maddock \(1953\)](#). This equation is also used with the wetted perimeter as a hydraulic parameter by [Mackey et al. \(1998\)](#), with Equation (2):

$$WP = aQ^b \quad (2)$$

WP : wetted perimeter (m);

Q : daily flow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

a, b : numerical coefficients to be adjusted.

Hydraulic parameters are highly dependent on flow ([Leopold and Maddock, 1953](#)). For $W \gg D$ during low flow periods, the relation between flow width, depth and velocity is modified with the approximation $WP \approx W$ as in Equation (3):

$$Q \approx WP * D * V \quad (3)$$

Each term on the right side of Equation 3 can be estimated as a function of Q :

$$Q = aQ^b * cQ^f * kQ^m = ackQ^{(b+f+m)}$$

with $b + f + m = 1$ and $a * c * k = 1$;

WP : wetted perimeter (m);

D : depth (m);

V : velocity (m s^{-1});

a, b, c, f, k, m : numerical coefficients to be adjusted.

The dataset was augmented with 19 discharge measurements from fieldwork in 2018, focusing on five rivers: Ouelle, Bras-du Nord, Beaurivage, Des-Eaux-Volées and Bécancour. Those measurements were carried out during the low flows, and permitted to reinforce the statistical power function models of those rivers, except for Des-Eaux-Volées. A total of 43 sites from 35 rivers were selected. [Figure 1](#) shows the distribution

of hydrometric stations for the 35 rivers in the eight Southern Quebec hydro-geographical regions: R01 (four rivers and five gauging sites), R02 (eight rivers and ten gauging sites), R03 (six rivers and nine gauging sites), R04 (one river and gauging site), R05 (three rivers and gauging sites), R06 (seven rivers and eight gauging sites), R07 (two rivers and gauging sites) and R08 (three rivers and four gauging sites). The sites are mainly located in rivers emptying in to the Saint-Lawrence and Saguenay rivers and are located in the western portion of Southern Quebec.

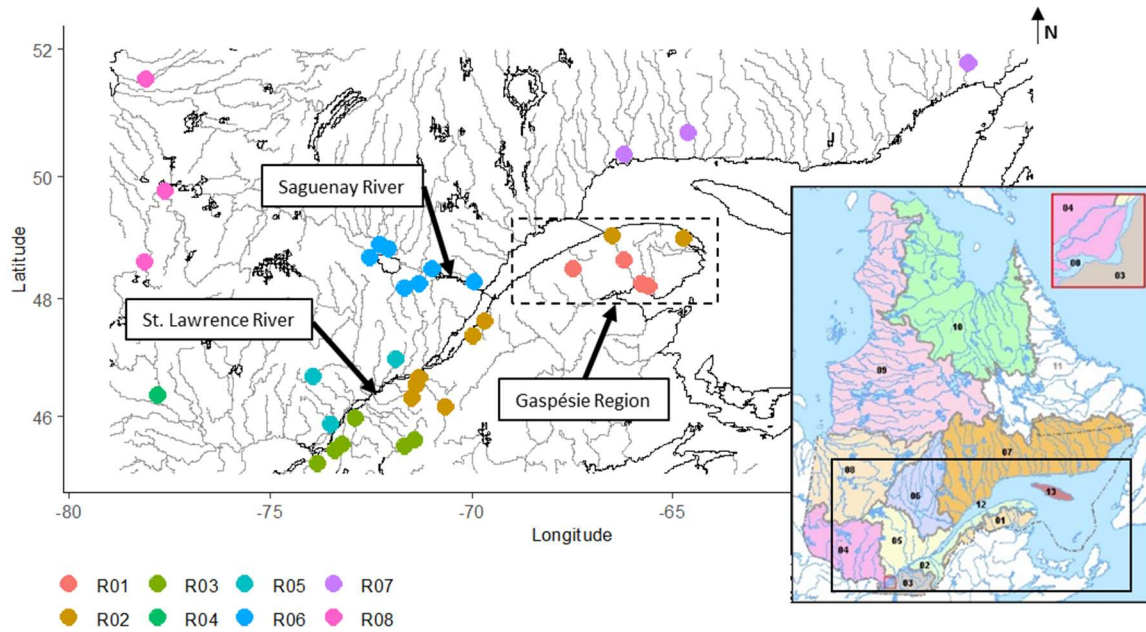


Figure 1: Study sites (35) in Southern Quebec (Quebec map from [MELCC, 2020b](#)).

2.2 Study sites

[Table 1](#) presents the hydraulic variables measured at the 43 sites and the 35 studied river characteristics. The Dartmouth, Beaurivage, Des Hurons, L'Acadie, Décharge du lac Matapédia, Des Anglais, Aux Saumons and Bell rivers have two gauging sites. For the 35 rivers, the lowest monthly flow months are February ($n=23$), September ($n=6$), March ($n=3$), July ($n=1$) and August ($n=2$). Catchment size varies from 154 km² (Bras d'Henri) to 22 275 km² (Bell) with a median value of 705 km² (Beaurivage), and the mean annual flow varies from 3.3 m³ s⁻¹ (Bras d'Henri) to 410.2 m³ s⁻¹ (Moisie). In [Table 1](#), the mean values are given for V , D and WP at each site. The R^2_{adj} for $WP(W)$ represents the

explained variability between the wetted perimeter and stream width. All values of $WP(W)$ are close to 1, which means that the wetted perimeter and the width values are strongly correlated, as expected. Also in [Table 1](#) nine columns (i.e., related to WP , D and V parameters) represent the results of a power function fitted between the wetted perimeter, the depth and the velocity with the discharge. The R^2_{adj} of the wetted perimeter as a function of the flow varies from 0.66 to 0.99. It should be noted that functions with R^2_{adj} ranging from 0.65 to 0.75 were verified for visual goodness of fit and accepted for further analyses. The two last columns correspond to the product of the a , c and k and the sum of the b , f and m numerical coefficients of the power functions, with values close to one considered good (See Equation 3). A Wilcoxon test was used, indicating significant differences between hydrographic regions for mean annual flow and hydraulic parameters (H_0 not rejected for p -value > 0.05). For MAF values and wetted perimeter values, R01, and R03 are respectively significantly different from R03 and R06. For MAF values only, R02 and R03 are significantly different from R07 and R08. For wetted perimeter values only, R01, R02, R03 and R06 are significantly different from R07 and R08. For depths, R01, R02 and R03 are significantly different from R05, R06, R07 and R08. Then, R02 is significantly different from R03 and R06 is significantly different from R07 and R08. For velocity values R02 is significantly different from R08. R07 and R08 have very different drainage basin areas, compared to the other regions, as indicated by the mean annual flow. R02, R03 and R05 mean flow values are under $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, R01, R04 and R06 mean values vary from 32 to $52 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and R07 and R08 mean values are above $180 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. For the wetted perimeter, R02, R03 and R05 mean values are between 27 and 40 m, R01, R04 and R06 mean values are between 50 and 57 m and R07 and R08 mean values are above 155 m. Looking at depth values, R01, R02 and R03 mean values are under 1.1 m, R04, R05 and R06 mean values are between 2 and 2.3 m and R07 and R08 reached 4.1 and 4.8 m. For flow velocity values, mean values vary from 0.4 (R04 and R08) to 0.9 m s^{-1} (R07). The lowest monthly flow values are during winter for R01, R02, R05, R06, R07 and R08 and during summer for R03 and R04.

Table 1: River characteristics and hydraulic parameters of the selected sites. HS: Hydrometric station, LMF: Lowest monthly flow, MAF: Mean annual flow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), GS: Gauging Site, NM: number of measurements, V: Velocity (m s^{-1}), D: Depth (m), WP: Wetted perimeter (m), Q: flow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), a, b, c, f, k, m: numerical coefficients to be adjusted.

N	HS	River	Area (km^2)	LMF	MAF	GS	NM	V	D	WP	R ² adj WP(W)	WP = aQ^b			D = cQ^f			V = kQ^m			a [*] c [*] k	b+f+m
												a	b	R ² adj	c	f	R ² adj	k	m	R ² adj		
1	010802	Bonaventure	1906	2	41.7	1	58	0.8	0.7	63.7	0.97	54.4	0.05	0.66	0.11	0.50	0.98	0.16	0.46	0.97	0.99	1.01
2	010902	Petite rivière Cascapédia	1340	2	30.6	5	43	0.7	0.8	56.0	1.00	42.2	0.09	0.88	0.21	0.38	0.96	0.11	0.55	0.98	1.00	1.01
3	011003	Cascapédia	1689	2	42.9	9	45	0.7	0.9	60.1	1.00	41.6	0.11	0.82	0.25	0.36	0.96	0.10	0.54	0.99	1.00	1.01
4	011508	Décharge du lac Matapédia (17*)	555	9	11.0	16	15	0.4	0.4	24.5	1.00	19.6	0.18	0.87	0.26	0.38	0.81	0.20	0.45	0.85	1.02	1.01
5						17	6	0.6	1.4	44.5	1.00	17.4	0.26	0.85	0.12	0.68	1.00	0.47	0.09	0.32	0.95	1.03
6	020602	Dartmouth	627	2	15.4	28	24	0.5	0.6	36.9	1.00	23.3	0.20	0.84	0.26	0.34	0.84	0.17	0.46	0.92	1.02	1.01
7						31	10	0.9	0.7	59.1	1.00	26.2	0.23	0.69	0.33	0.22	0.55	0.12	0.55	0.85	1.03	1.00
8	021407	Sainte-Anne	772	2	22.6	33	7	1.1	1.2	48.1	0.99	29.5	0.12	0.84	0.25	0.38	0.95	0.14	0.51	0.99	0.99	1.02
9	022507	Du Loup	515	2	9.7	54	63	0.4	1.0	20.7	0.98	13.4	0.22	0.82	0.48	0.33	0.79	0.17	0.45	0.87	1.08	1.01
10	022704	Ouelle	798	2	15.1	60	28	0.5	0.6	34.3	1.00	18.1	0.29	0.94	0.33	0.29	0.85	0.17	0.42	0.87	1.04	1.00
11	023401	Beaurivage	705	2	14.3	3681	9	0.5	1.6	43.3	0.99	32.6	0.09	0.85	0.37	0.41	0.91	0.08	0.52	0.92	1.01	1.02
12						74	11	0.3	1.9	44.0	0.97	36.7	0.08	0.95	1.46	0.10	0.26	0.02	0.77	0.98	1.31	0.95
13	023422	Famine	696	2	15.2	79	12	0.7	0.8	44.1	0.99	31.5	0.12	0.89	0.35	0.27	0.82	0.09	0.61	0.97	1.01	1.01
14	023432	Bras d'Henri	154	2	3.3	88	10	0.6	0.8	14.2	0.95	11.9	0.12	0.80	0.39	0.38	0.97	0.23	0.54	0.99	1.07	1.03
15	024003	Bécancour	229	2	22.2	1417	16	1.2	1.5	32.6	0.99	18.9	0.15	0.69	0.54	0.26	0.73	0.11	0.57	0.88	1.18	0.98
16	030234	Eaton	641	9	13.2	122	4	0.9	0.6	45.8	1.00	24.3	0.20	0.66	0.16	0.41	0.94	0.25	0.40	0.99	0.99	1.01
17	030282	Au Saumon	769	9	18.5	126	12	1.2	1.0	49.8	1.00	26.5	0.17	0.98	0.22	0.38	0.99	0.19	0.45	0.99	1.13	0.99
18	030316	David	323	7	5.2	148	41	0.4	0.5	13.0	0.99	11.9	0.15	0.71	0.43	0.30	0.86	0.21	0.57	0.95	1.09	1.02
19	030415	Des Hurons	308	9	4.9	167	21	0.5	0.5	16.4	0.97	14.8	0.10	0.81	0.32	0.33	0.83	0.22	0.58	0.93	1.04	1.02
20						1742	13	0.5	0.5	11.8	0.99	10.8	0.19	0.93	0.35	0.37	0.98	0.29	0.45	0.99	1.07	1.02

21	030421	L'Acadie	367	9	4.8	170	7	0.3	0.4	17.9	1.00	15.6	0.21	0.87	0.29	0.31	0.95	0.23	0.49	0.92	1.05	1.00
22						171	6	0.5	0.4	20.3	1.00	14.1	0.30	0.73	0.24	0.41	0.98	0.31	0.30	0.59	1.04	1.00
23	030907	Des Anglais	642	8	8.5	192	17	0.4	0.5	29.2	1.00	26.0	0.08	0.94	0.33	0.24	0.94	0.12	0.69	1.00	1.02	1.01
24						193	5	0.4	1.6	37.4	0.95	31.3	0.07	0.92	1.03	0.16	0.50	0.03	0.80	0.96	1.04	1.03
25	041902	Dumoine	3756	9	51.5	256	6	0.4	2.3	53.6	0.99	15.2	0.33	0.91	0.36	0.48	0.96	0.19	0.21	0.69	1.04	1.02
26	050119	Matawin	1387	2	24.4	274	4	0.6	1.6	43.6	0.97	30.1	0.11	0.99	0.13	0.67	0.73	0.25	0.25	0.13	0.97	1.03
27	050409	Bras du Nord	646	2	19.3	287	15	0.6	2.4	30.4	0.02	26.6	0.04	0.78	0.94	0.28	0.82	0.06	0.65	0.96	1.42	0.97
28	052233	De l'Achigan	641	8	11.5	332	8	0.3	2.4	44.1	0.93	39.9	0.03	0.76	1.75	0.10	0.88	0.02	0.87	1.00	1.11	1.00
29	061020	Aux Écorces	1115	2	27.8	370	26	0.4	2.3	70.4	0.99	58.9	0.05	0.83	1.28	0.16	0.94	0.01	0.80	1.00	1.05	1.01
30	061024	Cyriac	350	2	7.8	375	11	0.6	1.4	36.4	0.90	28.5	0.08	0.82	0.34	0.41	0.84	0.10	0.54	0.93	1.00	1.02
31	061801	Petite rivière Péribonka	1020	2	19.3	389	10	0.3	2.2	42.1	1.00	22.8	0.19	0.70	1.59	0.11	0.62	0.03	0.69	0.98	1.17	0.99
32	061909	Aux Saumons	591	2	8.9	2392	6	0.3	2.0	43.9	0.96	33.1	0.09	0.88	0.55	0.42	0.96	0.06	0.52	0.98	1.01	1.03
33						394	39	0.4	1.1	35.5	0.97	28.2	0.10	0.77	0.32	0.46	0.56	0.11	0.46	0.57	1.02	1.02
34	062102	Mistassini*	9631	2	201.5	2415	4	0.4	3.3	111.8	1.00	11.0	0.47	0.91	18.02	- 0.36	0.76	0.01	0.81	1.00	1.57	0.92
35	062701	Valin	768	2	23.6	2419	4	0.5	1.3	39.1	0.99	27.1	0.12	0.89	0.61	0.24	0.95	0.06	0.66	1.00	1.04	1.01
36	062803	Sainte-Marguerite Nord-Est*	1097	2	30.2	405	5	1.2	2.2	74.3	0.97	48.2	0.08	0.66	0.24	0.42	0.93	0.08	0.52	0.93	0.92	1.03
37	072301	Moisie*	19012	3	410.2	416	7	1.1	5.7	142.9	0.98	47.4	0.17	0.94	0.27	0.46	0.80	0.17	0.28	0.24	2.18	0.91
38	073503	Magpie*	7201	3	163.4	419	5	0.9	3.4	141.4	1.00	35.1	0.24	0.67	3.69	- 0.03	(0.33)	0.01	0.77	0.81	1.14	0.99
39	076601	Saint-Paul*	5504	2	142.0	424	12	0.6	3.1	187.5	1.00	112.8	0.09	0.90	0.70	0.26	0.98	0.01	0.64	1.00	1.04	1.00
40	080101	Harricana*	3724	2	59.2	1753	6	0.2	3.6	113.6	1.00	69.1	0.12	0.94	1.98	0.14	0.83	0.01	0.75	1.00	1.06	1.00
41	080707	Bell (2727* and 43*)	22275	2	388.1	2727	9	0.4	5.4	178.4	0.99	126.2	0.06	0.90	1.44	0.23	0.91	0.01	0.72	0.99	1.01	1.01
42						431	5	0.5	8.4	234.3	1.00	66.0	0.19	0.97	1.68	0.24	0.76	0.01	0.57	0.93	1.05	1.00
43	081101	Pontax*	5970	3	101.1	435	6	0.5	2.1	108.6	1.00	37.5	0.23	0.94	0.64	0.26	0.91	0.04	0.51	0.98	1.04	1.00

*Sites having their lowest flow values from 25 to 175 m³ s⁻¹ for spot discharge measurements.

2.3 Environmental flow methods

Eight hydrological/environmental flow metrics were computed to compare their corresponding wetted perimeter during low flow periods ([Table 2](#)). These low flow metrics were compared in previous studies ([Berthot et al., 2020](#); [Caissie et al., 2007](#)) and the main conclusions can be summarized as follows: The lowest monthly flow during summer in Southern Quebec is August or September, and in February or March for winter periods ([Berthot et al., 2020](#)). The Q95 environmental flow metric can be deemed adequate in regions of Quebec during summer low flow periods (i.e. $Q95 > 30\%MAF$; [Tennant, 1976](#)), e.g. for large northern rivers (R04 to R08), having the highest flow regime and variability. The annual and summer Q90 flow metric has been found to be relevant as an environmental flow metric in Southern Quebec ([Berthot et al., 2020](#)). The 7Q10 flow metric is often insufficient in Eastern Canada to sustain fish and fisheries protection ([Caissie et al., 2007](#)). [Berthot et al. \(2020\)](#) suggested new groupings of stations based on a multivariate analysis that is different than those used in the present study. They found that in these reconfigured regions, the monthly 7Q10 and Q95 flow metrics values are often nearly equal. The 7Q2 flow metric can be a relevant environmental flow for specific regime contexts, but it is not recommended as an overall environmental flow metric in Southern Quebec ([Berthot et al., 2020](#)). Except for a few rivers, the AQ50 flow metric is the most conservative ($> 30\%MAF$; [Berthot et al., 2020](#)).

Table 2: Environmental flow metrics, definitions and uses

Low flow metrics	Definition	Uses	References
Q95	95 th percentile on the flow duration curve	United-Kingdom	Acreman and Ferguson (2010)
Q90	90 th percentile on the flow duration curve	Tested in New Brunswick (Canada; insufficient to protect fish habitat)	Caissie et al. (2007)
7Q10	Mean 7-day low flow with a return period of ten years	Southern Quebec during low flow periods Dilution capacity of rivers in the United States	MELCC (2015) Linnansaari et al. (2012)

7Q2	Mean 7-day low flow with a return period of two years	Southern Quebec during low flow periods	MELCC (2015)
		Key low indicator in the Hydroclimatic Atlas of Southern Quebec	MELCC (2018)
AQ50	Median monthly flow of August	New England (also called <i>Aquatic Base Flow</i>)	USFWS (1981)
70%AQ50	70 percent of the median monthly flow of August	Prince Edward Island	
LQ50	Median discharge value of the month with lowest flows	Tested in New Brunswick (Canada)	Caissie et al. (2014)
70%LQ50	70 percent of the of the month with lowest flows		

The calculation of the 7Q10 and the 7Q2 metrics require the implementation of frequency analysis methods that were presented in [Berthot et al. \(2020\)](#), using the Generalized Extreme Value (GEV) probabilistic distribution. In this study, the MAF flow metric ([Tennant, 1976](#)) was used to set interpretative flow thresholds considered inadequate ($< 10\%MAF$) and adequate ($> 30\%MAF$) to sustain ecosystem functions and sufficient fish habitat. The Tennant method was modified in the Canadian Atlantic Provinces ([Caissie and El-Jabi, 1995](#)), with the 25%MAF, used in New Brunswick as an adequate flow threshold. In this study, the 7Q10, 7Q2, Q90, Q95, LQ50 and 70%LQ50 flow metrics were computed for inter-annual, summer and winter periods. The AQ50 and 70%AQ50 flow metrics were added for the summer period. The summer season includes the months of July to September while the winter season includes flows from January to March. The wetted perimeter associated to the maximum curvature method (QMC) was also included in the analysis, as presented in section 2.4.

2.4 Wetted perimeter linked to environmental flows

The maximum curvature method provides an alternative environmental flow metric as in [Figure 2](#) from [Mackey et al. \(1998\)](#) equations with the Equation (4) defining the point of the curvature:

$$\kappa = \frac{\left| \frac{d^2y}{dx^2} \right|}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (4)$$

Its power functions resolution with Equations (5) and (6) ([Mackey et al. 1998](#)):

$$\frac{dWP}{dQ} = (ab)Q^{(b-1)} \quad (5)$$

$$\frac{d^2WP}{dQ^2} = (ab)(h-1)Q^{(b-2)} \quad (6)$$

κ : maximum curvature;

WP : the wetted perimeter (m);

Q : the flow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

a and b : numerical coefficients to be adjusted.

And a regression power function model for the wetted perimeter as in Equation (2).

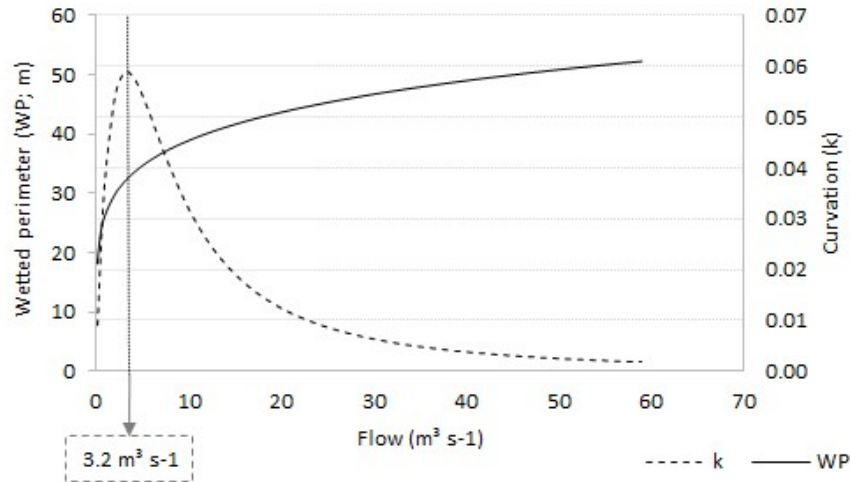


Figure 2: Maximum curvature method to determine Du Loup River environmental flow

[Figure 2](#) illustrates the environmental flow value identified ($3.2 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$) using the maximum curvature method for Du Loup River. Called “QMC”, its associated wetted perimeter value was also computed as a potential conservative threshold for food production and fish habitat availability. To compare hydraulic parameters, [Caissie and El-Jabi \(2003\)](#) proposed the use of MAF and its corresponding hydraulic parameters (width,

depth, velocity) as standardization parameters. Equation (7) describes this standardization approach for the wetted perimeter ([Caissie and El-Jabi, 2003](#)):

$$\frac{WP}{\overline{WP}} = \left(\frac{Q_e}{\bar{Q}} \right)^b \quad (7)$$

Computation of standardized wetted perimeter was performed with Equation (8):

$$WPS_{metric} = \frac{WP}{\overline{WP}} = \frac{Q_e^b}{\bar{Q}} + c \quad (8)$$

WPS_{metric} : standardized wetted perimeter for an environmental flow (%WPQ_{MAF});

WP: wetted perimeter (m);

$\overline{WP}$: wetted perimeter (m) corresponding to the mean annual flow (WPQ_{MAF});

Q_e : environmental flow (L s⁻¹ km⁻²);

$\bar{Q}$: mean annual flow (L s⁻¹ km⁻²);

b, c : numerical coefficients.

3. Results

3.1 Low flow gauging measurements data input

This section focuses on the benefit of additional sampling to increase the number of low flow gauging measurements in the dataset. [Table 3](#) presents the R²adj value for the wetted perimeter/discharge power function with and without the additional measurements made in 2018 during low flow events. [Figure 3](#) presents the regression power function for the Ouelle River, with a R²adj of 0.94. This Figure shows that the goodness of fit is better for lower flows (inset panel), which are the focus of the present study. To compare the results, some river sections documented in the DEFACC database were selected: Ouelle (Site 60, Site 62), Bras-du Nord (Site 287), Beaurivage (Site 3681, Site 74), Bécancour (Site 1417) and Des-Eaux-Volées (Site 309, Site 310). The summer 2018 discharge measurements were made as close to the DEFACC gauging sites as possible.

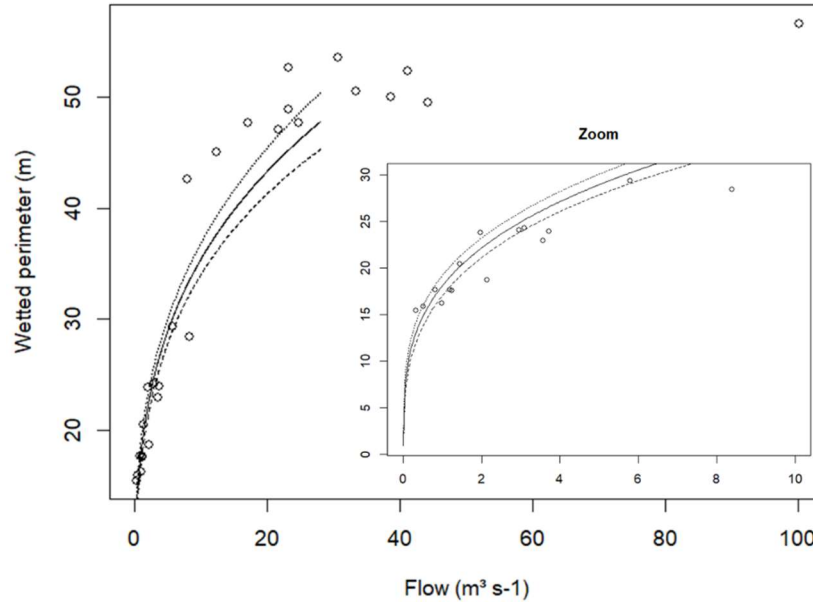


Figure 3: Regression power function model of the Ouelle River

The Ouelle River has a relatively large DEFACC dataset with sufficient low and high flow data points. Adding two low flow data points did not improve the regression equation, with only a slight improvement in the R^2_{adj} (+0.97% and +0% for Site 60 and Site 62). The same conclusion can be reached for the Beaurivage River, +0% for Site 3681 and +1.83% for Site 74. There was no improvement of the R^2_{adj} for the Site 309 of Des-Eaux-Volées River. However, the R^2_{adj} decreased for Site 310 (-98.2%) for Des-Eaux-Volées River. For Site 287 of Bras-du-Nord River, additional low flow data improved the R^2_{adj} by about 10.7%. The biggest increase of the R^2_{adj} was for the Bécancour River (+35.1%); and it permitted to select this site in the final analysis with $R^2_{adj} > 0.65$. Thus, additional data were used for four of the selected sites, namely for the Ouelle (Site 60), Bras-du-Nord (Site 287), Beaurivage (Site 74) and Bécancour (Site 1417) rivers ([Table 1](#)).

Table 3: R^2_{adj} evolution with or without 2018 fieldwork data on the wetted perimeter and flow log-log regression function.

River	Additional Gauging Measurements (AGM, 2018)	Site	R^2_{adj} without AGM	R^2_{adj} with AGM	Difference (%)
Ouelle	2	60	0.928	0.937	+0.97
		62	0.935	0.935	0

Bras-du-Nord	5	287	0.704	0.779	+10.7
Beaurivage	5	3681	0.851	0.851	0
		74	0.931	0.948	+1.83
Des-Eaux-Volées	3	309	0.212	0.212	0
		310	0.451	0.008	-98.2
Bécancour	4	1417	0.510	0.689	+35.1

3.2 Wetted perimeter associated with low flow metrics

[Figure 4](#) presents the flow metric values of the 35 rivers studied and the wetted perimeter values of the 43 river sections (all in the aforementioned 35 rivers) calculated for inter-annual, summer (S) and winter (W) periods. The standardized flow results were divided by the MAF, for each flow metric (i.e. standardized flow of 1 =MAF). The standardized wetted perimeter values were divided by the wetted perimeter corresponding to the MAF (WPS_{metric} , as per Equation (8)), for each flow metric. The 21 flow metrics were ordered from the lowest to the highest median values. The QMC median value is equivalent to 77% of the WPS_{MAF} , which is slightly higher than the $WPS_{10\%MAF}$ value, which corresponds to 76% WPS_{MAF} . The $WPS_{25\%MAF}$ and $WPS_{30\%MAF}$ thresholds were equaled to 85% WPS_{MAF} and 86% WPS_{MAF} respectively (median values). In [Figure 4a](#), it appeared that summer flow metrics gave higher WPS_{metric} values than winter and inter-annual flow metrics. The 7Q2S, LQ50S, and AQ50 median flow metrics values were higher than the 30%MAF threshold value, and the 70%LQ50S and 70%AQ50 median flow metrics were between 25%MAF and 30%MAF values. It should be noted that both of the pairs AQ50/LQ50S and 70%AQ50/70%LQ50S flow metrics had very similar median values, as the summer lowest monthly flow values is during August for 33 of the 43 studied river sites, which means that AQ50=LQ50 at those sites for the summer. Sixteen of the 43 studied river sites have their lowest monthly flow values during February (13) and March (3). The median 7Q10 flow metric and the flow identified using the QMC method were similar to 10%MAF. A total of four river sites had all their inter-annual (7Q10, 7Q2, Q90, Q95, LQ50, 70%Q50) and summer flow metrics (7Q10S, 7Q2S, Q90S, Q95S, LQ50S, 70%Q50S, AQ50 and 70%AQ50) values < 10%MAF. In [Figure 4b](#), the WPS_{AQ50} and WPS_{LQ50S} showed median values > $WPS_{30\%MAF}$. In addition to $WPS_{10\%MAF}$, the WPS_{7Q10} , WPS_{Q95} , WPS_{7Q2} , WPS_{7Q10S} , WPS_{Q95} , WPS_{7Q10W} and WPS_{Q95W} had their median values < WPS_{QMC} median value. The rest of the median WPS_{metric} was between WPS_{QMC} and $WPS_{25\%MAF}$.

In [Figure 4b](#), the associated wetted perimeter to the flow metrics values presented more variability within the different time periods. Eighteen rivers had their six inter-annual associated wetted perimeter values $< WPS_{QMC}$ values. Fourteen river sites had six winter WPS_{metric} values $< WPS_{QMC}$, and eleven river sites had eight summer WPS_{metric} values $< WPS_{QMC}$. It should be noted that thirteen river sites had WPS_{QMC} values $< WPS_{10\%MAF}$. Then, six river sites (Décharge du lac Matapédia; Site 17, Du Loup; Site 54, Ouelle; Site 60, Eaton; Site 122, and Dartmouth; Site 28 and Site 31) all had associated wetted perimeter values $< WPS_{QMC}$. Lastly, three, thirteen and seventeen river sites had WPS_{QMC} values respectively under the $WPS_{10\%MAF}$, $WPS_{25\%MAF}$ and $WPS_{30\%MAF}$ thresholds.

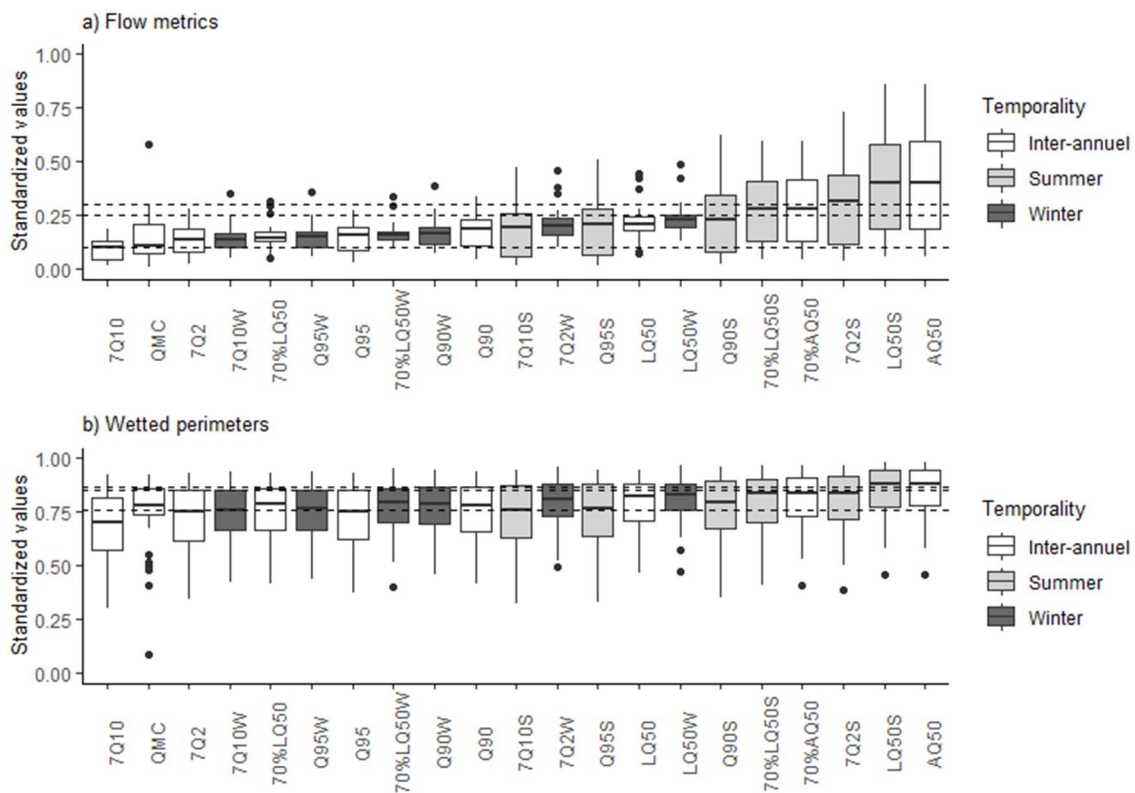


Figure 4: Standardized low flow metrics (a) and their associated wetted perimeter (b) gathered inter-annual, summer (S) and winter (W) periods. Horizontal lines: 10%MAF, 25%MAF and 30%MAF flow thresholds and their associated wetted perimeter median values.

The differences between the third and second quartile varied from 4% to 41% (median at 11%) for the flow metrics values ([Figure 4a](#)) and from 12% to 24% (median at 19%) for the associated wetted perimeter values ([Figure 4b](#)). The highest flow values variability were observed among the more conservative flow metrics (AQ50, LQ50S, 7Q2S) whereas some less conservative flow metrics (7Q10, 7Q10S, Q95S, 7Q2) also showed some variability.

3.3 Spatial distribution of the wetted perimeters

[Figure 5](#) presents the spatial distribution of the lowest and highest WPS_{metric} mean values. The lowest wetted perimeter are systematically associated with 10%MAF, 7Q10, Q95 and QMC flow metrics. [Figure 5a](#) shows a spatial pattern: the lowest inter-annual wetted perimeter values were associated with 10%MAF threshold along the 48th parallel, with QMC flow method on the southern side of the St. Lawrence River and with 7Q10 flow metric mainly on the northern side of the St. Lawrence River. In [Figure 5b](#), the highest inter-annual wetted perimeter values were mainly associated with 30%MAF threshold, with LQ50 flow metric and with the QMC flow method. In [Figure 5c](#), the lowest summer wetted perimeter values were associated with 10%MAF along the 48th parallel, with 7Q10S flow metric on the southern side of the St. Lawrence River and with the QMC flow method mainly on the northern side of the St. Lawrence River and the Q95S flow metric. In [Figure 5d](#), the highest summer wetted perimeter values were mainly associated with AQ50 flow metric on the northern side of the St. Lawrence River and in Gaspésie region and with 30%MAF threshold on the southern side of the St. Lawrence River ([Figure 1](#)). In [Figure 5e](#), the lowest winter wetted perimeter values were associated with 10%MAF along the 48th parallel (plus three sites in the southern region), mainly with the QMC flow method on both sides of the St-Lawrence River and with 7Q10W flow metric concentrated on the southern shore of the St. Lawrence River. In [Figure 5f](#), the highest winter wetted perimeter values were, as for inter-annual values, mainly associated with 30%MAF threshold (27/35 rivers), with LQ50W, 7Q2W flow metrics and the QMC flow method. As winter wetted perimeter mean values were close to each other, the second highest values were associated with 25%MAF (18/35 rivers), with LQ50W (8) flow metric mainly in the west southern part on both shores of the St. Lawrence, the QMC

flow method (6) along the south shore of the St. Lawrence River and the 7Q2W flow metric (3).

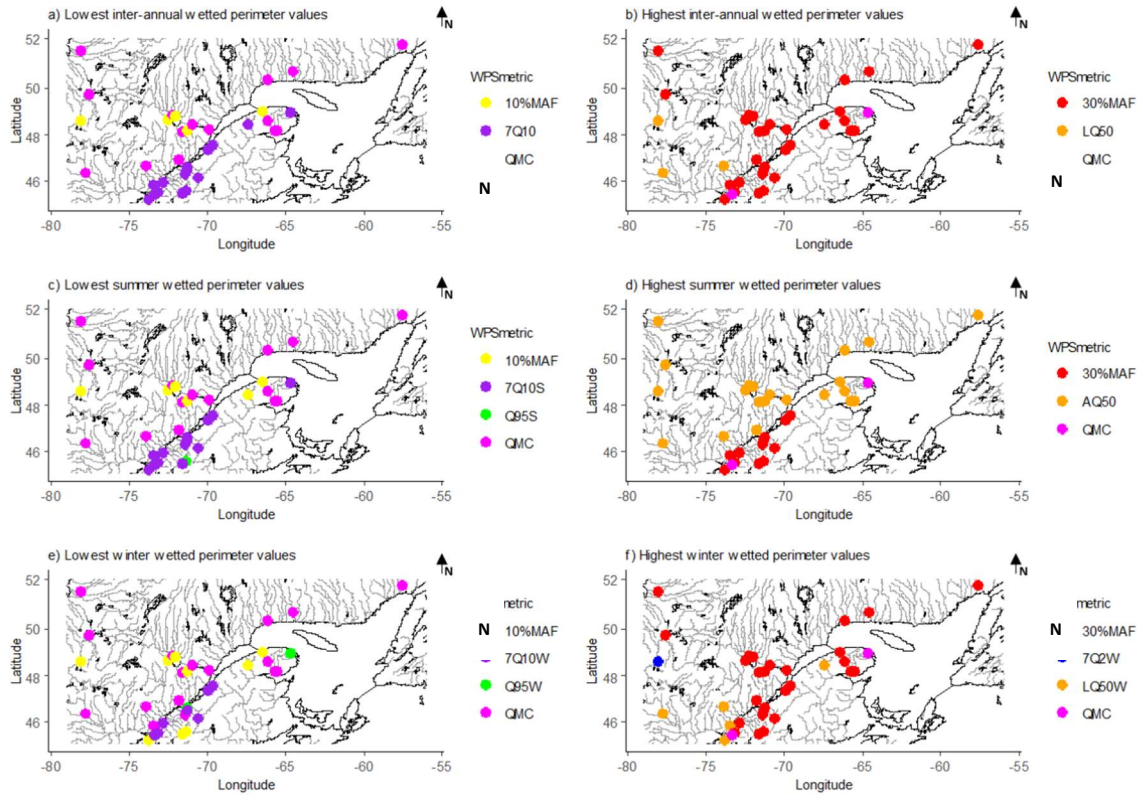


Figure 5: WPS_{metric} corresponding to the lowest (a, c, e) and highest (b, d, f) mean values for inter-annual (top two), summer (S) and winter (W) periods, the MAF thresholds and the QMC method in Southern Quebec rivers

Two main groups can be identified among the 43 river sites considering the WPS_{metric} mean values: (1) sites with very low $WPS_{10\%MAF}$ and/or low WPS_{QMC} values, dominated by the WPS_{AQ50} and (2) sites dominated by the $WPS_{30\%MAF}$ values in the southern part.

3.4 Wetted perimeter through specific examples

[Figure 6](#) presents the different possible evolution of flow metrics and WPS_{metric} values for inter-annual, summer (S), and winter (W) periods regardless of the region. Dotted lines indicate the three MAF thresholds (10%, 25%, 30%MAF) as well as the QMC method, for selected sites. For each river, the flow metrics were ordered in ascending order of

specific discharge. It can be noted that the differences between flow values were sometimes very small. There was no clear pattern among the 43 sites regarding catchment size. Also, the R02, R03 and R04 river sites results presented the lowest flow and wetted perimeter values, mostly lower than 10%MAF and $WPS_{10\%MAF}$ for R02 and R03 river sites. [Figure 6a](#) presents the Au Saumon River (Site 126) from the R03 hydrographic region. The 7Q10 flow metric provided the lowest flow (5%MAF; darker dashed line) and wetted perimeter (61% WPS_{MAF} ; solid line). The highest flow metrics (30%MAF) represented 82% WPS_{MAF} . Lines showing the evolution of flow and wetted perimeter values were quasi-parallel and linear from the lowest to the highest values. The QMC method and the 7Q2 flow metric values were respectively 17%MAF/75% WPS_{MAF} and 8%MAF/66% WPS_{MAF} . In [Figure 6a](#), the flow metric order did not show a domination depending on inter-annual, winter or summer period flow values. [Figure 6b](#) presents metrics for L'Acadie River (Site 171), also from the R03 hydrographic region. The 7Q10 flow metric provided the lowest values (2%MAF; 30% WPS_{MAF}) and the QMC method the highest (45%MAF; 85% WPS_{MAF}). The evolution of the flow and wetted perimeter values followed each other but with a greater initial decrease compared to the previous site. The flow metric order showed highest flow (and WPS_{metric}) values from the winter flow metrics. The 7Q2 flow metric values were 3%MAF and 34% WPS_{MAF} . [Figure 6c](#) presented Bras du Nord River (Site 287) from the R05 region. The QMC flow method provided the lowest flow and wetted perimeter (4%MAF; 87% WPS_{MAF}) values and the AQ50 flow metrics the highest (51%MAF; 97% WPS_{MAF}). In other words, the flow values increased by about 47%, which can be considered possibly beneficial for this riverine ecosystem and associated with a much smaller increase for the wetted perimeter (about 10%). The eight summer flow metrics showed the highest flow values. The 7Q2 flow metric flow corresponded to 19%MAF and 93% WPS_{MAF} . [Figure 6d](#) presents the Magpie River (Site 419) from the R07 region. The QMC flow method provided the lowest values (4%MAF; 48% WPS_{MAF}) and the AQ50 flow metric the highest (83%MAF; 96% WPS_{MAF}). The 7Q2 flow metric at this station corresponded to 20%MAF and 68% WPS_{MAF} . The evolution of the flow and wetted perimeter values presented two main shifts in the slope: one after the 30%MAF threshold (+15.9%MAF; +8% WPS_{MAF}) and one at the 70%AQ50 flow metric (+12.5%MAF; +4.2% WPS_{MAF}).

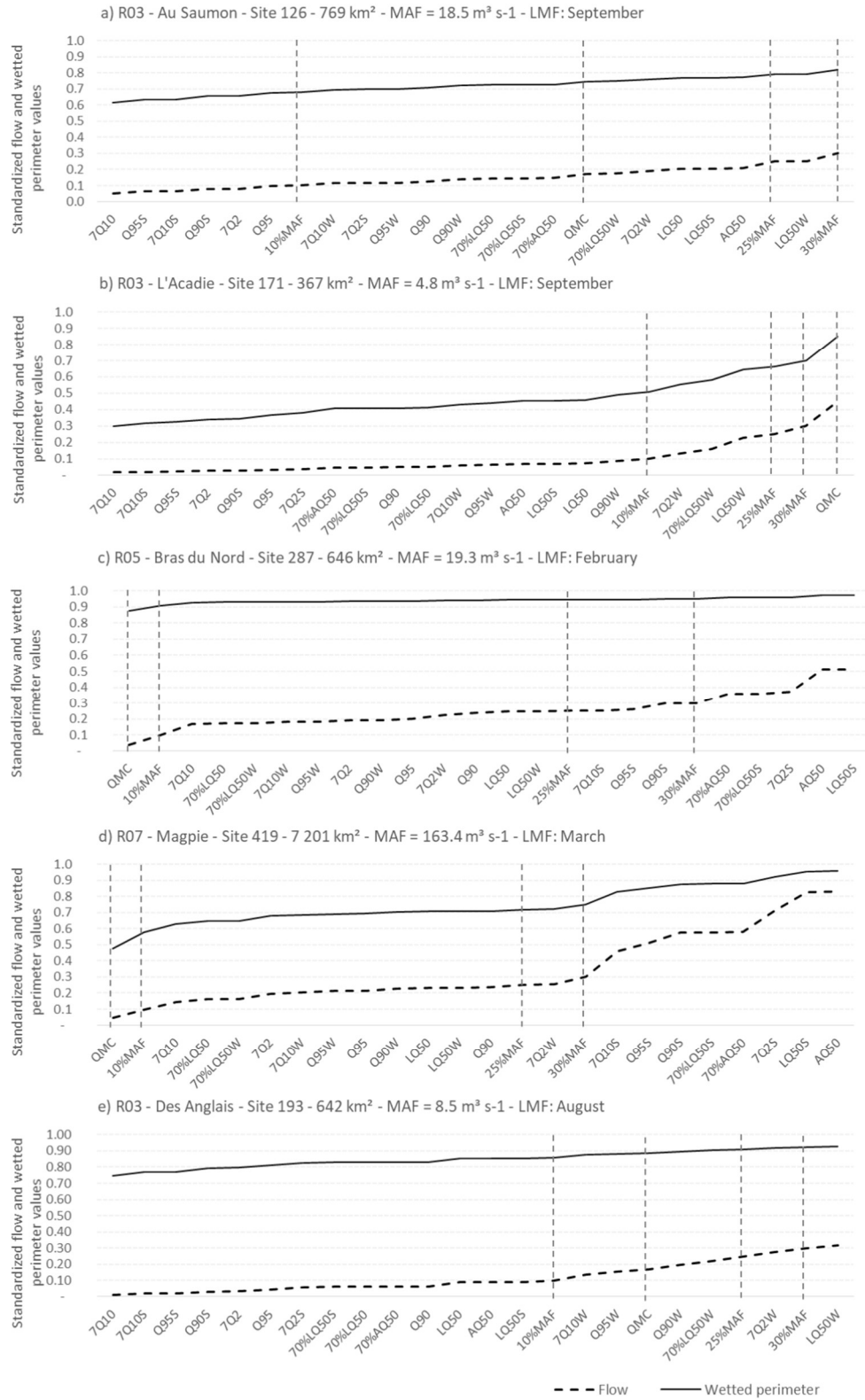


Figure 6: Flow metrics (dotted line) and WPS_{metric} (full line) variation for selected rivers.

MAF: mean annual flow; LMF: lowest monthly flow

In [Figure 6d](#), the flow metric order also showed highest flow values for the eight summer flow metrics. This northern river site had its lowest monthly flow in March, whereas southern sites like Bras du Nord River are often characterized by earlier low winter flows (February). [Figure 6e](#) presented Des Anglais River (Site 193) from the R03 hydrographic region. The 7Q10 flow metric provided the lowest flow and wetted perimeter values (1%MAF; 75%WPS_{MAF}) and the LQ50W the highest (32%MAF; 93%WPS_{MAF}). Following the 10%MAF threshold, the winter flow metrics evolution presented a steeper slope (change in WPS_{metric} values as a function of flow) from 7Q10W to the LQ50W flow metrics (+22%MAF; +7% WPS_{MAF}). The 7Q2 and the QMC flow metrics values were respectively 4%MAF/80%WPS_{MAF} and 17%MAF/89%WPS_{MAF}.

3.5 Wetted perimeter through hydrographic regions

[Table 4](#) presents the least ($< \text{WPS}_{10\%MAF}$) and the most conservative ($> \text{WPS}_{25\%MAF}$ and $> \text{WPS}_{30\%MAF}$) flow metrics associated with the wetted perimeter values with their equivalent in %WPS_{MAF} (mean values), by hydrographic regions. A fourth threshold ($> \text{WPS}_{QMC}$; region mean value) was added to compare the results. For R01 river sites in [Table 4](#), none of the flow metrics gave an associated wetted perimeter value $< \text{WPS}_{10\%MAF}$ (74%WPS_{MAF}) and only the AQ50 flow metric gave values $> \text{WPS}_{30\%MAF}$ (85%WPS_{MAF}). In this region, the 70%AQ50, 7Q2S, LQ50S and LQ50W flow metrics gave wetted perimeter values $> \text{WPS}_{25\%MAF}$ (83%WPS_{MAF}). Flow metrics were deemed relatively conservative for the riverine ecosystems (i.e. $> \text{WPS}_{QMC}$ and $> 78\%\text{WPS}_{MAF}$), except 7Q10, 10%MAF, Q95, 7Q2 and 70%LQ50 flow metrics. For R02 and R03 respectively, eight and fifteen flow metrics had their associated wetted perimeter $< \text{WPS}_{10\%MAF}$. For R02, the 30%MAF threshold provided wetted perimeter values $> 80\%\text{WPS}_{MAF}$ and the 25%MAF, 30%MAF, AQ50 and LQ50S flow metrics were all associated with wetted perimeters $> \text{WPS}_{QMC}$ (77%WPS_{MAF}). For R03, the QMC and 30%MAF provided wetted perimeter values $> 80\%\text{WPS}_{MAF}$ and the 30%MAF was associated with wetted perimeters $> \text{WPS}_{QMC}$ (82%WPS_{MAF}). For R04 to R08 river sites in [Table 4](#), all WPS_{metric} values were $> \text{WPS}_{QMC}$ (41%WPS_{MAF}). For R04, all flow metrics except QMC and 7Q10 provided values $> \text{WPS}_{25\%MAF}$ (63%WPS_{MAF}) and a total of fifteen flow metrics provided values $> \text{WPS}_{30\%MAF}$ (67%WPS_{MAF}) including the six

winter flow metrics. For the rest of the region (R05 to R08), the $WPS_{25\%MAF}$ and $WPS_{30\%MAF}$ presented values $\geq 80\%WPS_{MAF}$. The summer flow metrics typically provided the highest wetted perimeter values ($> WPS_{30\%MAF}$) with 7Q2W and LQ50W providing similar WPS_{metric} for R05. In [Table 4](#), R04 (only one river site) provided the lowest equivalent in $\%WPS_{MAF}$ whereas R05 included sites with the highest $\%WPS_{MAF}$ values. Also, the WPS_{QMC} provided values $> WPS_{25\%MAF}$ just for R03. In [Table 4](#), considering all river sites, the LQ50S, and AQ50 flow metrics ($> WPS_{30\%MAF}$; $84\%WPS_{MAF}$), and the 7Q2S, 70%LQ50S and 70%AQ50 flow metrics ($> WPS_{25\%MAF}$; $82\%WPS_{MAF}$) were the most conservative for the riverine ecosystems, as expected from [Figure4a](#) results, and the 7Q10 flow metric was the least conservative ($< WPS_{10\%MAF}$; $73\%WPS_{MAF}$). The associated flow metrics were selected when more than 50% of the wetted perimeter values of the 43 river sites was reached. When wetted perimeters were compared to WPS_{QMC} result ($77\%WPS_{MAF}$), the Q90, LQ50, Q90S, 7Q2W, 70%LQ50W, Q90W and LQ50W flow metrics were also considered as conservative if this threshold was deemed sufficient.

Table 4: Review of the WPS_{metric} results and the more conservative flow metrics depending on WPS_{10%MAF}, WPS_{25%MAF} and WPS_{30%MAF} thresholds and WPS_{QMC} and their equivalent in %WPS_{MAF} (on the right)

	< WPS _{10%MAF}	WPS _{MAF}	> WPS _{25%MAF}	WPS _{MAF}	> WPS _{30%MAF}	WPS _{MAF}	> WPS _{QMC}	WPS _{MAF}
R01	-	74%	70%AQ50, 30%MAF, AQ50, 7Q2S, LQ50S, LQ50W	83%	AQ50	85%	ALL excepted 7Q10, 10%MAF, Q95, 7Q2 and 70%LQ50	78%
R02	7Q10, Q95, 7Q2, 7Q10S, Q95S, Q90S, 7Q10W, Q95W	70%	30%MAF	80%	-	82%	25%MAF, 30%MAF, AQ50, LQ50S	77%
R03	7Q10, Q95, 7Q2, 70%LQ50, Q90, 70%AQ50, AQ50, 7Q10S, Q95S, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S, 7Q10W, Q95W	70%	QMC, 30%MAF	80%	-	83%	30%MAF	82%
R04	QMC	47%	ALL metrics excepted QMC and 7Q10	63%	70%LQ50, Q90, LQ50, 70%AQ50, AQ50, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S, 7Q10W, Q95W, 7Q2W, 70%LQ50W, Q90W, LQ50W	67%	ALL flow metrics	41%
R05	QMC	87%	LQ50, 70%AQ50, 30%MAF, AQ50, 7Q2S, 70%LQ50S, LQ50S, 7Q2W, LQ50W	92%	LQ50, AQ50, LQ50S, 7Q2W, LQ50W	93%	ALL flow metrics	86%
R06	QMC	74%	70%AQ50, 30%MAF, AQ50, 7Q10S, Q95S, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S	83%	70%AQ50, AQ50, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S	85%	ALL flow metrics	73%
R07	QMC	69%	70%AQ50, 30%MAF, AQ50, 7Q10S, Q95S, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S	80%	70%AQ50, AQ50, 7Q10S, Q95S, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S	82%	ALL flow metrics	58%
R08	QMC	72%	70%AQ50, 30%MAF, AQ50, 7Q10S, Q95S, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S	82%	70%AQ50, AQ50, 7Q10S, Q95S, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S	84%	ALL flow metrics	65%
Total	7Q10	73%	30%MAF, AQ50, LQ50S, 70%AQ50, 70%LQ50S, 7Q2S	82%	AQ50, LQ50S	84%	70%LQ50, Q90, LQ50, 25%MAF, 70%AQ50, 30%MAF, AQ50, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S, 7Q2W, 70%LQ50W, Q90W, LQ50W	77%

4. Discussion and conclusion

In this study, the wetted perimeter associated to low flow metrics values were compared for inter-annual, summer and winter periods and for Southern Quebec hydrological regions. Power functions were compared by sites, rivers and hydrological regions. Results showed that 1) the wetted perimeter is a relevant variable due to its close relationship with the channel top width during low flow periods (and the channel top width is very easily measured in the field) and 2) using the mean annual flow as a standardization parameter allows to compare all results and easily define hydraulic parameter (wetted perimeter) critical values corresponding to cut-off flows. Studies using wetted perimeter have focused on break points to determine a low flow threshold with which to manage water withdrawals ([Tharme, 2003](#)). Break points in the flow-WP relationship were determined by calculations ([Gippel and Stewardson, 1998](#)) or visually in other studies, but the low flow threshold that is therefore selected was not previously compared to alternative thresholds. In the present study, the maximum curvature method ([Mackey et al. 1998](#)) was chosen to compare the flow associated to this method (QMC) and its associated wetted perimeter to other metrics to complete the environmental flow set to be compared. To do so, flow metric and associated wetted perimeter values were standardized by the mean annual flow (MAF) and its associated wetted perimeter value. Also, the 10%MAF, 25%MAF and 30%MAF and their associated wetted perimeter values were used as the poorest (10%MAF) and the fairest (30% MAF) flow thresholds to maintain riverine ecosystem sustainability ([Tennant, 1976](#), [Belzile et al., 1997](#), [Caissie and El-Jabi, 1995](#)). The QMC method identifies a point in the flow-wetted perimeter function where a rapid decline in wetted area of the stream, which may be indicative of a critical loss of fish habitat availability and food production ([Gippel and Stewardson, 1998](#)). Results showed that:

- Wetted perimeter - flow regression power function model best fitted the lower range of measured flow values (and often less so for the higher range);
- Summer flow metrics provide the highest flow values than inter-annual and winter flow metrics. Most of the inter-annual flow metrics were influenced by winter low flows as 26 of the 35 studied rivers had their lowest monthly flow during winter period ([Table 1](#));

- The studied sites presented two sub-regions on either side of St. Lawrence River for summer period, the lowest inter-annual and winter flow values. Identifying the month with the lowest flow can be a useful first step in choosing between applying an inter-annual or a summer/winter environmental flow metric;
- The maximum curvature method can be a good indicator to identify thresholds to protect aquatic ecosystems for sites on the south shore of the St. Lawrence (especially when the wetted perimeter decreases rapidly below the QMC);
- This study confirms that the 10%MAF threshold value is the least conservative flow metric with potential negative consequences on ecological integrity if selected, but the difference with 30%MAF in terms of associated wetted perimeter can be low in some cases (difference that can range from 3% to 23%);
- The wetted perimeter values associated with 70%LQ50, Q90, LQ50, 25%MAF, 70%AQ50, 30%MAF, AQ50, 7Q2S, 70%LQ50S, Q90S, LQ50S, 7Q2W, 70%LQ50W, Q90W and LQ50W flow metrics are conservative when compared to the maximum curvature method mean and median wetted perimeter values;
- The maximum curvature method generally provides environmental flow values that are not conservative (<25%MAF threshold) that could be a minimum for dry periods as explained in [Gippel and Stewardson \(1998\)](#);
- Thirteen (<25%MAF; WPS_{25%MAF}) to seventeen (<30%MAF; WPS_{30%MAF}) sites present low flow periods that could challenge the sustainability of aquatic ecosystems;
- The 70%LQ50S, 70%AQ50, 7Q2S, LQ50S and AQ50 flow metrics provide conservative flow values (i.e. > 30%MAF). For winter periods, LQ50W has a mean value of around 23%MAF;
- The inter-annual 7Q10 flow metric is insufficient to protect riverine ecosystems as shown by both flow and wetted perimeter thresholds;
- The inter-annual 7Q2 flow metric is also insufficient to protect riverine ecosystems when compared to mean annual flow but provided relatively conservative wetted perimeter values for half of the river sites (i.e. >WPS_{QMC}).

In this study, it was interesting to observe the variability of wetted perimeter values depending on the use of different low flow metrics for a specific river. It emerged that just looking at the environmental flow values alone may be insufficient to measure the potential impact on aquatic habitat, and that the wetted perimeter provided a more accurate indication of risks to ecosystem health and habitat (actual and potential loss). In fact, the wetted perimeter approach can bring another level of analysis which is complimentary to environmental flow metrics. The maximum curvature method can provide a minimum wetted perimeter threshold that can be defined for Southern Quebec rivers as a complement tool to assess environmental flows. However, just five summer flow metrics including the AQ50 flow metric, and the 25%MAF and 30%MAF thresholds are relevant and potentially appropriate, when considering both flow and wetted perimeter thresholds. Consequently, the rest of the tested flow metrics including those associated with the QMC method and the 7Q10 and 7Q2 flow metrics do not provide conservative flow and wetted perimeter values.

Results indicated that the spatial distribution has to be taken into account to set thresholds that are representative of the variability to adequately protect aquatic habitats in Southern Quebec rivers. The temporal variability and river location are important in environmental flows assessments ([Berthot et al., 2020](#)). Also, the results pointed out problematic river sites on the south shore of the St. Lawrence River like the Ouelle River (R02) and Dumoine River (R04). For these two rivers, the 50%MAF might be applied as a fair flow metric, as suggested by [Belzile et al. \(1997\)](#).

Indeed, results showed the relevance of [Belzile et al. \(1997\)](#)'s cut-off flow recommendations for problematic rivers. Consequently, when advocating the use of the lowest environmental flow metric, such as 7Q10 or 7Q2 flow metrics, as a possible solution (based on changes in the wetted perimeter), water managers need to be careful. Other biological needs such as biotic interactions, energy sources and water quality could be important to maintain adequate and healthy riverine ecosystems during low flow periods as other key habitat variables may come in to play. According to [Jowett \(1997\)](#), other hydraulic parameters such as depth and velocity based on the value of the wetted perimeter, can present poor values depending on the shape of the channel. Modelling fish habitats over large geographical area is a difficult task. Therefore, including the wetted

perimeter using the power function method allows us to have a first, coarse indication of fish habitat conditions/changes during low flow periods, which can be indicative of the overall health of the ecosystem. This will also allow us to develop a river classification and adjust environmental flow metrics based on regional variations.

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge the financial contribution of the Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change (2013-2020 Climate Change Action Plan and the Electrification and Climate Change Funds). The contribution of the *Direction de l'Expertise Hydrique* of the Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change in terms of expertise and data sharing is acknowledged as is the contribution from interns to the summer field work.

References

- Acreman, M. C., and M. J. Dunbar. 2004. "Defining environmental river flow requirements: A review." *Hydrology and Earth System Sciences* 8 (5): 861-876. doi: [10.5194/hess-8-861-2004](https://doi.org/10.5194/hess-8-861-2004).
- Acreman, M. C., and A. J. D. Ferguson. 2010. "EFs and the European Water Framework Directive." *Freshwater Biology* 55 (1): 32-48. doi: 10.1111/j.1365-2427.2009.02181.x.
- Arthington, A. H. 2012. *Environmental flows: saving rivers in the third millennium*. Berkley: Freshwater ecology series – University of California. doi: 10.1525/california/9780520273696.001.0001.
- Arthington, A. H., J. G. Kenne, E. D. Stein, and J. A. Webb. 2018. "Recent advances in environmental flows science and water management: Innovation in the Anthropocene." *Freshwater Biology* 63 (8): 1022-1034. doi: [10.1111/fwb.13108](https://doi.org/10.1111/fwb.13108).
- Bartschi, D. K. 1976. 'A habitat-discharge method of determining instream flows for aquatic habitat', in Orsborn, J. F. and Allman, C. H. (Eds), *Proceedings of the Symposium and Speciality Conference on Instream Flow Needs II*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland. pp. 285–294.
- Belzile, L., P. Bérubé, V. D. Hoang et M. Leclerc. 1997. "Méthode échohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec." Rapport scientifique, Ministère de l'Environnement et de la Faune et Pêches et Océans Canada.

- Berthot, L., A. St-Hilaire, D. Caissie, N. El-Jabi, J. Kirby, and S. Ouellet-Proulx. 2020. "Southern Quebec environmental flow assessments: spatial and temporal scales sensitivity." *Canadian Water Resources Journal*.
- Brisbane Declaration. 2007. "Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being". Paper presented at the 10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference, Brisbane, September 3-6.
- Caissie, D., N. El-Jabi. 1995. "Comparison and regionalization of hydrologically based instream flow techniques in Atlantic Canada." *Canadian Journal of Civil Engineering* 22(2): 235-246. doi: 10.1139/195-033.
- Caissie, D., N. El-Jabi. 2003. "Instream flow assessment: from holistic approaches to habitat modelling". *Canadian Water Resources Journal* 28(2): 173-183. doi: 10.4296/cwrj2802173.
- Caissie, D., N. El-Jabi, and C. Hébert. 2007. "Comparison of hydrologically based instream flow methods using a resampling technique." *Canadian Journal of Civil Engineering* 34(1): 66-74. doi: 10.1139/L06-095.
- Caissie, J., D. Caissie, and N. El-Jabi. 2014. "Hydrologically based environmental flow methods applied to rivers in the Maritime Provinces (Canada)." *River Research and Applications* 31(6): 651-662. doi: [10.1002/rra.2772](https://doi.org/10.1002/rra.2772).
- Canadian Fisheries Act. 2020. Revised Statutes of Canada, 1985, c. F-14 <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/acts/F-14/page-1.html#h-231177>. Consulted on 2020/12/20.
- Duncan, W. W., R. B. Goodloe, J. L. Meyer, and E. S. Prowell. 2009. "Does channel incision affect in-stream habitat? Examining the effects of multiple geomorphic variables on fish habitat." *Restoration Ecology* 19(1): 64-73.
- Gippel, C. J., and M. J. Stewardson. 1998. "Use of wetted perimeter in defining minimum environmental flows." *Regulated Rivers Research and Management*. 14: 53-67.
- Grubbs, F. E., and G. Beck. 1972. "Extension of sample sizes and percentage points for significance tests of outlying observations." *Technometrics* 14(4): 847-854. doi: 10.2307/1267134.
- Hersh, R. S., and D. R. Maidment. 2006. "Assessment of hydrologic alteration software". The University of Texas at Austin CRWR Online Report 06-11.
- Jowett, I. G. 1997. "Instream flow methods: a comparison of approaches." *Regulated rivers: Research & Management* 13: 115-127.
- Leopold L. B., and T. Maddock Jr. 1953. "The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications". *Geological Survey Professional Paper* 252.
- Linnansaari, T., W. A. Monk, D. J. Baird, and R. A. Curry. 2012. "Review of approaches and methods to assess Environmental Flows across Canada and internationally." Document 2012/039, DFO Canadian Sciences Advisory Secretary Research.
- MFFP (Ministère de la Faune, des Forêts et des Parcs) 1999. *Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats*. 4th éd. Québec : Direction de la faune et des habitats, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs.

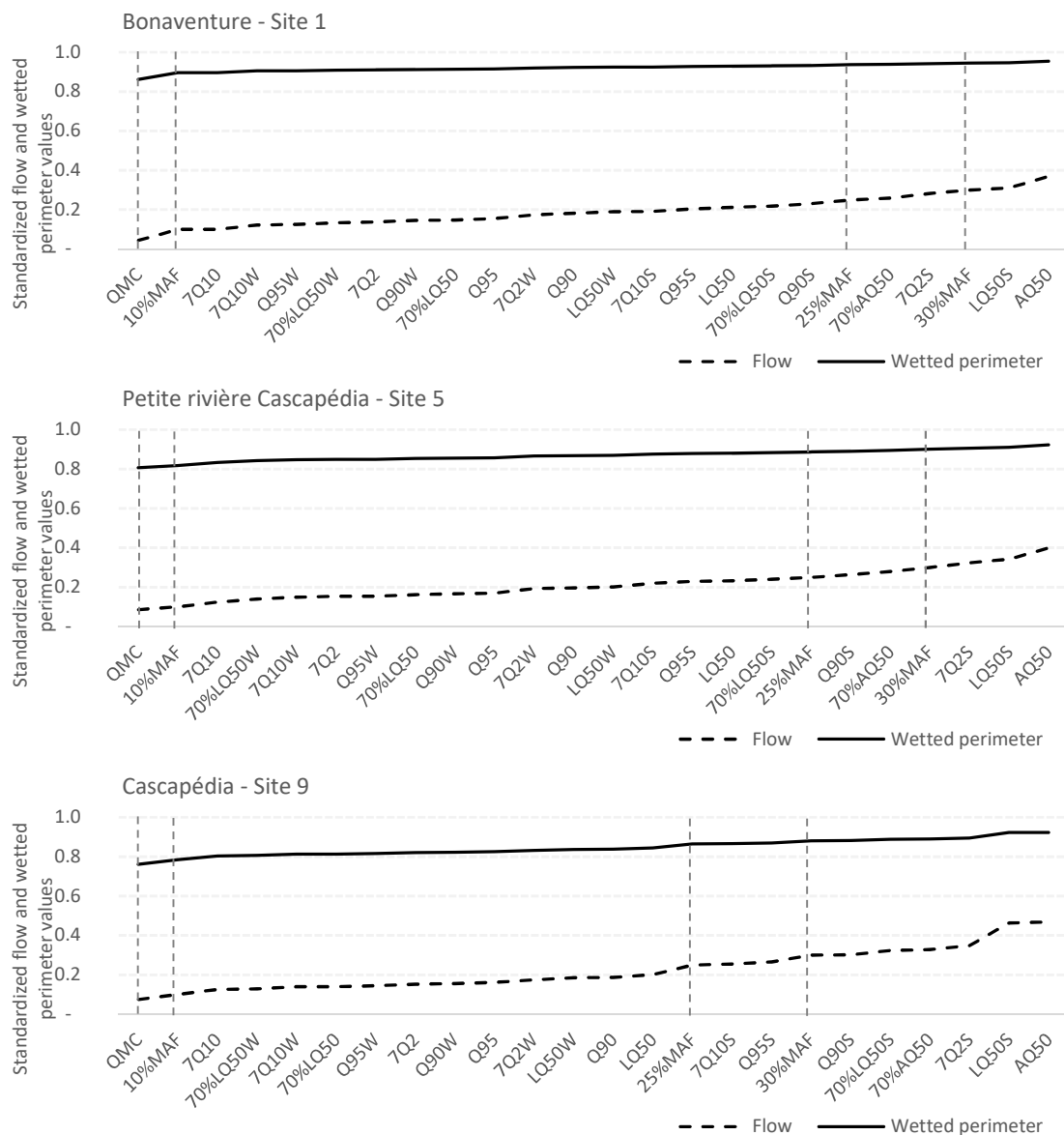
- Mackey, P. C., and P. M. Barlow. 1998. "Relations between discharge and wetted perimeter and other hydraulic-geometry characteristics at selected streamflow-gaging stations in Massachusetts". *Water-Resources Investigation Report* 98-4094.
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques) 2020a. *Modèle d'un rapport d'estimation de débits d'étiage*. Québec : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/debit-etiage/modele-rapport-estim-etiage.pdf>
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques) 2020b. « Rivières (bassins versants) : Les régions hydrographiques ». Direction d'expertise hydrique du MELCC. Accessed 23rd January 2020. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/regionshydro/index.htm#liste>
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques) 2018. *Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. Québec : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques.
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques) 2015. « Lignes directrices pour l'estimation des débits d'étiage sur le territoire québécois » Direction de l'Expertise Hydrique du MELCC, February. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/debit-etiage/methode/index.htm>
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques) 2014. *Tableau des débits d'Étiage aux stations hydrométriques du Québec*. Québec : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques.
- Olden, J. D., and N. L. Poff. 2003. "Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes." *River Research and Applications* 19(2): 101–121. doi: [10.1002/rra.700](https://doi.org/10.1002/rra.700).
- Poff, N. L., J. D. Allan, M. B. Bain, J. R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R. E. Sparks and J. C. Stromberg. 1997. "The natural flow regime: A paradigm for river conservation and restoration." *Biosciences* 47(11): 769-784. 147-186. doi: [10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1).
- Resh, V. H., A. V. Brown, A. P. Covich, M. E. Gurtz, H. W. Li, G. W. Minshall, S. R. Reice, A. L. Sheldon, J. B. Wallace, and R. C. Wissmar. 1988. "Community structure and function in temperate and tropical streams: Proceedings of a symposium." *Journal of the North American Benthological Society* 7(4): 433-455 pp.
- Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell, and D. P. Braun. 1996. "A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems." *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174. doi: [10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x](https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x).
- Shang S. 2007. "A multiple criteria decision-making approach to estimate minimum environmental flows based on wetted perimeter." *River Research and Applications* 24(1): 54-67 pp. doi: 10.1002/rra.1047.

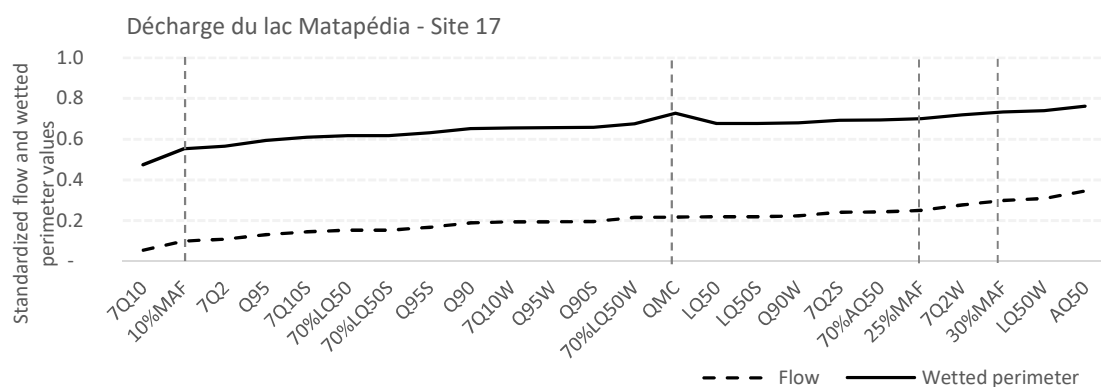
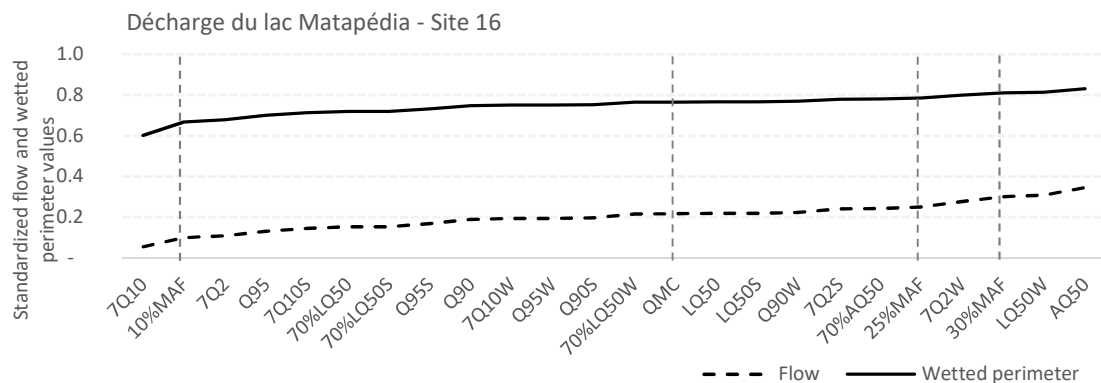
- Stalnaker, C. B., and Arnette, J. L., 1976, "Methodologies for the Determination of Stream Resource Flow Requirements: An Assessment," U.S. Fish and Wildl. Serv., Off. Biol. Serv., Washington, D.C., 199 p.
- Tharme, R. E. 2003. "A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers." *River Research and Applications* 19(5-6): 397-441. doi: [10.1002/rra.736](https://doi.org/10.1002/rra.736).
- Tegos, A., W. Schlüter, N. Gibbons, Y. Katselis, and A. Efstratiadis. 2018. "Assessment of environmental flows from complexity to parsimony – lessons from Lesotho." *Water* 10: 1293. doi:10.3390/w10101293.
- Tennant, D. L. 1976. "Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources." *Fisheries* 1(4): 6-10. doi: [10.1577/1548-8446\(1976\)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1976)001<0006:IFRFFW>2.0.CO;2).
- USFWS (United States Fish and Wildlife Service) 1981. *Interim regional policy for New England streams flow recommendations*. Newton Corner (Massachusetts): Memorandum from H.N. Larsen.
- Zeiringer, B., C. Seliger, F. Greimel, and S. Schmutz. 2018. *River Hydrology, Flow Alteration, and Environmental Flow*. In: Schmutz S., Sendzimir J. (eds) *Riverine Ecosystem Management*. Aquatic Ecology Series, vol 8. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_4

ANNEXE 3

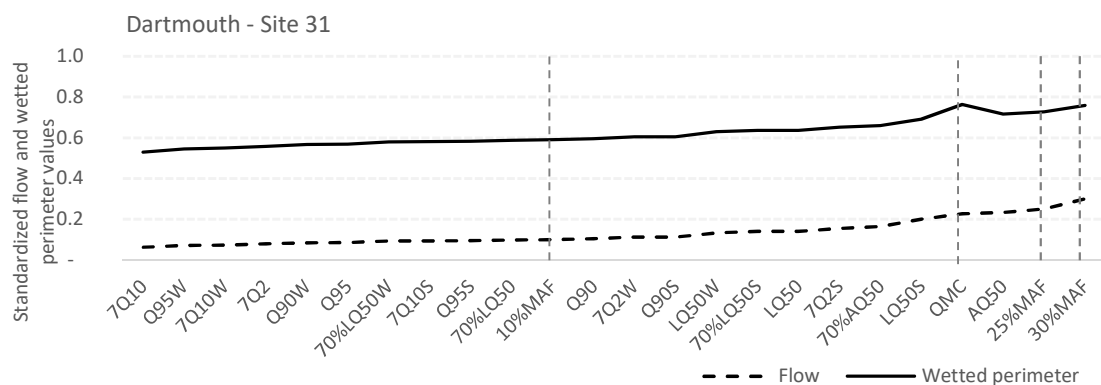
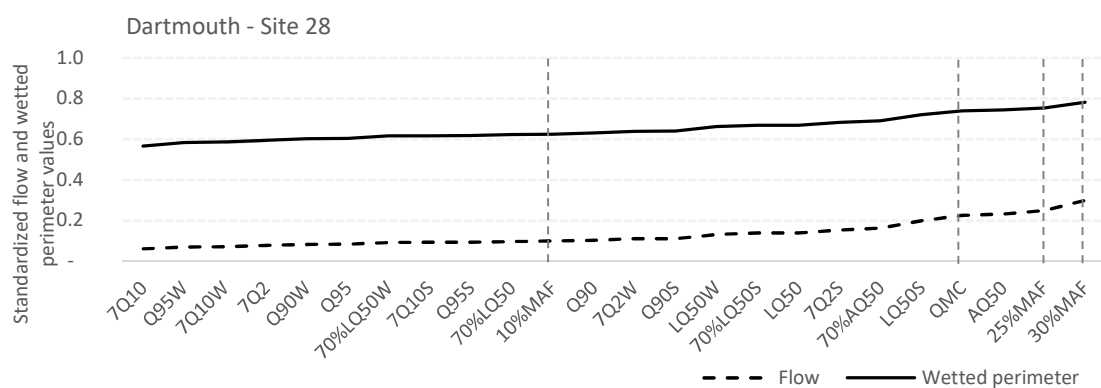
Cette annexe fait suite à la Figure 6 de l'Annexe 2 présentant seulement 5/43 sites étudiés. Les Figures ci-dessous présentent l'évolution des débits (tirets) et des périmètres mouillés (ligne pleine) associés à chaque débit environnemental calculé (24) pour tous les sites de l'étude hydraulique. Les lignes verticales correspondent aux seuils de débits (10%MAF, 25%MAF, 30%MAF) et de périmètre mouillé (QMC). Les valeurs standardisées des débits (%MAF) et des périmètres mouillés (%WPS_{MAF}) sont à la fin.

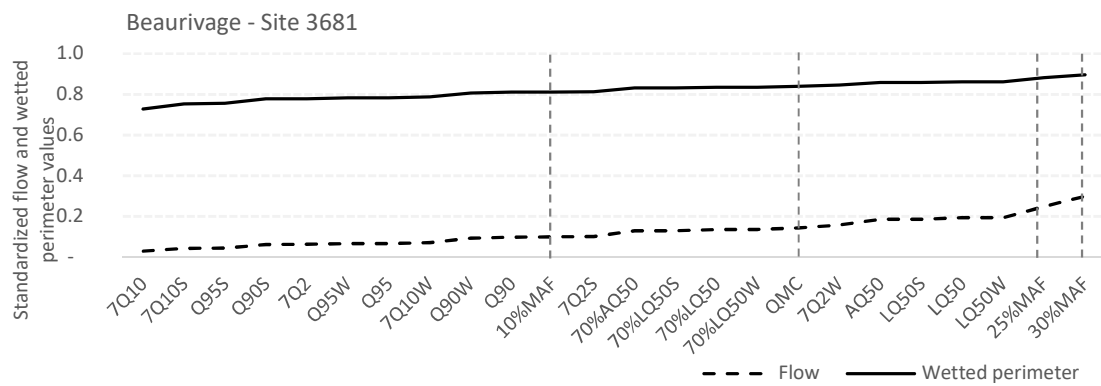
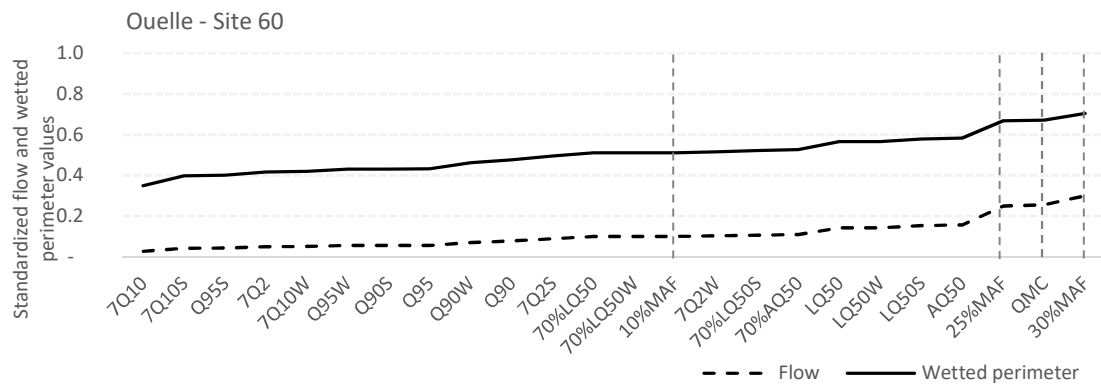
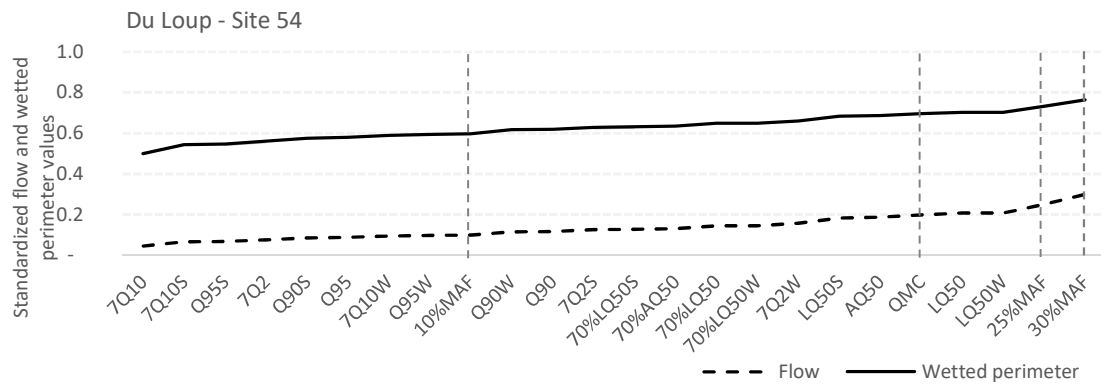
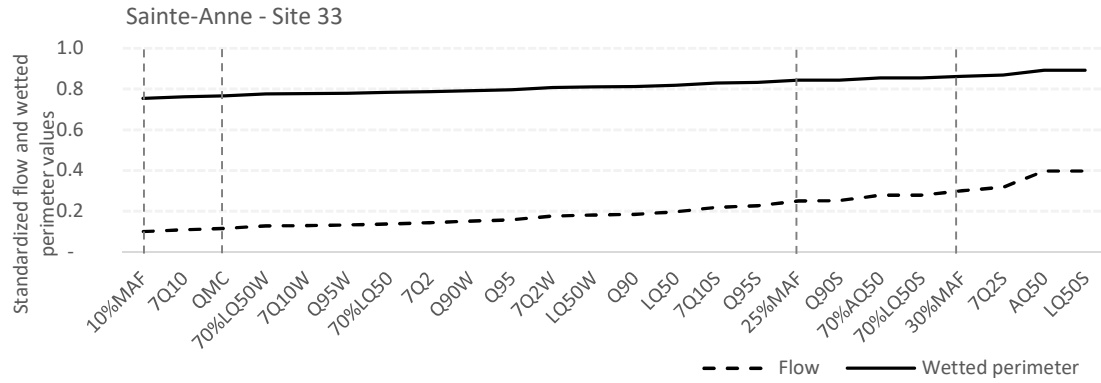
Région hydrographique 01 : Baie des chaleurs et Percé

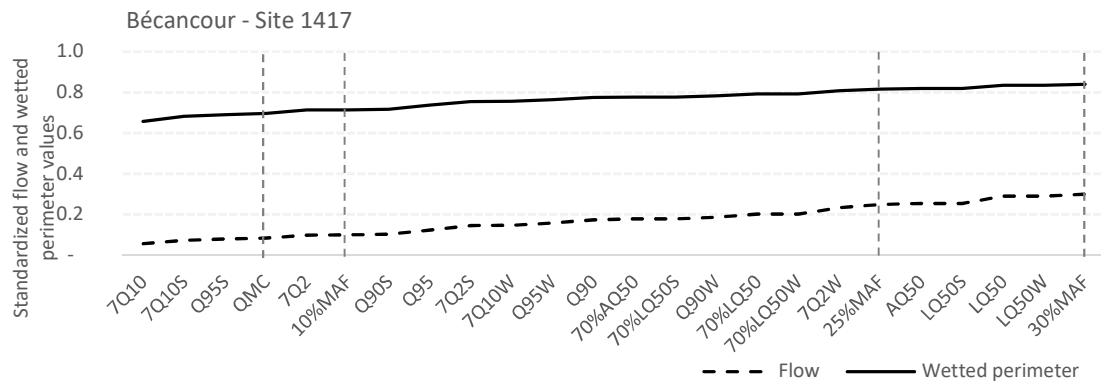
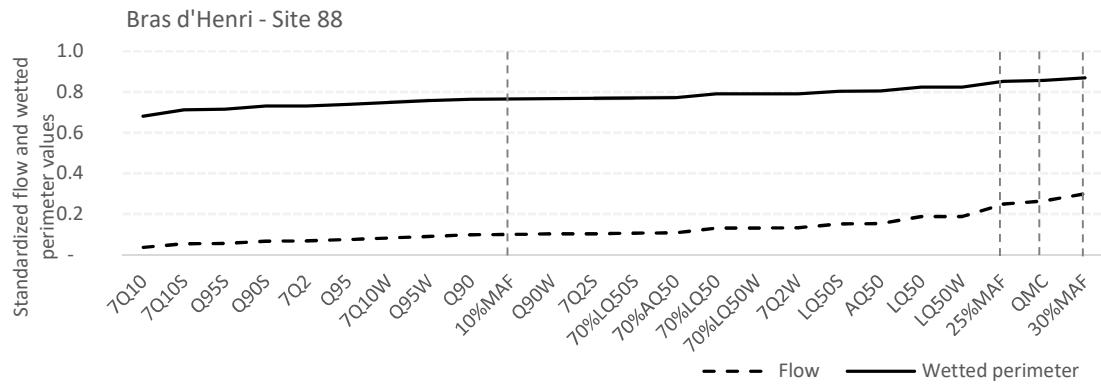
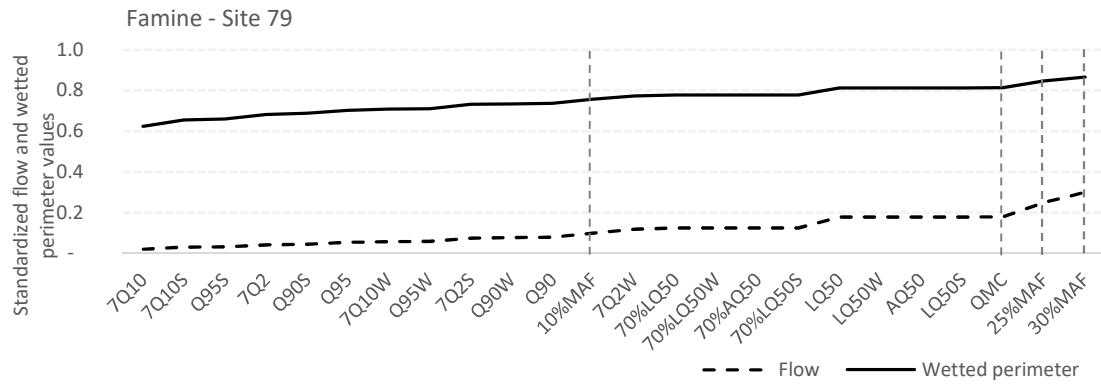
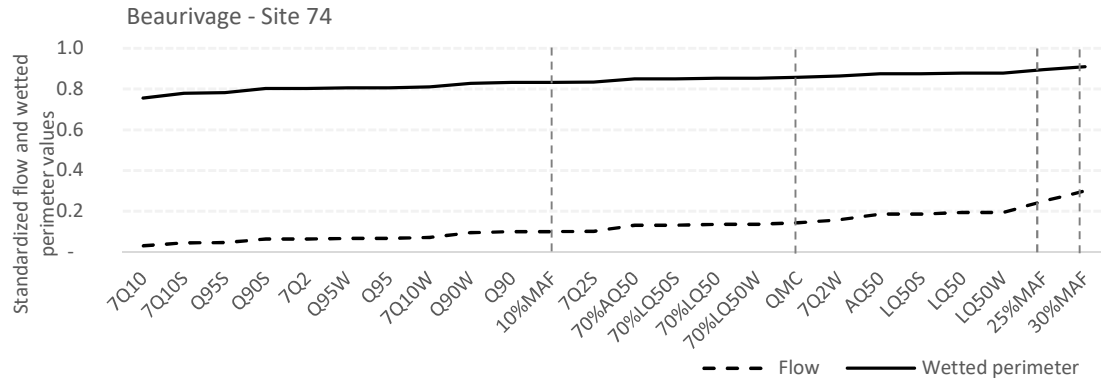




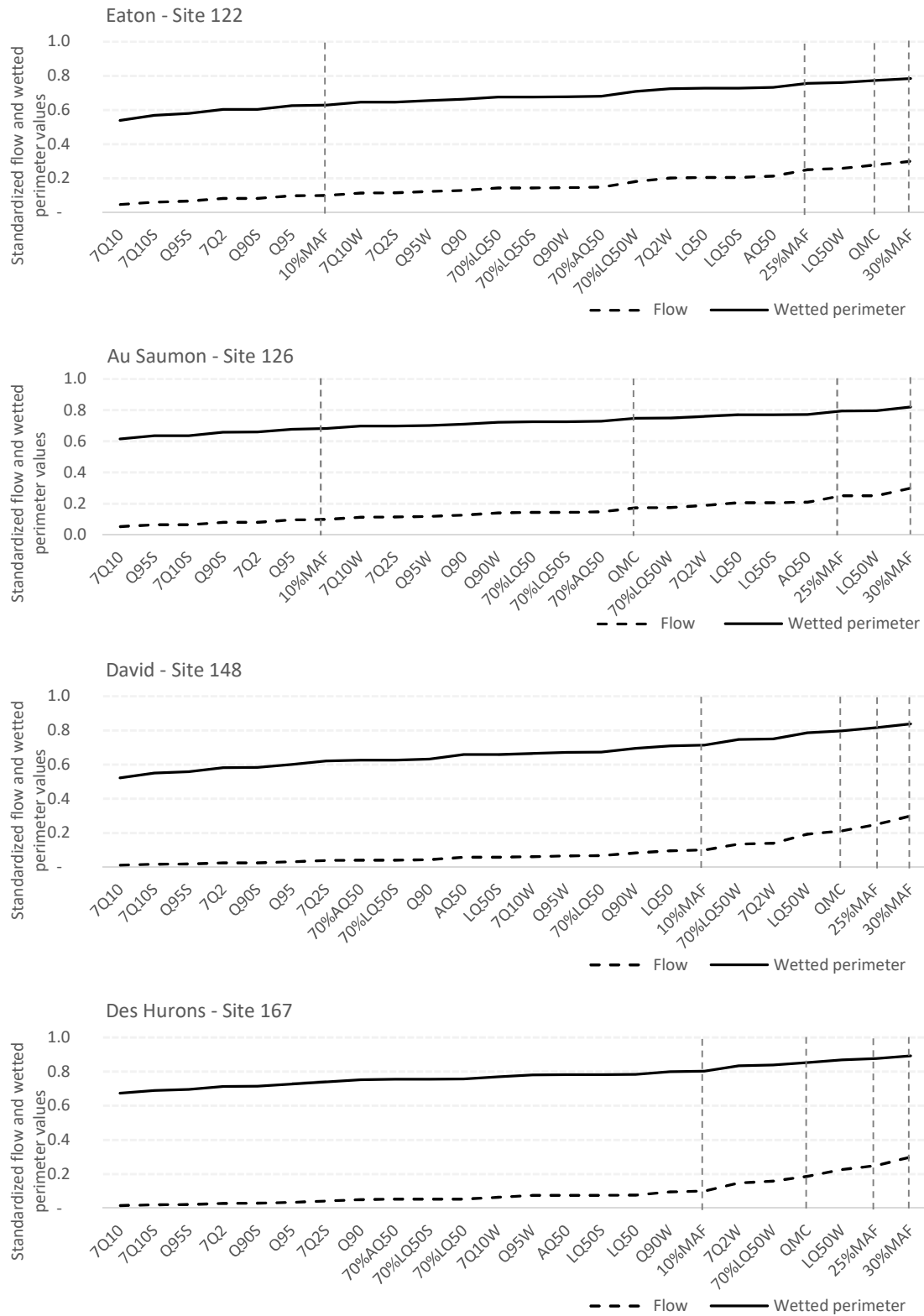
Région hydrographique 02 : Saint-Laurent sud-est

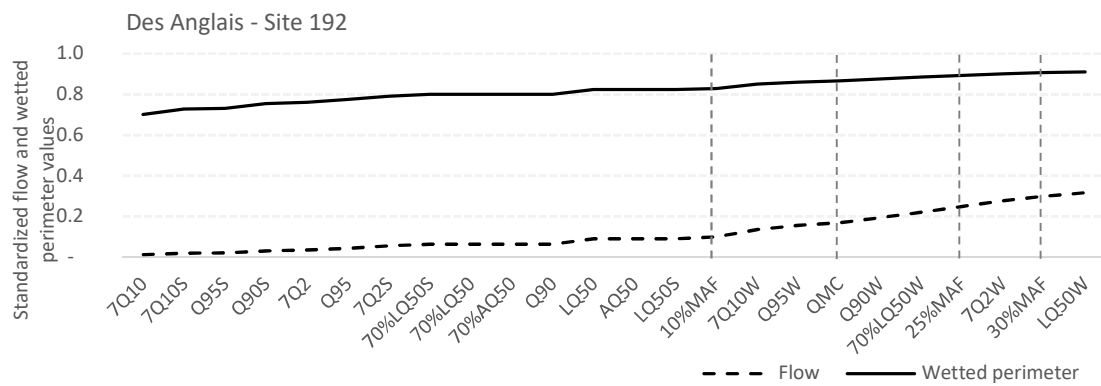
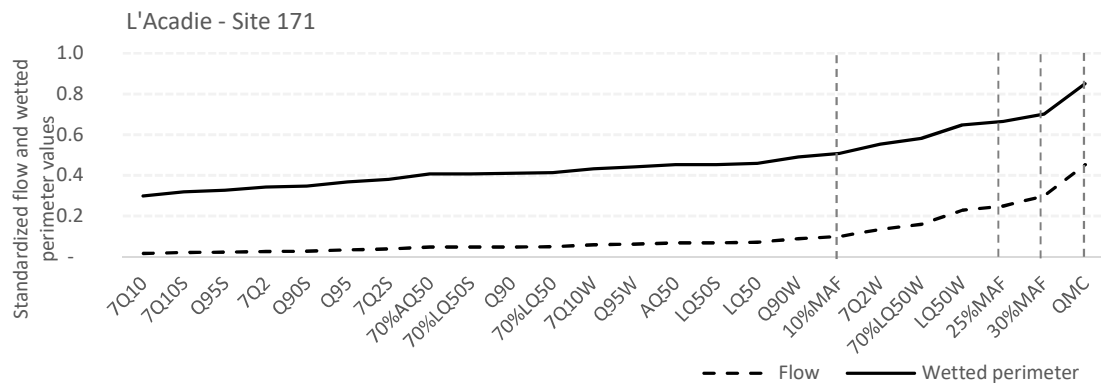
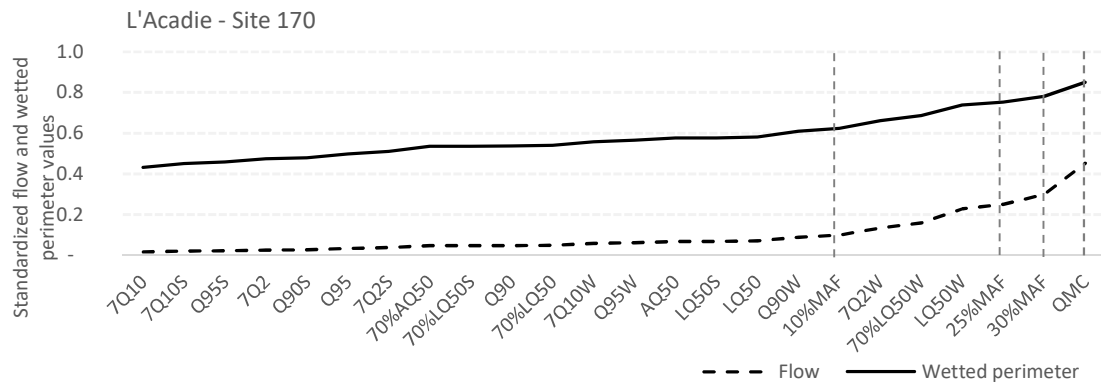
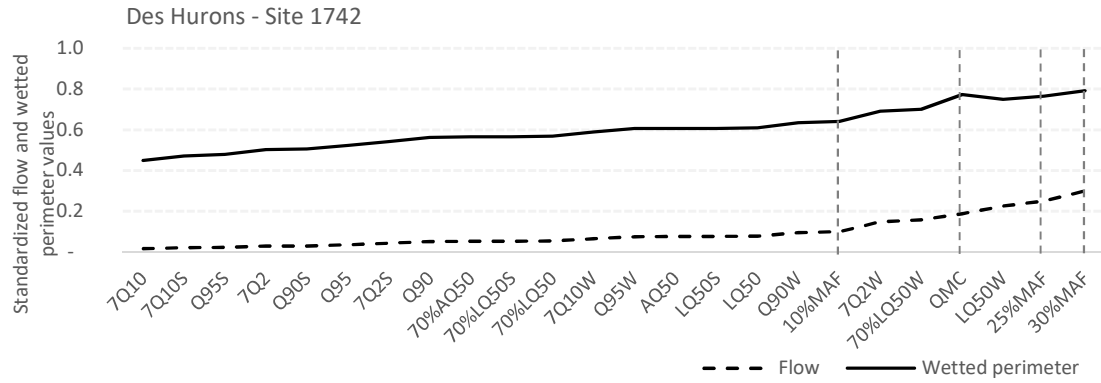


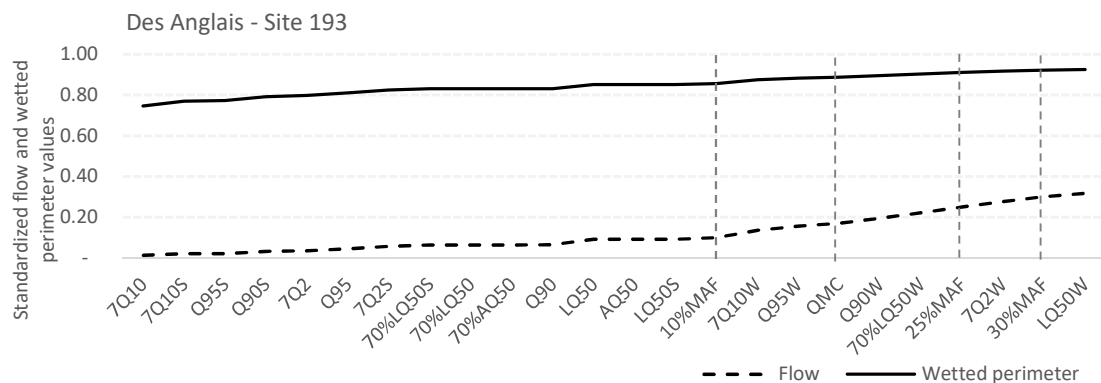




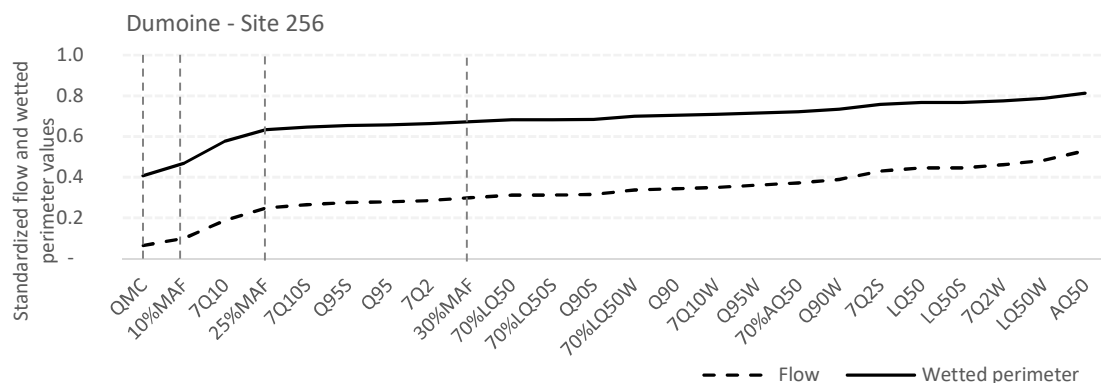
Région hydrographique 03 : Saint-Laurent sud-ouest



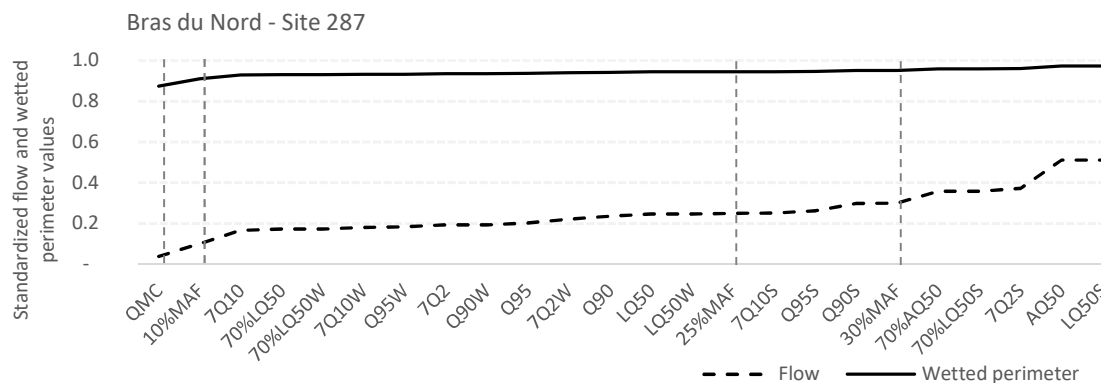
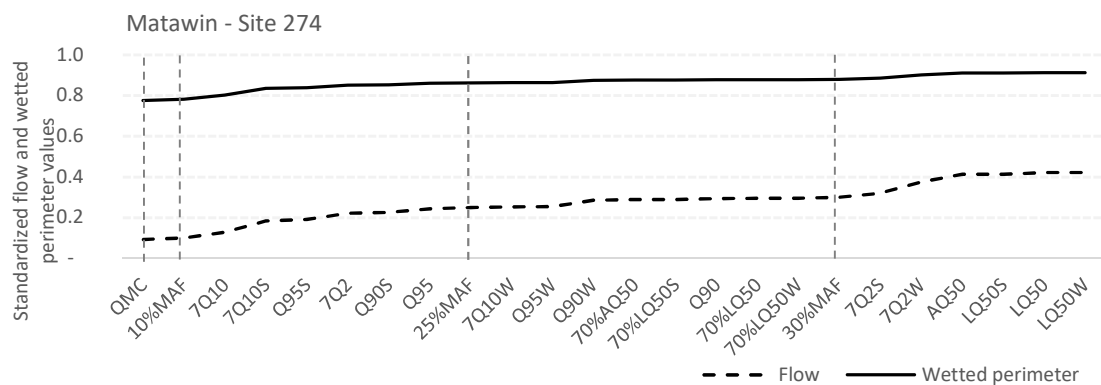


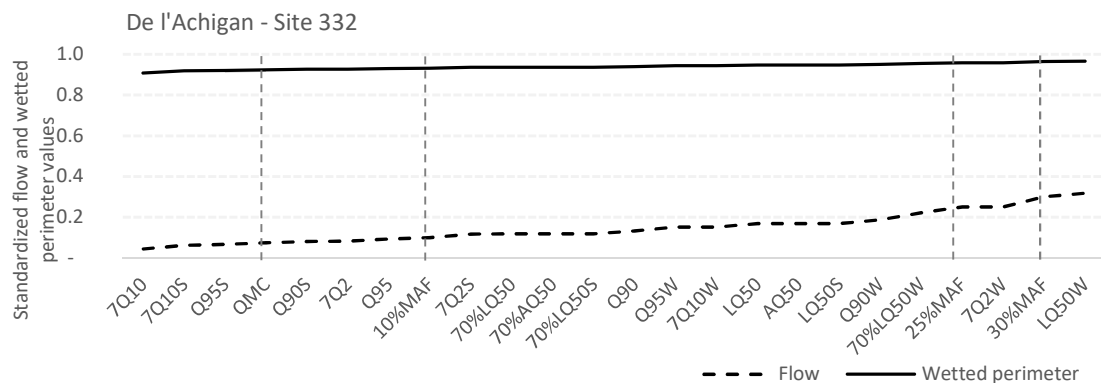


Région hydrographique 04 : Outaouais et Montréal

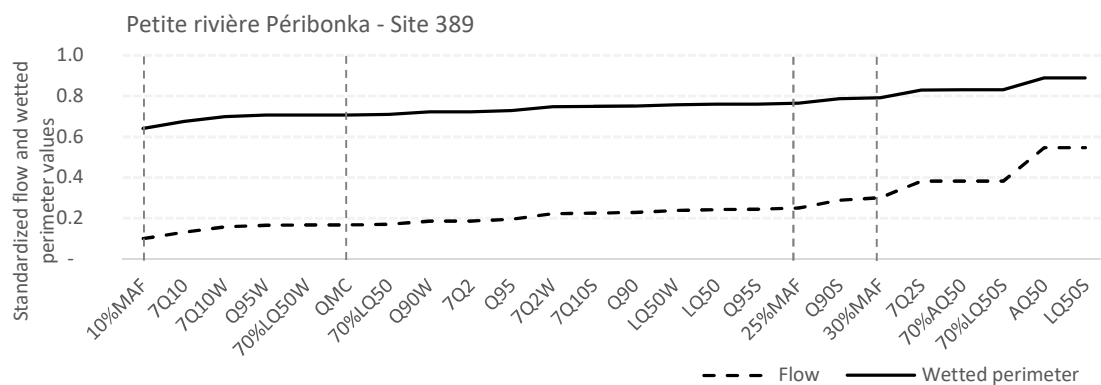
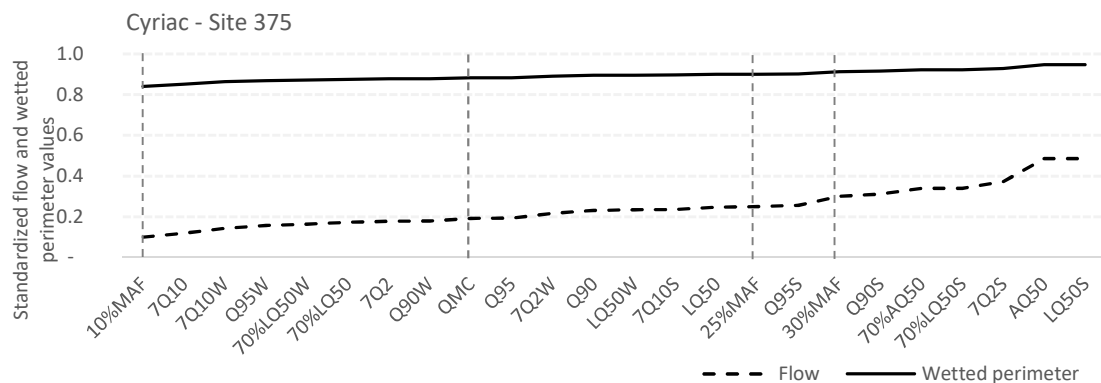
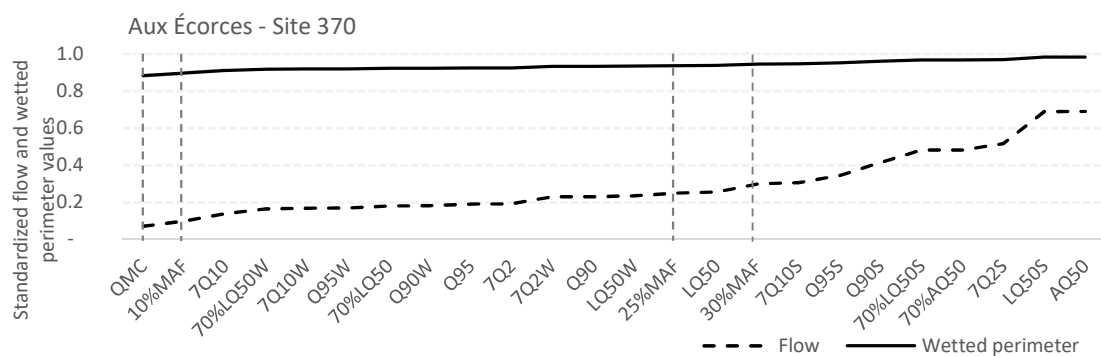


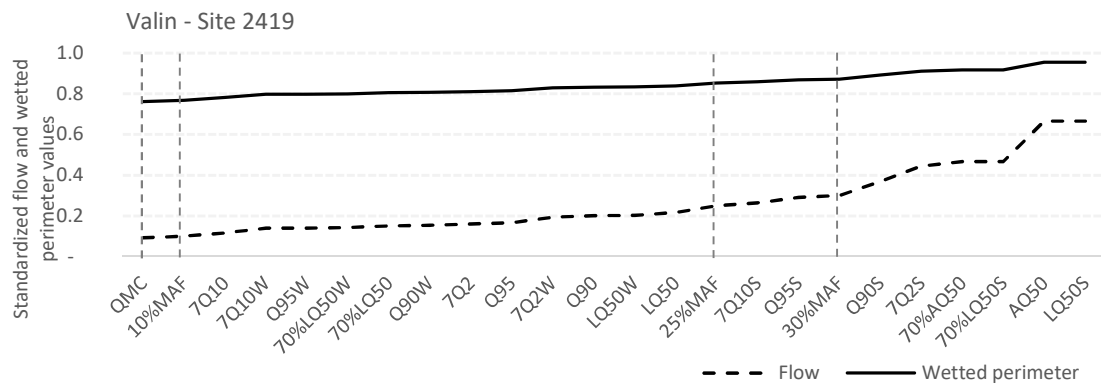
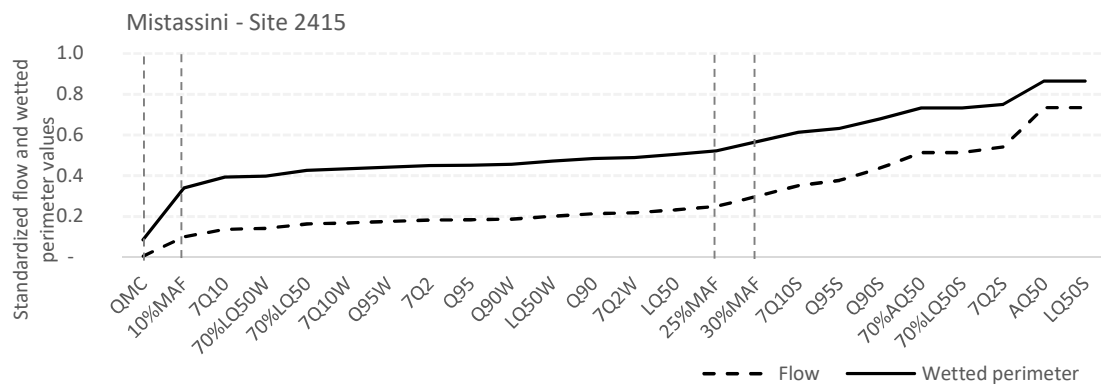
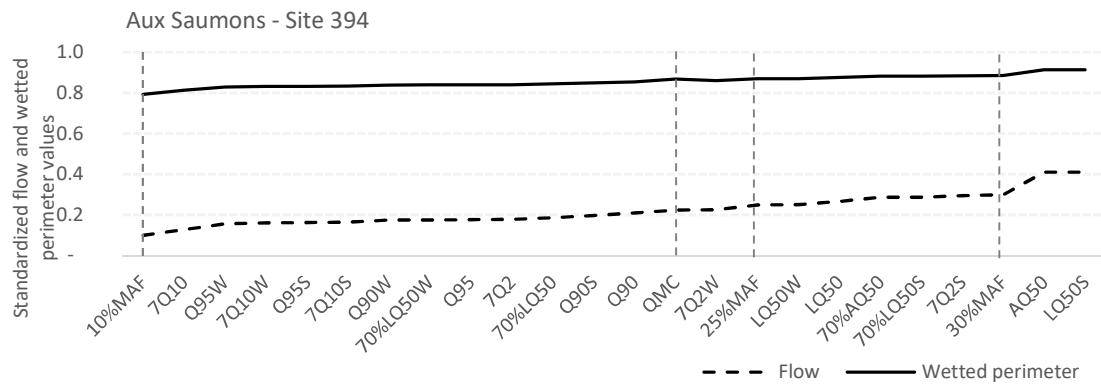
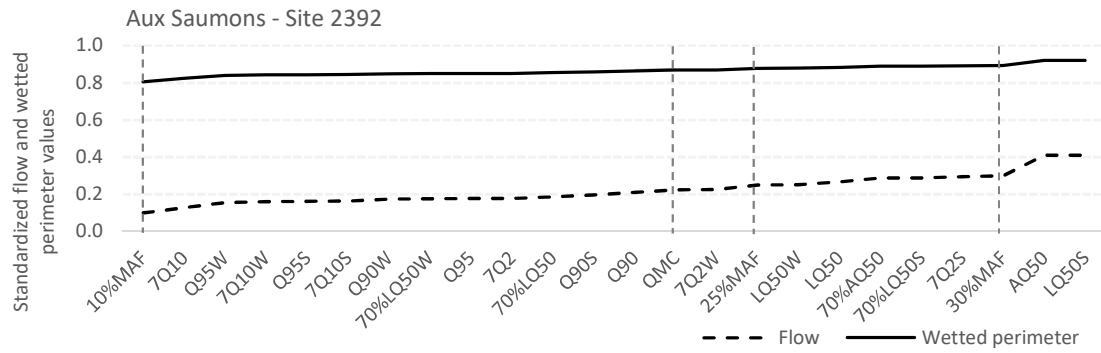
Région hydrographique 05 : Saint-Laurent nord-ouest

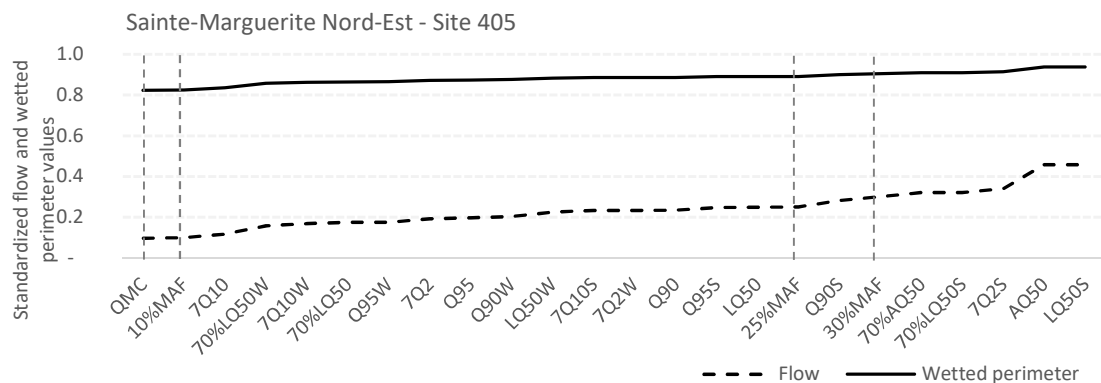




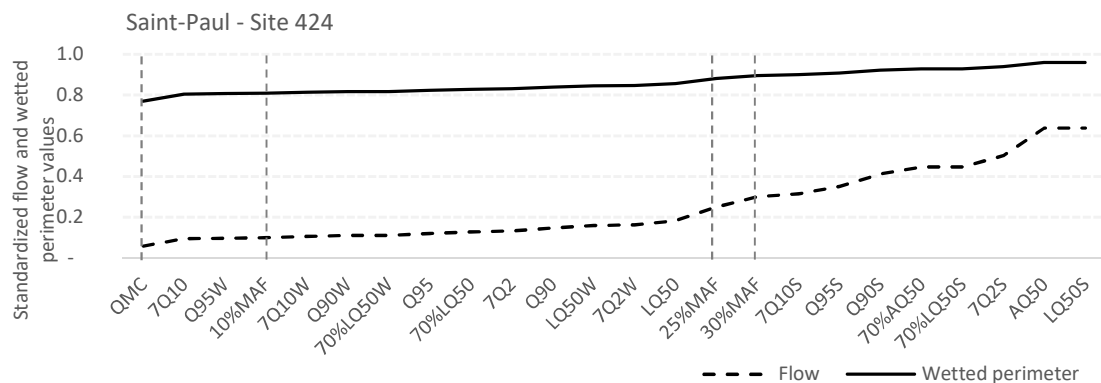
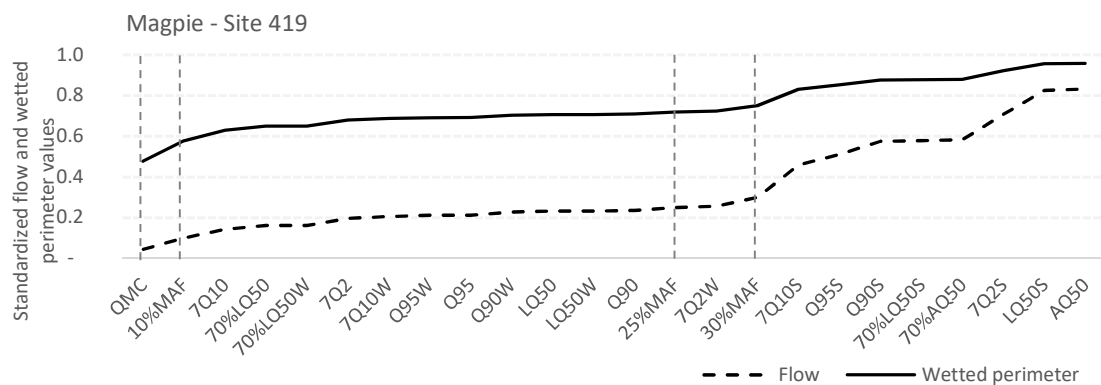
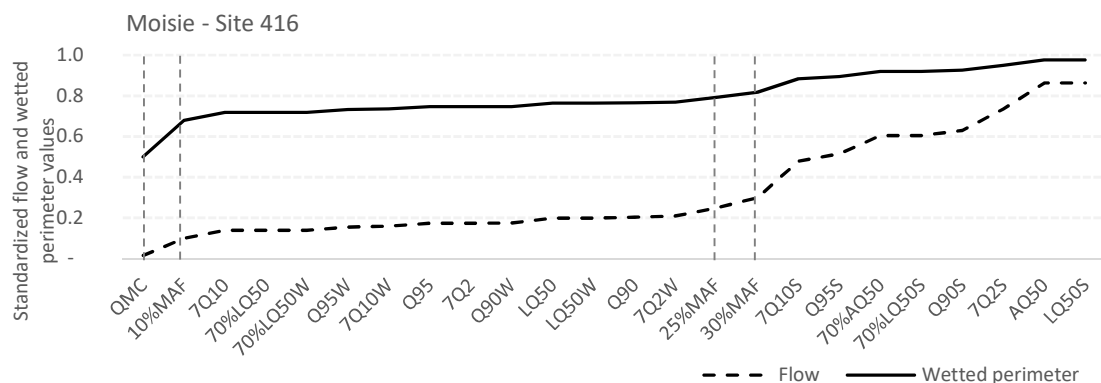
Région hydrographique 06 : Saguenay et lac Saint-Jean







Région hydrographique 07 : Saint-Laurent nord-est



Région hydrographique 08 : Baies de Hannah et de Rupert

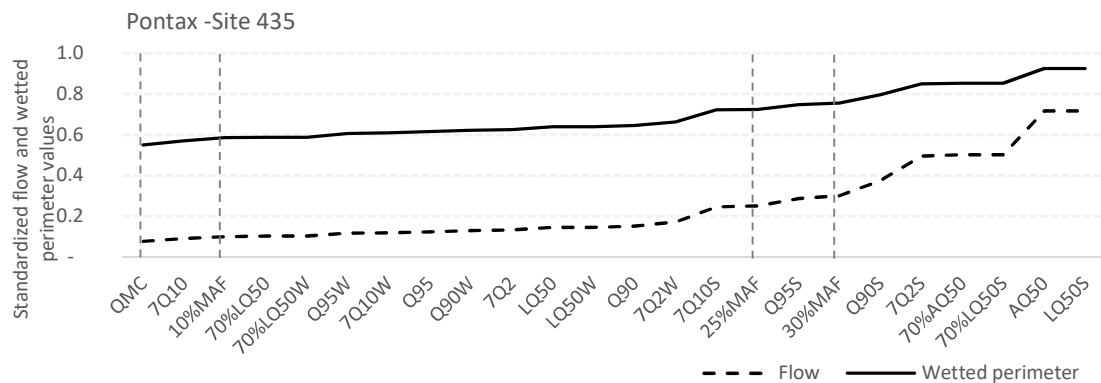
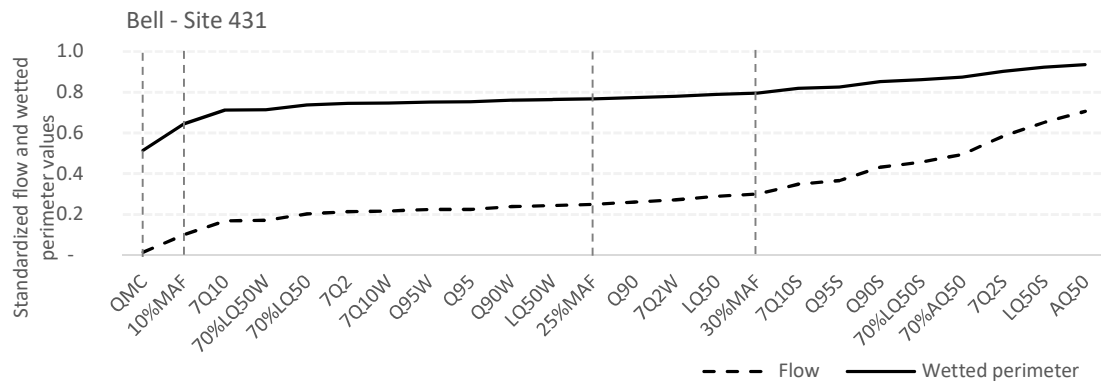
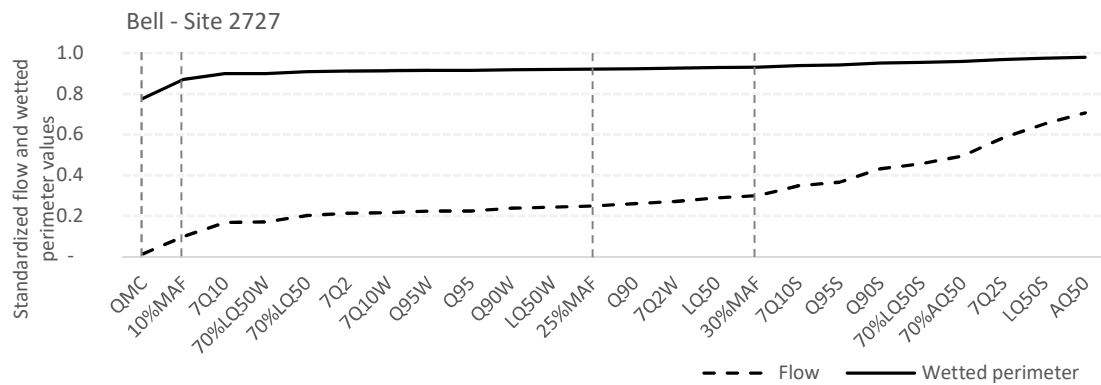
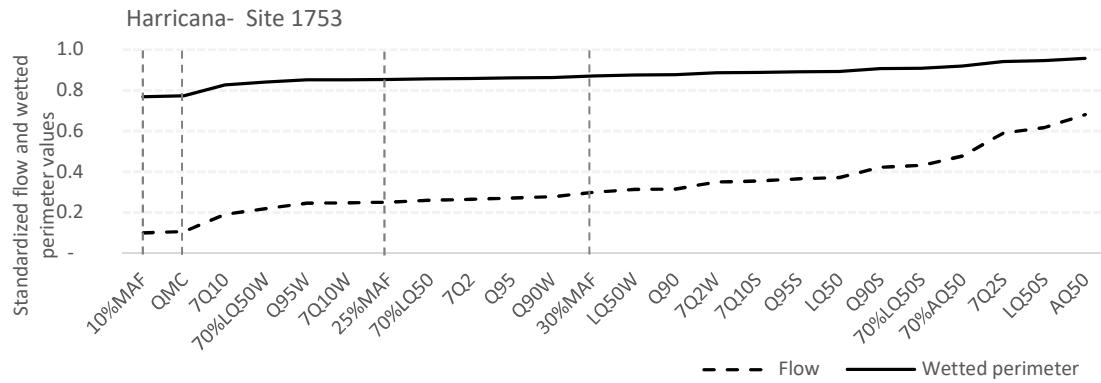


Tableau 1a : Valeurs standardisés des débits (%MAF) pour chaque site étudié. RH : Région hydrographique; QMC : Périmètre mouillé associé à la méthode du maximum de courbure. La même valeur de débit environnemental est utilisée pour deux sites de jaugeages sur une même rivière.

	RH	Rivière – Site de jaugeage	QMC	7Q10	10%MAF	Q95	7Q2	70%LQ50	Q90	LQ50	25%MAF	70%AQ50	30%MAF	AQ50
1	R01	Bonaventure-1	4.4%	10.1%	10%	15.4%	13.8%	14.8%	18.2%	21.1%	25%	25.9%	30%	36.9%
2	R01	Petite rivière Cascapédia-5	8.6%	12.4%	10%	16.9%	15.4%	16.2%	19.6%	23.2%	25%	28.0%	30%	40.0%
3	R01	Cascapédia-9	7.5%	12.6%	10%	16.2%	15.2%	14.0%	18.6%	20.0%	25%	32.8%	30%	46.8%
4	R01	Décharge du lac Matapédia-16	21.7%	5.5%	10%	13.1%	10.8%	15.3%	18.9%	21.9%	25%	24.2%	30%	34.6%
5	R01	Décharge du lac Matapédia-17	29.0%											
6	R02	Dartmouth-28	22.7%	6.2%	10%	8.5%	7.8%	9.8%	10.4%	14.0%	25%	16.3%	30%	23.3%
7	R02	Dartmouth-31	30.8%											
8	R02	Sainte-Anne-33	11.5%	10.9%	10%	15.8%	14.3%	13.8%	18.4%	19.7%	25%	27.8%	30%	39.8%
9	R02	Du Loup-54	19.9%	4.5%	10%	8.8%	7.6%	14.5%	11.7%	20.8%	25%	13.1%	30%	18.7%
10	R02	Ouelle-60	25.5%	2.7%	10%	5.6%	4.9%	9.9%	7.9%	14.2%	25%	11.0%	30%	15.7%
11	R02	Beaurivage-3681	14.4%	3.0%	10%	6.7%	6.3%	13.6%	9.9%	19.4%	25%	13.0%	30%	18.6%
12	R02	Beaurivage-74	14.5%											
13	R02	Famine-79	18.0%	2.0%	10%	5.3%	4.2%	12.4%	7.9%	17.8%	25%	12.5%	30%	17.8%
14	R02	Bras d'Henri-88	26.6%	3.7%	10%	7.5%	6.8%	13.1%	9.8%	18.8%	25%	10.7%	30%	15.3%
15	R02	Bécancour-1417	8.5%	5.7%	10%	12.5%	9.9%	20.3%	17.4%	29.0%	25%	17.8%	30%	25.5%
16	R03	Eaton-122	28.0%	4.7%	10%	9.8%	8.2%	14.4%	13.0%	20.6%	25%	14.9%	30%	21.3%
17	R03	Au Saumon-126	17.3%	5.3%	10%	9.6%	8.1%	14.5%	12.6%	20.7%	25%	14.7%	30%	21.0%
18	R03	David-148	21.2%	1.2%	10%	3.1%	2.5%	6.7%	4.4%	9.5%	25%	4.0%	30%	5.8%
19	R03	Des Hurons-167	18.7%	1.6%	10%	3.5%	2.9%	5.4%	5.1%	7.7%	25%	5.3%	30%	7.5%
20	R03	Des Hurons-1742	26.5%											

21	R03	L'Acadie-170	45.2%	1.7%	10%	3.4%	2.6%	5.0%	4.8%	7.1%	25%	4.8%	30%	6.8%
22	R03	L'Acadie-171	57.8%											
23	R03	Des Anglais-192	16.9%	1.3%	10%	4.4%	3.5%	6.4%	6.4%	9.1%	25%	6.4%	30%	9.1%
24	R03	Des Anglais-193	17.1%											
25	R04	Dumoine-256	6.5%	18.8%	10%	27.9%	28.6%	31.2%	34.3%	44.6%	25%	37.1%	30%	53.1%
26	R05	Matawin-274	9.3%	12.9%	10%	24.4%	22.2%	29.5%	29.4%	42.2%	25%	28.9%	30%	41.3%
27	R05	Bras du Nord-287	3.8%	16.7%	10%	20.3%	19.3%	17.3%	23.6%	24.7%	25%	35.8%	30%	51.1%
28	R05	De l'Achigan-332	7.4%	4.4%	10%	9.3%	8.3%	11.8%	13.2%	16.8%	25%	11.8%	30%	16.8%
29	R06	Aux Écorces-370	7.2%	13.8%	10%	19.1%	19.3%	18.0%	23.1%	25.7%	25%	48.3%	30%	69.0%
30	R06	Cyriac-375	19.2%	12.0%	10%	19.3%	17.8%	17.3%	23.1%	24.7%	25%	34.0%	30%	48.6%
31	R06	Petite rivière Péribonka-389	16.7%	13.1%	10%	19.5%	18.6%	17.0%	22.8%	24.2%	25%	38.2%	30%	54.6%
32	R06	Aux Saumons-2392	22.4%	12.8%	10%	17.8%	17.8%	18.7%	21.0%	26.7%	25%	28.7%	30%	41.1%
33	R06	Aux Saumons-394	24.6%											
34	R06	Mistassini-2415	0.5%	13.7%	10%	18.4%	18.1%	16.3%	21.3%	23.2%	25%	51.4%	30%	73.4%
35	R06	Valin-2419	9.2%	11.6%	10%	16.7%	16.0%	15.2%	20.2%	21.7%	25%	46.6%	30%	66.6%
36	R06	Sainte-Marguerite Nord-Est-405	9.6%	11.6%	10%	19.7%	19.2%	17.4%	23.4%	24.9%	25%	32.0%	30%	45.8%
37	R07	Moisie-416	1.6%	13.9%	10%	17.4%	17.5%	14.0%	20.4%	19.9%	25%	60.4%	30%	86.3%
38	R07	Magpie-419	4.5%	14.3%	10%	21.3%	19.7%	16.3%	23.6%	23.2%	25%	58.3%	30%	83.2%
39	R07	Saint-Paul-424	5.8%	9.4%	10%	12.0%	13.3%	12.8%	14.7%	18.2%	25%	44.6%	30%	63.8%
40	R08	Harricana-1753	10.6%	19.1%	10%	27.2%	26.4%	26.0%	31.6%	37.1%	25%	47.6%	30%	68.1%
41	R08	Bell-2727	1.5%	16.8%	10%	22.5%	21.4%	20.2%	26.0%	28.9%	25%	49.4%	30%	70.6%
42	R08	Bell-431	3.0%											
43	R08	Pontax-435	7.6%	8.9%	10%	12.4%	13.2%	10.2%	15.1%	14.5%	25%	50.2%	30%	71.7%

Tableau 1b : Valeurs standardisés des débits (%MAF) pour chaque site étudié. RH : Région hydrographique. La même valeur de débit environnemental est utilisée pour deux sites de jaugeages sur une même rivière. (SUITE)

	RH	Rivière – Site de jaugeage	7Q10S	Q95S	7Q2S	70%LQ50S	Q90S	LQ50S	7Q10W	Q95W	7Q2W	70%LQ50W	Q90W	LQ50W
1	R01	Bonaventure-1	19.1%	20.4%	28.3%	21.7%	23.0%	31.0%	12.2%	12.5%	17.4%	13.3%	14.6%	19.0%
2	R01	Petite rivière Cascapédia-5	22.0%	22.9%	32.3%	24.0%	26.4%	34.3%	15.0%	15.5%	19.4%	14.0%	16.6%	20.0%
3	R01	Cascapédia-9	25.5%	26.5%	34.9%	32.4%	30.2%	46.3%	14.0%	14.5%	17.4%	12.9%	15.5%	18.5%
4	R01	Décharge du lac Matapédia-16	14.5%	16.8%	24.1%	15.3%	19.6%	21.9%	19.3%	19.4%	27.7%	21.6%	22.3%	30.9%
5	R01	Décharge du lac Matapédia-17												
6	R02	Dartmouth-28	9.4%	9.5%	15.4%	13.9%	11.2%	19.9%	7.3%	7.1%	11.1%	9.3%	8.4%	13.3%
7	R02	Dartmouth-31												
8	R02	Sainte-Anne-33	21.9%	22.7%	31.9%	27.8%	25.2%	39.8%	12.9%	13.2%	17.6%	12.7%	15.1%	18.2%
9	R02	Du Loup-54	6.6%	6.8%	12.7%	12.8%	8.5%	18.4%	9.5%	9.8%	15.7%	14.5%	11.6%	20.8%
10	R02	Ouelle-60	4.2%	4.3%	8.9%	10.7%	5.6%	15.3%	5.1%	5.5%	10.3%	9.9%	7.1%	14.2%
11	R02	Beaurivage-3681	4.4%	4.6%	10.1%	13.0%	6.3%	18.6%	7.2%	6.7%	15.8%	13.6%	9.4%	19.4%
12	R02	Beaurivage-74												
13	R02	Famine-79	3.0%	3.2%	7.5%	12.5%	4.5%	17.8%	5.7%	5.8%	11.8%	12.4%	7.7%	17.8%
14	R02	Bras d'Henri-88	5.4%	5.6%	10.3%	10.6%	6.7%	15.1%	8.3%	9.1%	13.4%	13.1%	10.2%	18.8%
15	R02	Bécancour-1417	7.3%	8.0%	14.6%	17.8%	10.3%	25.5%	14.7%	15.8%	23.4%	20.3%	18.6%	29.0%
16	R03	Eaton-122	6.1%	6.7%	11.5%	14.4%	8.2%	20.6%	11.5%	12.3%	20.2%	18.1%	14.5%	25.8%
17	R03	Au Saumon-126	6.5%	6.5%	11.4%	14.5%	8.0%	20.7%	11.4%	11.7%	18.9%	17.5%	14.0%	25.0%
18	R03	David-148	1.7%	1.9%	3.8%	4.0%	2.5%	5.8%	6.2%	6.6%	14.0%	13.6%	8.3%	19.4%
19	R03	Des Hurons-167	2.0%	2.2%	4.2%	5.3%	2.9%	7.5%	6.5%	7.5%	14.7%	15.8%	9.5%	22.6%
20	R03	Des Hurons-1742												

21	R03	L'Acadie-170	2.1%	2.2%	3.8%	4.8%	2.8%	6.8%	5.9%	6.2%	13.4%	16.0%	8.9%	22.8%
22	R03	L'Acadie-171												
23	R03	Des Anglais-192	2.0%	2.1%	5.7%	6.4%	3.1%	9.1%	13.6%	15.6%	27.7%	22.2%	19.5%	31.7%
24	R03	Des Anglais-193												
25	R04	Dumoine-256	26.6%	27.6%	43.0%	31.2%	31.6%	44.6%	35.1%	36.0%	46.1%	33.8%	38.9%	48.3%
26	R05	Matawin-274	18.4%	19.2%	32.1%	28.9%	22.7%	41.3%	25.3%	25.5%	37.6%	29.5%	28.7%	42.2%
27	R05	Bras du Nord-287	25.1%	26.2%	37.2%	35.8%	29.8%	51.1%	18.1%	18.4%	22.2%	17.3%	19.4%	24.7%
28	R05	De l'Achigan-332	6.2%	6.6%	11.6%	11.8%	8.1%	16.8%	15.2%	15.1%	25.1%	22.2%	18.8%	31.8%
29	R06	Aux Écorces-370	30.7%	34.5%	51.7%	48.2%	41.6%	68.9%	16.8%	17.1%	23.0%	16.4%	18.2%	23.5%
30	R06	Cyriac-375	23.7%	25.6%	37.3%	34.0%	31.2%	48.6%	14.4%	15.7%	21.7%	16.4%	17.9%	23.4%
31	R06	Petite rivière Péribonka-389	22.6%	24.4%	38.2%	38.2%	28.9%	54.6%	15.8%	16.6%	22.2%	16.7%	18.6%	23.8%
32	R06	Aux Saumons-2392	16.4%	16.3%	29.6%	28.7%	19.7%	41.1%	16.1%	15.6%	22.5%	17.6%	17.5%	25.2%
33	R06	Aux Saumons-394												
34	R06	Mistassini-2415	35.2%	37.7%	54.2%	51.4%	43.8%	73.4%	16.9%	17.6%	21.8%	14.1%	18.7%	20.1%
35	R06	Valin-2419	26.4%	29.1%	44.5%	46.6%	36.9%	66.6%	14.0%	14.0%	19.4%	14.2%	15.3%	20.4%
36	R06	Sainte-Marguerite Nord-Est-405	23.3%	24.6%	34.0%	32.0%	28.2%	45.8%	16.9%	17.5%	23.3%	15.7%	20.4%	22.5%
37	R07	Moisie-416	47.8%	51.6%	73.5%	60.4%	63.0%	86.3%	16.0%	15.6%	20.9%	14.0%	17.5%	19.9%
38	R07	Magpie-419	45.9%	51.0%	70.8%	57.8%	57.5%	82.6%	20.7%	21.2%	25.6%	16.3%	22.8%	23.2%
39	R07	Saint-Paul-424	31.5%	35.1%	50.2%	44.6%	41.3%	63.8%	10.6%	9.6%	16.2%	11.1%	11.1%	15.9%
40	R08	Harricana-1753	35.4%	36.5%	59.0%	43.1%	42.2%	61.6%	24.8%	24.6%	34.9%	22.0%	27.7%	31.4%
41	R08	Bell-2727	34.9%	36.5%	58.4%	45.7%	43.2%	65.3%	21.7%	22.4%	27.2%	17.1%	23.8%	24.4%
42	R08	Bell-431												
43	R08	Pontax-435	24.6%	28.7%	49.5%	50.2%	37.5%	71.7%	11.8%	11.7%	17.1%	10.2%	13.0%	14.5%

Tableau 2a : Valeurs standardisés des périmètres mouillés (%WPS_{MAF}) pour chaque site étudié. RH : Région hydrographique; QMC : Périmètre mouillé associé à la méthode du maximum de courbure.

	RH	Rivière – Site de jaugeage	QMC	7Q10	10%MAF	Q95	7Q2	70%LQ50	Q90	LQ50	25%MAF	70%AQ50	30%MAF	AQ50
1	R01	Bonaventure-1	86.1%	89.6%	89.6%	91.5%	91.0%	91.3%	92.2%	92.8%	93.6%	93.7%	94.4%	95.3%
2	R01	Petite rivière Cascapédia-5	80.7%	83.3%	81.8%	85.6%	84.9%	85.3%	86.7%	88.0%	88.6%	89.5%	90.0%	92.3%
3	R01	Cascapédia-9	76.0%	80.4%	78.4%	82.5%	82.0%	81.3%	83.7%	84.4%	86.4%	88.9%	88.1%	92.3%
4	R01	Décharge du lac Matapédia-16	76.5%	60.1%	66.8%	70.0%	67.7%	71.9%	74.7%	76.6%	78.4%	78.0%	81.0%	83.0%
5	R01	Décharge du lac Matapédia-17	72.7%	47.4%	55.3%	59.3%	56.4%	61.7%	65.1%	67.6%	70.0%	69.4%	73.3%	76.1%
6	R02	Dartmouth-28	73.9%	56.7%	62.5%	60.4%	59.5%	62.2%	63.0%	66.9%	75.3%	69.1%	78.2%	74.3%
7	R02	Dartmouth-31	76.3%	52.8%	58.9%	56.7%	55.7%	58.6%	59.4%	63.6%	72.7%	66.0%	75.8%	71.6%
8	R02	Sainte-Anne-33	76.6%	76.1%	75.3%	79.6%	78.7%	78.3%	81.1%	81.8%	84.3%	85.4%	86.2%	89.2%
9	R02	Du Loup-54	69.6%	49.9%	59.6%	57.9%	56.0%	64.8%	61.8%	70.2%	73.2%	63.4%	76.3%	68.6%
10	R02	Ouelle-60	67.1%	34.8%	51.1%	43.2%	41.6%	51.0%	47.6%	56.6%	66.7%	52.5%	70.4%	58.3%
11	R02	Beaurivage-3681	83.8%	72.7%	81.1%	78.2%	77.8%	83.4%	81.0%	86.1%	88.2%	83.1%	89.6%	85.8%
12	R02	Beaurivage-74	85.7%	75.6%	83.2%	80.6%	80.2%	85.2%	83.1%	87.7%	89.5%	85.0%	90.8%	87.4%
13	R02	Famine-79	81.3%	62.4%	75.7%	70.1%	68.2%	77.7%	73.6%	81.1%	84.6%	77.7%	86.4%	81.2%
14	R02	Bras d'Henri-88	85.7%	68.0%	76.5%	73.9%	73.1%	78.9%	76.3%	82.3%	85.1%	77.1%	86.9%	80.4%
15	R02	Bécancour-1417	69.7%	65.6%	71.4%	73.7%	71.3%	79.2%	77.4%	83.4%	81.6%	77.7%	83.8%	81.8%
16	R03	Eaton-122	77.3%	53.8%	62.8%	62.6%	60.3%	67.6%	66.2%	72.6%	75.5%	68.0%	78.4%	73.1%
17	R03	Au Saumon-126	74.7%	61.4%	68.2%	67.7%	65.9%	72.5%	70.9%	77.0%	79.4%	72.8%	81.9%	77.2%
18	R03	David-148	79.7%	52.2%	71.4%	60.0%	58.2%	67.3%	63.2%	70.9%	81.6%	62.5%	83.8%	65.8%
19	R03	Des Hurons-167	85.2%	67.3%	80.2%	72.6%	71.2%	75.6%	75.2%	78.3%	87.6%	75.5%	89.1%	78.1%
20	R03	Des Hurons-1742	77.3%	44.8%	64.0%	52.3%	50.2%	56.8%	56.1%	60.9%	76.4%	56.5%	79.2%	60.6%

21	R03	L'Acadie-170	84.9%	43.1%	62.3%	49.7%	47.4%	54.0%	53.7%	58.1%	75.2%	53.5%	78.1%	57.6%
22	R03	L'Acadie-171	85.1%	29.8%	50.6%	36.7%	34.2%	41.3%	40.9%	45.9%	66.4%	40.7%	70.1%	45.2%
23	R03	Des Anglais-192	86.5%	70.0%	82.9%	77.5%	76.1%	79.9%	79.9%	82.3%	89.3%	79.9%	90.6%	82.3%
24	R03	Des Anglais-193	88.8%	74.5%	85.6%	81.0%	79.8%	83.1%	83.1%	85.1%	91.1%	83.1%	92.2%	85.1%
25	R04	Dumoine-256	40.6%	57.7%	46.8%	65.6%	66.2%	68.2%	70.3%	76.7%	63.3%	72.2%	67.3%	81.2%
26	R05	Matawin-274	77.5%	80.3%	78.1%	85.9%	85.1%	87.7%	87.7%	91.1%	86.2%	87.5%	87.9%	91.0%
27	R05	Bras du Nord-287	87.4%	92.9%	90.9%	93.6%	93.4%	93.0%	94.2%	94.4%	94.4%	95.8%	95.1%	97.3%
28	R05	De l'Achigan-332	92.3%	90.8%	93.1%	92.9%	92.6%	93.6%	93.9%	94.7%	95.8%	93.6%	96.4%	94.7%
29	R06	Aux Écorces-370	88.1%	90.9%	89.5%	92.4%	92.4%	92.1%	93.2%	93.7%	93.6%	96.6%	94.4%	98.2%
30	R06	Cyriac-375	88.2%	85.1%	83.9%	88.2%	87.7%	87.5%	89.4%	89.9%	90.0%	92.1%	91.2%	94.6%
31	R06	Petite rivière Péribonka-389	70.7%	67.4%	64.0%	72.8%	72.2%	70.9%	75.1%	76.0%	76.4%	83.0%	79.2%	88.9%
32	R06	Aux Saumons-2392	86.9%	82.4%	80.5%	85.0%	85.0%	85.4%	86.4%	88.3%	87.8%	88.9%	89.3%	92.0%
33	R06	Aux Saumons-394	86.7%	81.2%	79.2%	83.9%	83.9%	84.3%	85.4%	87.5%	86.9%	88.1%	88.5%	91.4%
34	R06	Mistassini-2415	8.5%	39.4%	33.9%	45.1%	44.9%	42.6%	48.4%	50.4%	52.1%	73.2%	56.8%	86.5%
35	R06	Valin-2419	76.0%	78.1%	76.7%	81.4%	81.0%	80.5%	83.2%	83.8%	85.2%	91.6%	87.1%	95.4%
36	R06	Sainte-Marguerite Nord-Est-405	82.2%	83.5%	82.5%	87.3%	87.1%	86.4%	88.6%	89.0%	89.1%	90.9%	90.4%	93.7%
37	R07	Moisie-416	49.9%	71.8%	67.9%	74.5%	74.6%	71.8%	76.5%	76.3%	79.2%	91.9%	81.7%	97.6%
38	R07	Magpie-419	47.7%	62.9%	57.8%	69.2%	67.9%	64.9%	70.9%	70.6%	71.9%	87.9%	75.1%	95.7%
39	R07	Saint-Paul-424	76.9%	80.4%	80.9%	82.2%	83.0%	82.7%	83.8%	85.5%	88.0%	92.8%	89.5%	95.9%
40	R08	Harricana-1753	77.2%	82.7%	76.7%	86.1%	85.8%	85.6%	87.6%	89.2%	85.3%	91.8%	87.1%	95.7%
41	R08	Bell-2727	77.6%	89.8%	87.1%	91.4%	91.1%	90.8%	92.2%	92.8%	92.0%	95.8%	93.0%	97.9%
42	R08	Bell-431	51.3%	71.2%	64.4%	75.2%	74.5%	73.7%	77.3%	78.9%	76.8%	87.4%	79.5%	93.6%
43	R08	Pontax-435	54.9%	57.0%	58.5%	61.4%	62.4%	58.7%	64.4%	63.8%	72.4%	85.2%	75.5%	92.5%

Tableau 2b : Valeurs standardisés des périmètres mouillés (%WPS_{MAF}) pour chaque site étudié. RH : Région hydrographique (SUITE)

	RH	Rivière – Site de jaugeage	7Q10S	Q95S	7Q2S	70%LQ50S	Q90S	LQ50S	7Q10W	Q95W	7Q2W	70%LQ50W	Q90W	LQ50W
1	R01	Bonaventure-1	92.4%	92.7%	94.1%	93.0%	93.2%	94.6%	90.4%	90.5%	92.0%	90.8%	91.2%	92.4%
2	R01	Petite rivière Cascapédia-5	87.6%	87.9%	90.6%	88.3%	89.0%	91.1%	84.7%	84.9%	86.6%	84.2%	85.5%	86.9%
3	R01	Cascapédia-9	86.6%	86.9%	89.5%	88.8%	88.1%	92.2%	81.3%	81.5%	83.2%	80.6%	82.2%	83.7%
4	R01	Décharge du lac Matapédia-16	71.3%	73.1%	77.9%	71.9%	75.1%	76.6%	75.0%	75.0%	79.8%	76.4%	76.9%	81.4%
5	R01	Décharge du lac Matapédia-17	60.8%	63.2%	69.3%	61.7%	65.7%	67.6%	65.5%	65.6%	71.8%	67.4%	68.0%	73.9%
6	R02	Dartmouth-28	61.7%	61.8%	68.3%	66.9%	63.9%	71.9%	58.6%	58.3%	63.9%	61.6%	60.2%	66.2%
7	R02	Dartmouth-31	58.1%	58.2%	65.1%	63.6%	60.5%	69.0%	54.8%	54.5%	60.4%	57.9%	56.6%	62.9%
8	R02	Sainte-Anne-33	82.9%	83.3%	86.8%	85.4%	84.4%	89.2%	77.7%	77.9%	80.7%	77.5%	79.2%	81.0%
9	R02	Du Loup-54	54.3%	54.6%	62.8%	63.1%	57.5%	68.3%	58.8%	59.4%	66.0%	64.8%	61.6%	70.2%
10	R02	Ouelle-60	39.8%	40.0%	49.4%	52.1%	43.1%	57.8%	42.0%	43.0%	51.5%	51.0%	46.2%	56.6%
11	R02	Beaurivage-3681	75.3%	75.5%	81.2%	83.1%	77.7%	85.8%	78.7%	78.2%	84.5%	83.4%	80.7%	86.1%
12	R02	Beaurivage-74	77.9%	78.1%	83.3%	85.0%	80.1%	87.4%	81.0%	80.5%	86.3%	85.2%	82.8%	87.7%
13	R02	Famine-79	65.5%	66.0%	73.1%	77.7%	68.7%	81.2%	70.7%	70.9%	77.2%	77.7%	73.4%	81.1%
14	R02	Bras d'Henri-88	71.1%	71.4%	76.7%	77.0%	73.0%	80.2%	74.8%	75.6%	79.1%	78.9%	76.7%	82.3%
15	R02	Bécancour-1417	68.1%	69.0%	75.4%	77.7%	71.7%	81.8%	75.5%	76.3%	80.8%	79.2%	78.2%	83.4%
16	R03	Eaton-122	56.8%	57.9%	64.6%	67.6%	60.3%	72.6%	64.5%	65.5%	72.4%	70.8%	67.7%	76.1%
17	R03	Au Saumon-126	63.6%	63.5%	69.8%	72.5%	65.7%	77.0%	69.7%	70.1%	75.9%	74.9%	72.1%	79.5%
18	R03	David-148	55.0%	55.7%	62.0%	62.5%	58.4%	65.8%	66.4%	67.1%	75.0%	74.6%	69.4%	78.6%
19	R03	Des Hurons-167	68.9%	69.4%	73.9%	75.5%	71.4%	78.1%	77.0%	78.0%	83.3%	83.8%	79.9%	86.7%
20	R03	Des Hurons-1742	47.0%	47.8%	54.1%	56.5%	50.5%	60.6%	58.8%	60.5%	69.0%	69.9%	63.4%	74.9%

21	R03	L'Acadie-170	45.1%	45.8%	51.0%	53.5%	47.8%	57.6%	55.8%	56.5%	66.1%	68.6%	60.9%	73.8%
22	R03	L'Acadie-171	31.8%	32.6%	38.0%	40.7%	34.7%	45.2%	43.2%	44.0%	55.2%	58.2%	49.0%	64.6%
23	R03	Des Anglais-192	72.7%	73.1%	79.1%	79.9%	75.4%	82.3%	85.0%	85.9%	90.1%	88.4%	87.5%	91.0%
24	R03	Des Anglais-193	76.9%	77.2%	82.4%	83.1%	79.2%	85.1%	87.4%	88.2%	91.7%	90.3%	89.6%	92.5%
25	R04	Dumoine-256	64.6%	65.4%	75.7%	68.2%	68.4%	76.7%	70.8%	71.4%	77.5%	70.0%	73.3%	78.7%
26	R05	Matawin-274	83.4%	83.7%	88.5%	87.5%	85.3%	91.0%	86.3%	86.4%	90.0%	87.7%	87.5%	91.1%
27	R05	Bras du Nord-287	94.4%	94.6%	96.0%	95.8%	95.1%	97.3%	93.2%	93.2%	94.0%	93.0%	93.4%	94.4%
28	R05	De l'Achigan-332	91.8%	92.0%	93.6%	93.6%	92.6%	94.7%	94.4%	94.3%	95.8%	95.5%	95.0%	96.5%
29	R06	Aux Écorces-370	94.5%	95.0%	96.9%	96.6%	95.9%	98.2%	91.8%	91.9%	93.2%	91.7%	92.1%	93.3%
30	R06	Cyriac-375	89.6%	90.1%	92.8%	92.1%	91.5%	94.6%	86.3%	86.8%	89.0%	87.1%	87.7%	89.5%
31	R06	Petite rivière Péribonka-389	74.9%	76.0%	83.0%	83.0%	78.6%	88.9%	69.9%	70.6%	74.7%	70.6%	72.1%	75.7%
32	R06	Aux Saumons-2392	84.4%	84.3%	89.2%	88.9%	85.8%	92.0%	84.2%	84.0%	86.9%	84.9%	84.9%	87.8%
33	R06	Aux Saumons-394	83.2%	83.2%	88.4%	88.1%	84.8%	91.4%	83.1%	82.8%	86.0%	83.8%	83.8%	86.9%
34	R06	Mistassini-2415	61.3%	63.2%	75.0%	73.2%	67.9%	86.5%	43.3%	44.2%	48.9%	39.8%	45.5%	47.1%
35	R06	Valin-2419	85.8%	86.8%	91.1%	91.6%	89.2%	95.4%	79.7%	79.7%	82.8%	79.9%	80.6%	83.3%
36	R06	Sainte-Marguerite Nord-Est-405	88.5%	88.9%	91.4%	90.9%	90.0%	93.7%	86.2%	86.4%	88.5%	85.7%	87.5%	88.3%
37	R07	Moisie-416	88.3%	89.5%	95.0%	91.9%	92.5%	97.6%	73.5%	73.1%	76.9%	71.8%	74.6%	76.3%
38	R07	Magpie-419	83.1%	85.2%	92.1%	87.8%	87.6%	95.5%	68.7%	69.1%	72.3%	64.9%	70.3%	70.6%
39	R07	Saint-Paul-424	89.9%	90.8%	93.8%	92.8%	92.2%	95.9%	81.3%	80.6%	84.6%	81.7%	81.6%	84.4%
40	R08	Harricana-1753	88.7%	89.1%	94.1%	90.8%	90.5%	94.6%	85.2%	85.1%	88.6%	84.0%	86.3%	87.5%
41	R08	Bell-2727	93.9%	94.1%	96.8%	95.4%	95.1%	97.5%	91.2%	91.4%	92.5%	89.9%	91.7%	91.9%
42	R08	Bell-431	81.8%	82.5%	90.2%	86.1%	85.2%	92.2%	74.7%	75.2%	78.0%	71.4%	76.0%	76.4%
43	R08	Pontax-435	72.1%	74.8%	84.9%	85.2%	79.6%	92.5%	60.8%	60.6%	66.3%	58.7%	62.2%	63.8%

ANNEXE 4

Cette annexe présente l'évolution des valeurs de débits environnementaux et de leurs valeurs de température d'eau associées pour 53 sites répartis dans les huit régions hydrographiques.

Abréviations :

ΔWT : Différence entre les valeurs de température de l'eau maximale et minimale

ΔEF : Différence entre les valeurs de débit environnemental maximale et minimale

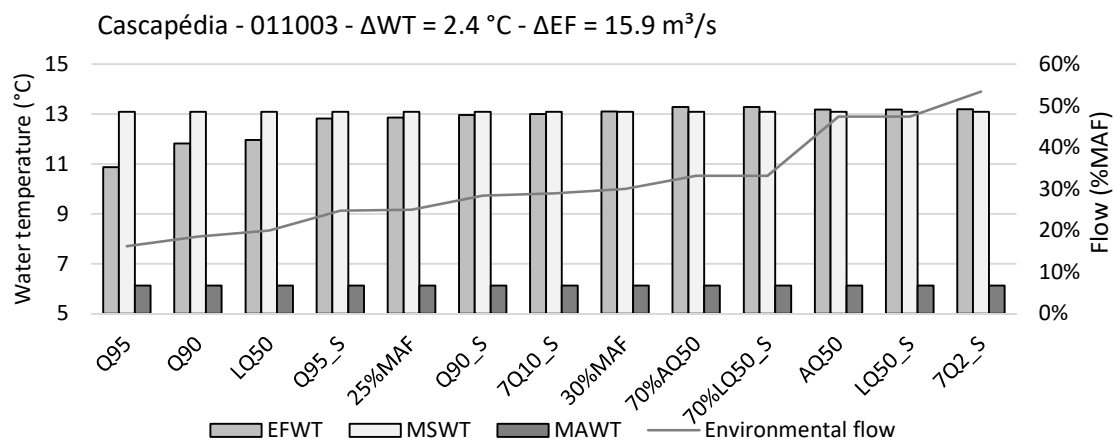
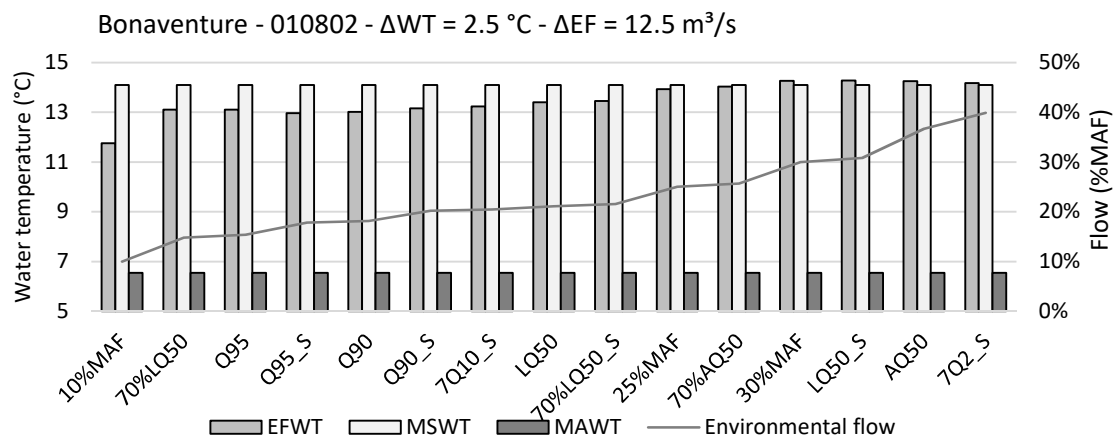
$EFWT$: Température de l'eau associée à la valeur du débit environnemental

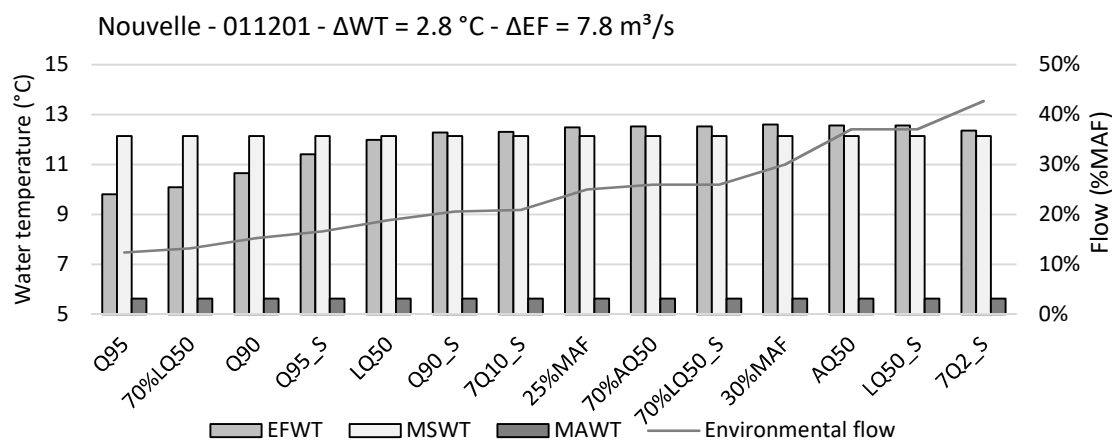
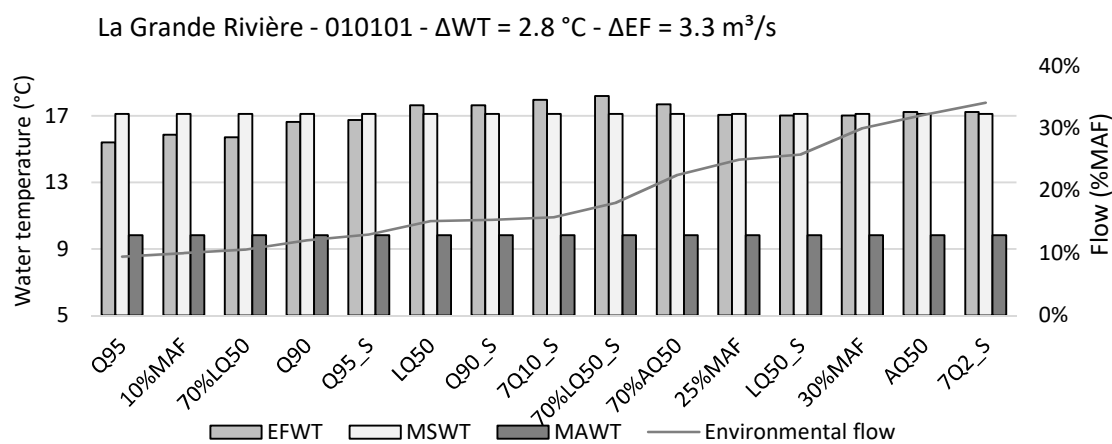
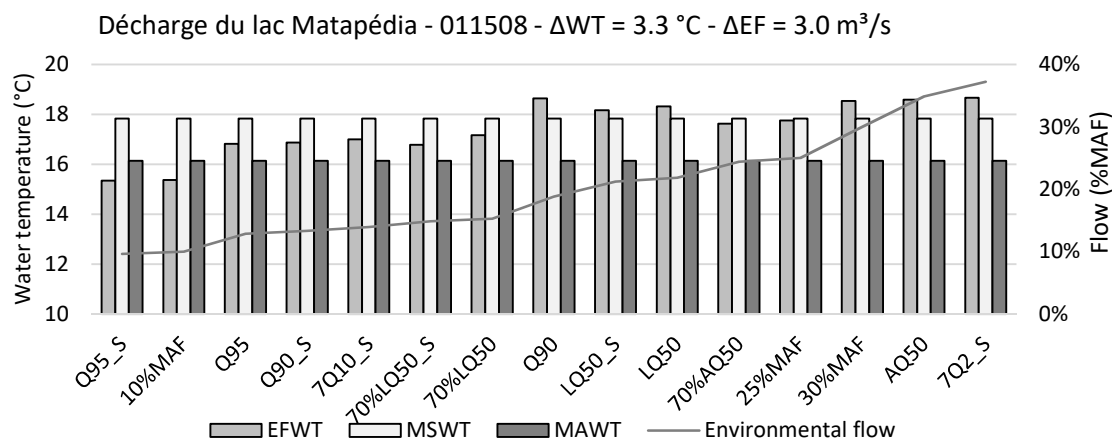
$MSWT$: Température de l'eau moyenne estivale

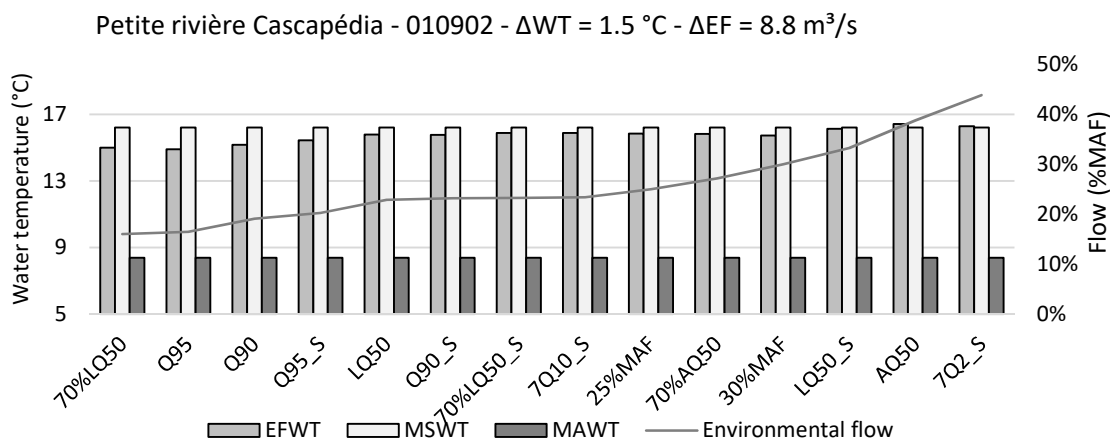
$MAWT$: Température de l'eau moyenne annuelle

MAF : Débit moyen annuel

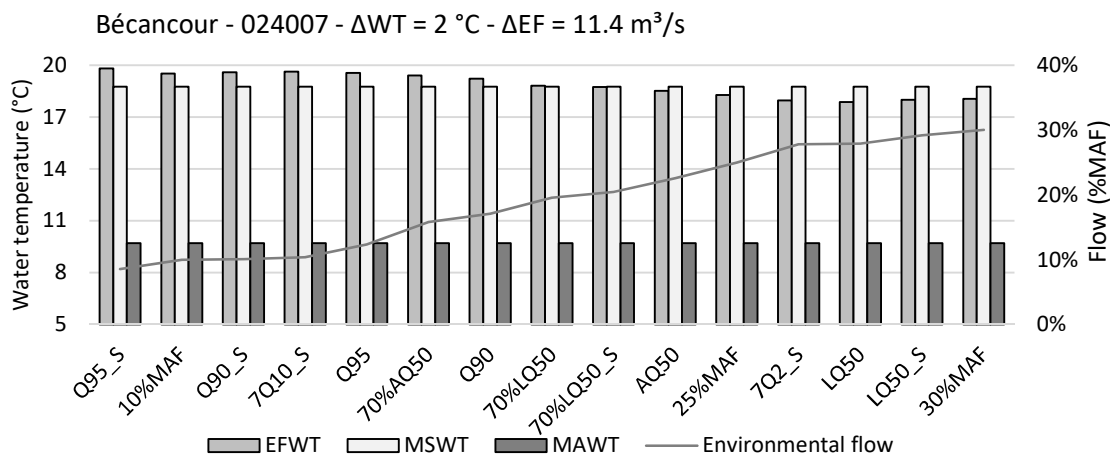
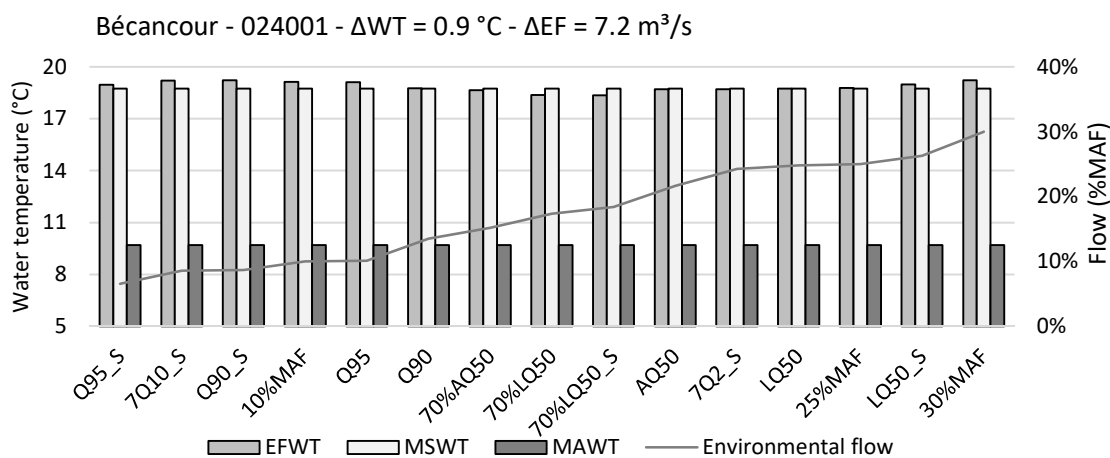
Région hydrographique 01 : Baie des chaleurs et Percé

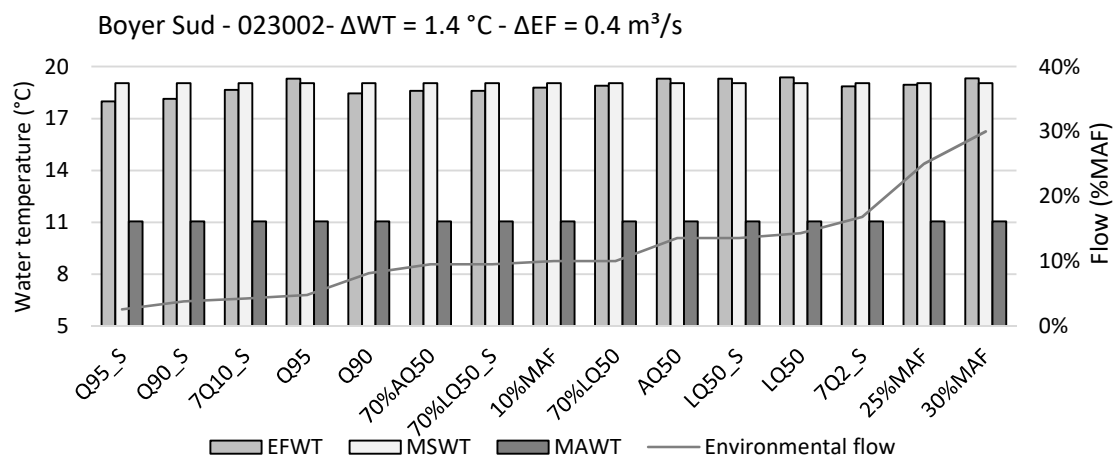
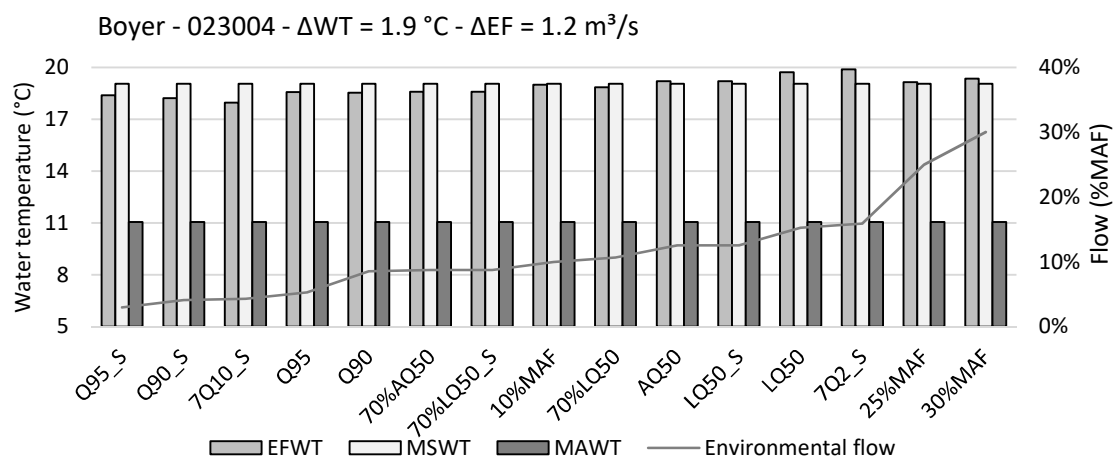
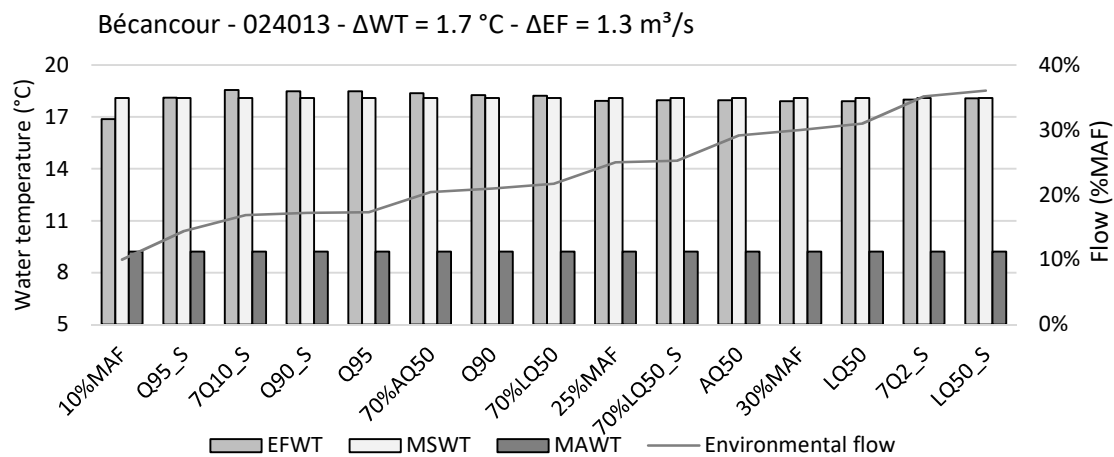


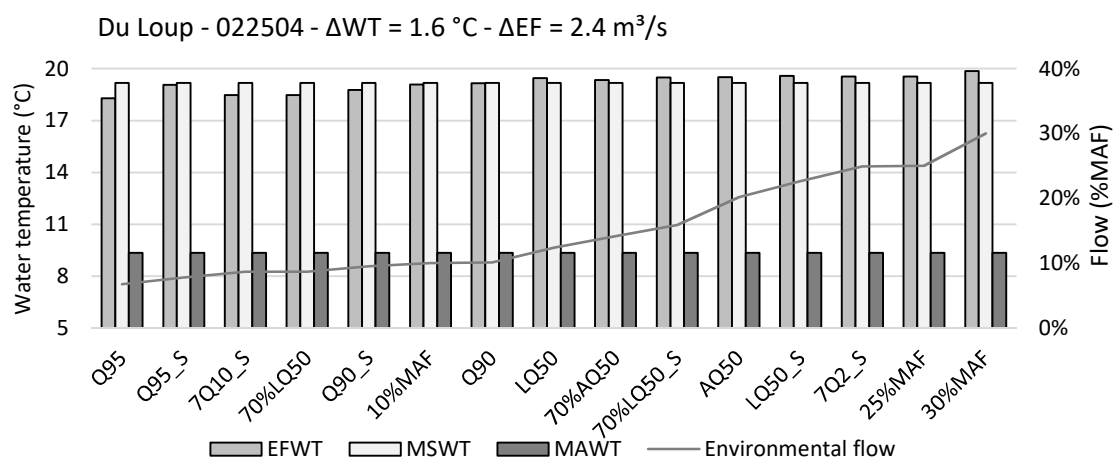
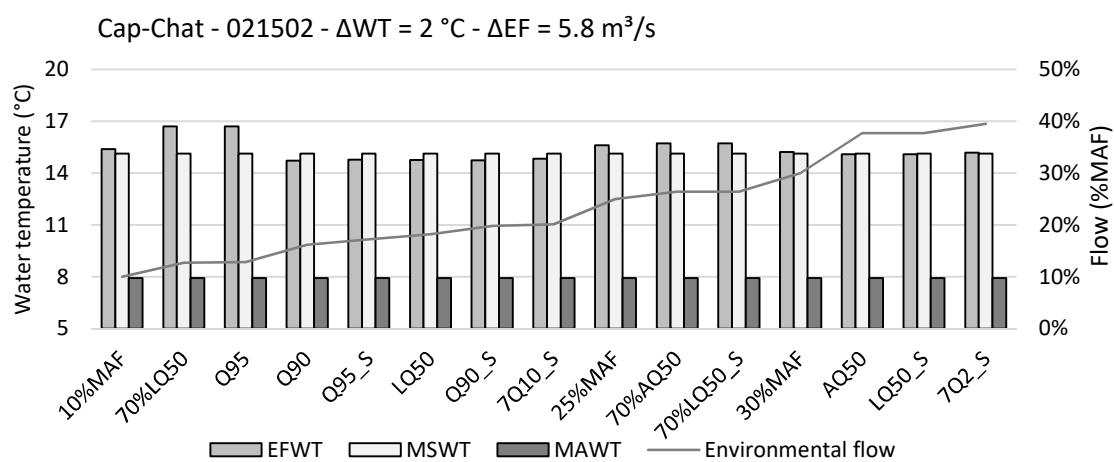
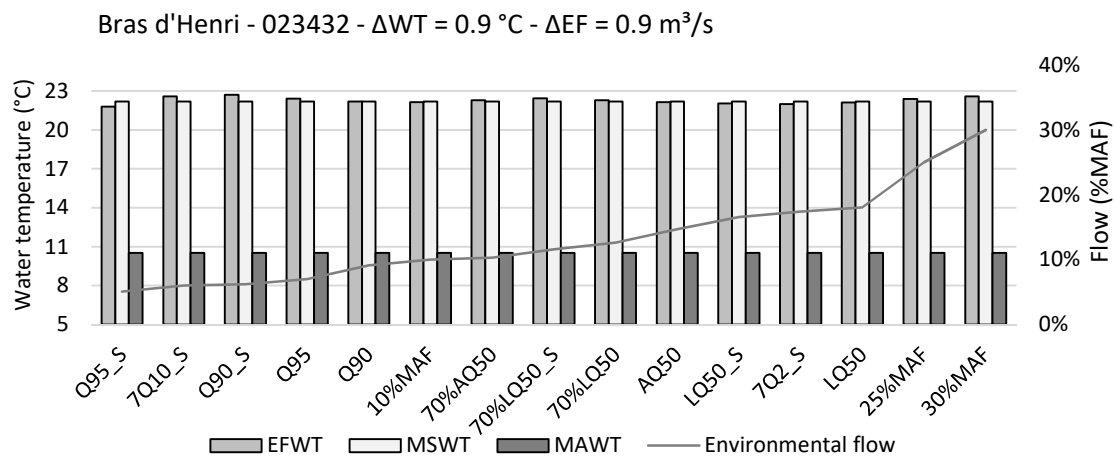


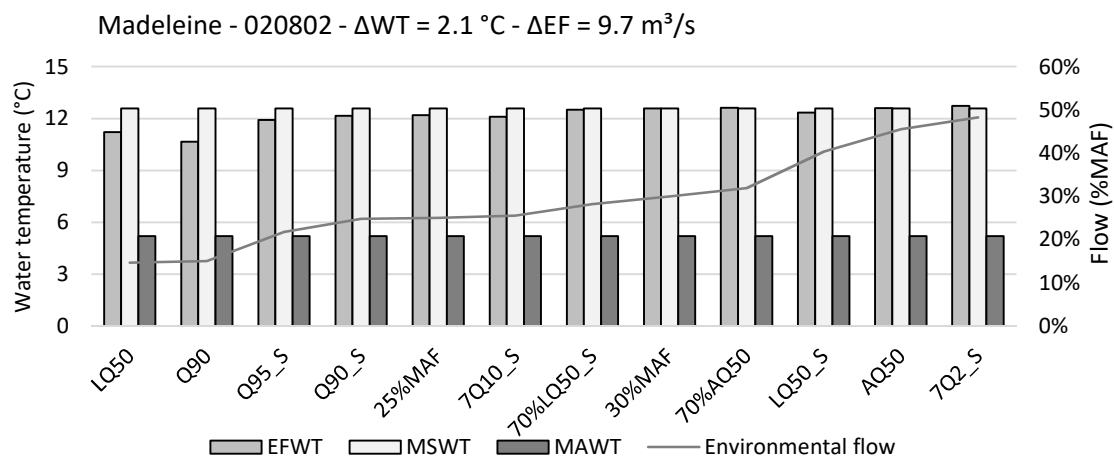
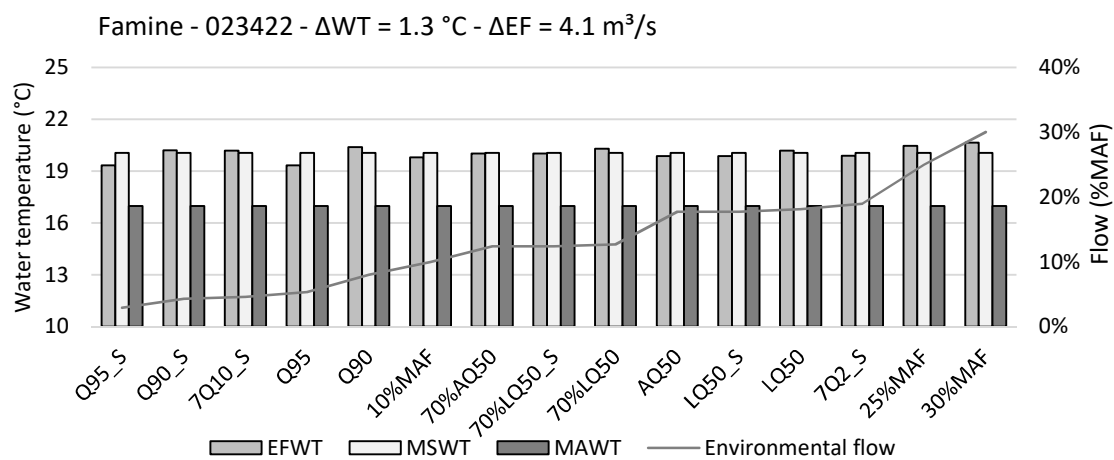
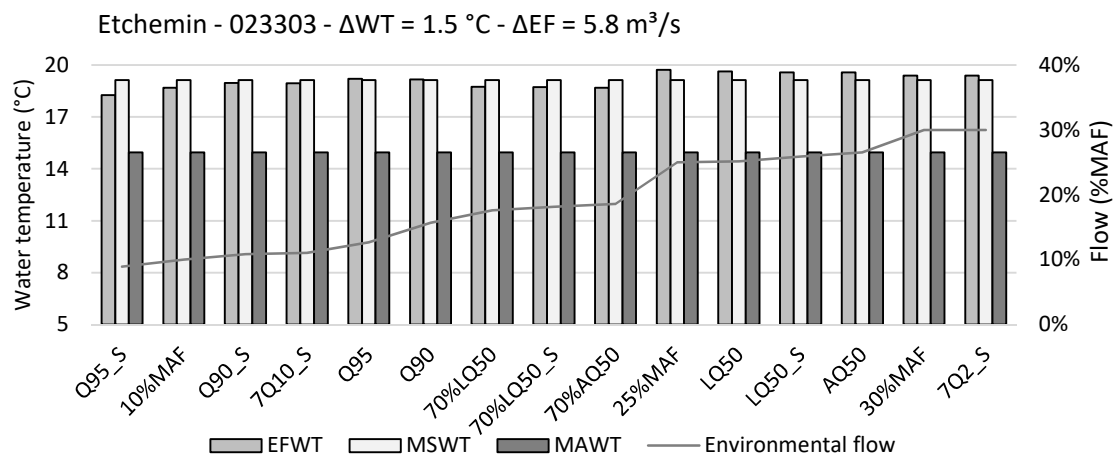


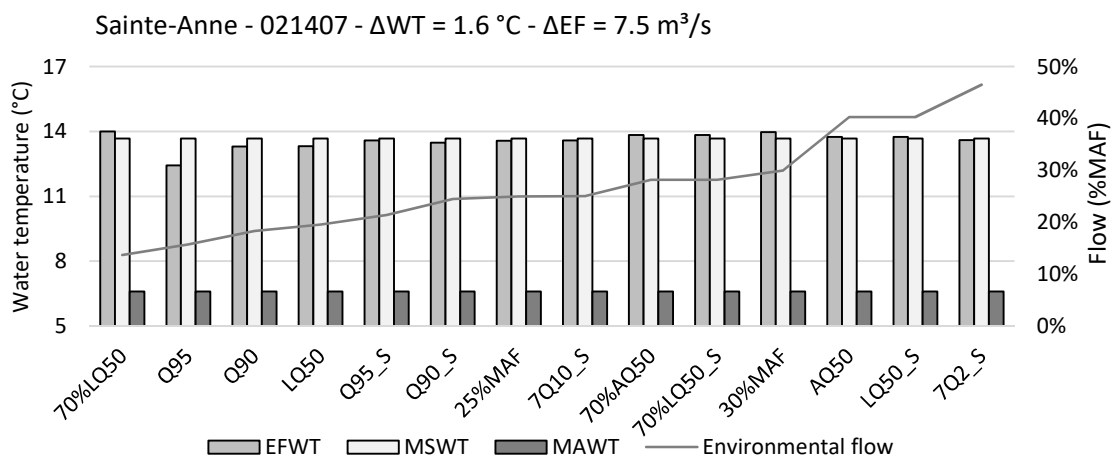
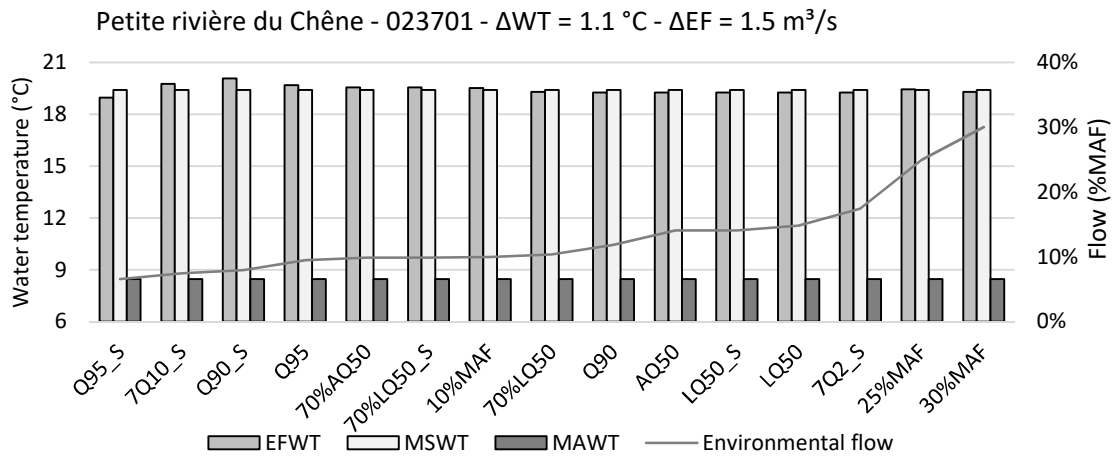
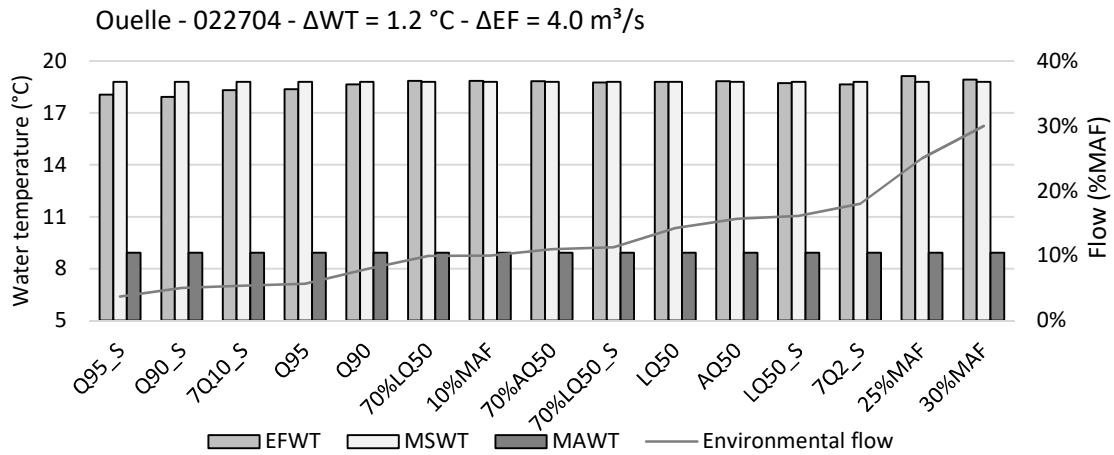
Région hydrographique 02 : Saint-Laurent sud-est

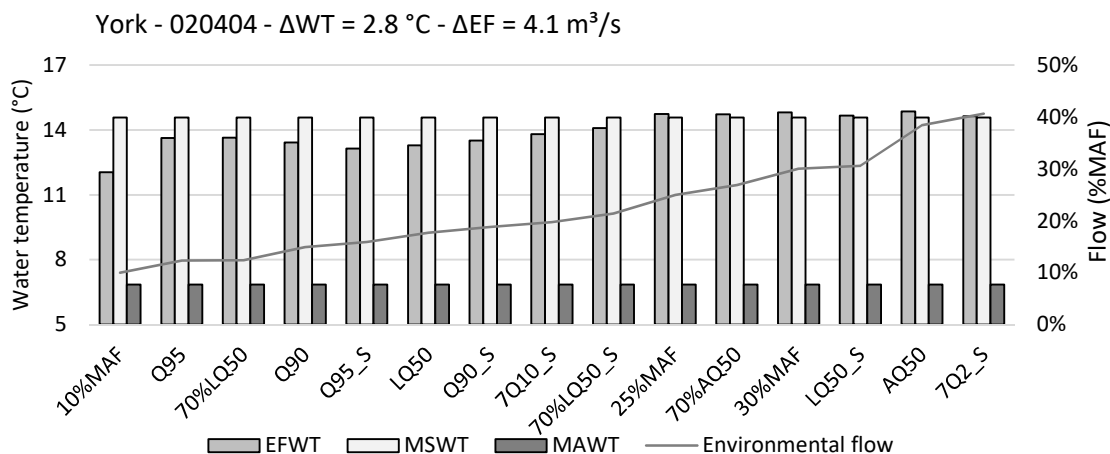




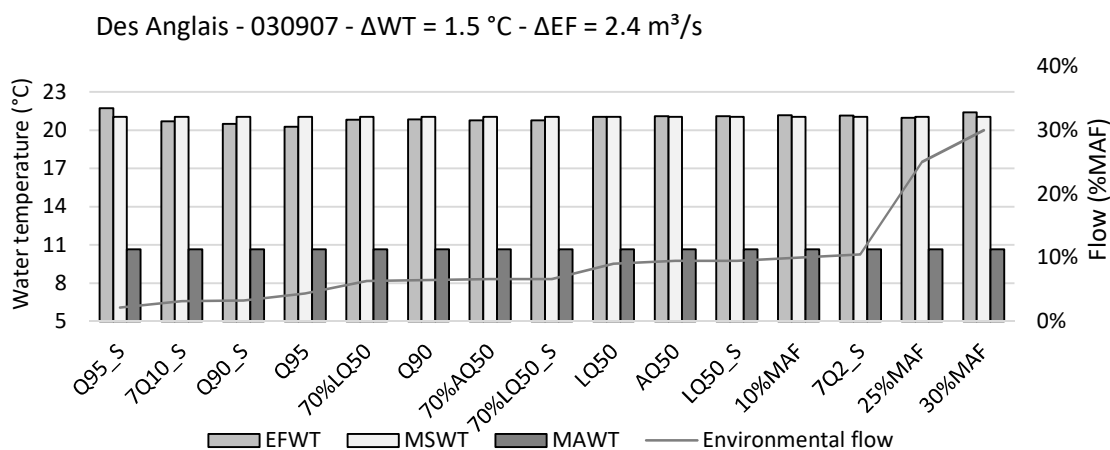
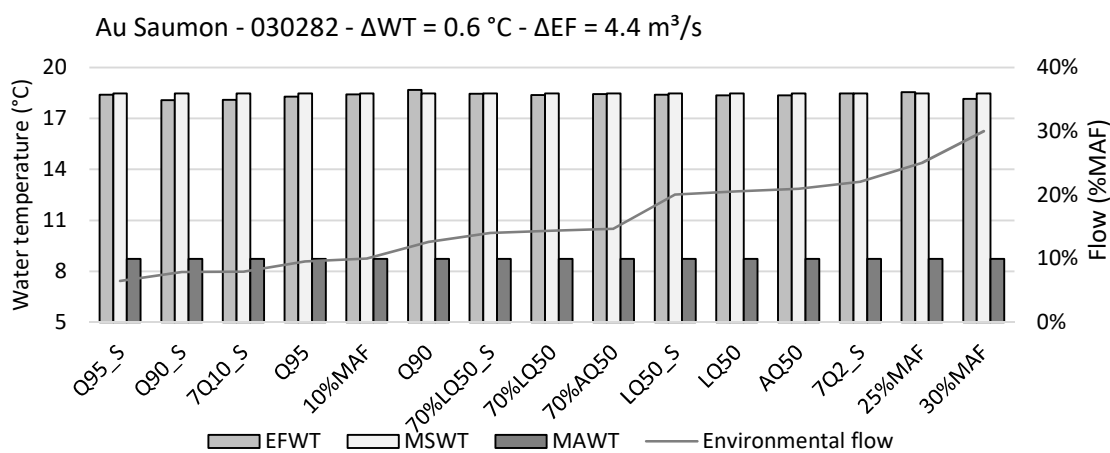




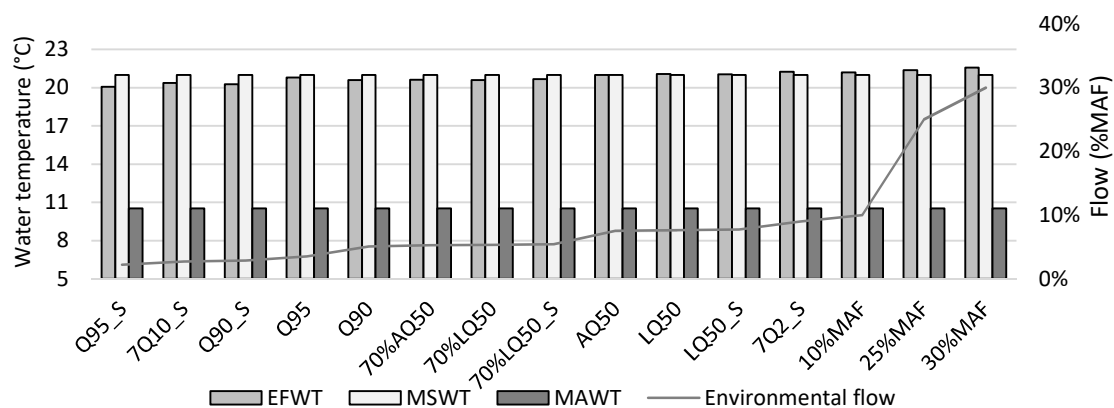




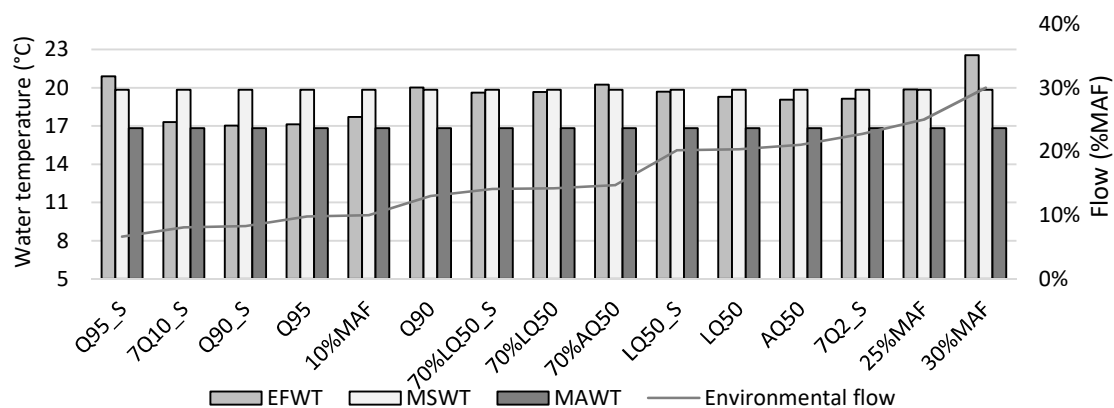
Région hydrographique 03 : Saint-Laurent sud-ouest



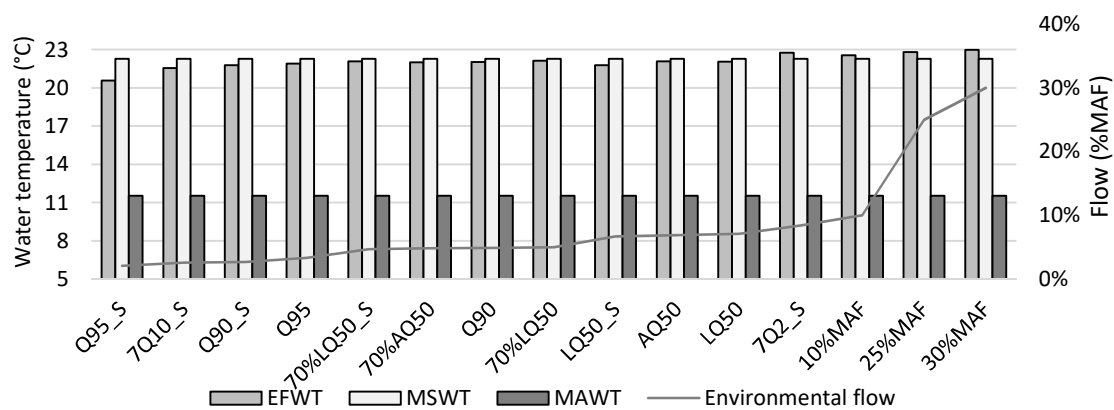
Des Hurons - 030415 - $\Delta WT = 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $\Delta EF = 1.4\text{ m}^3/\text{s}$



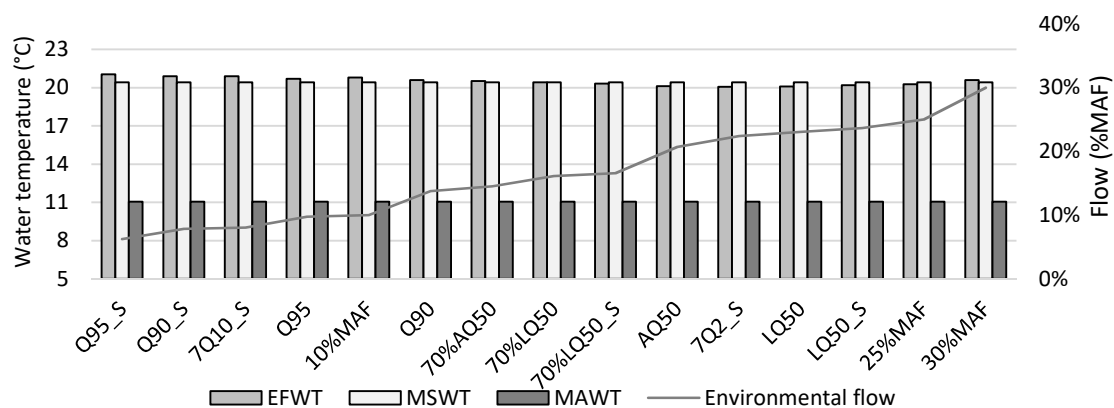
Eaton - 030234 - $\Delta WT = 5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $\Delta EF = 3.1\text{ m}^3/\text{s}$



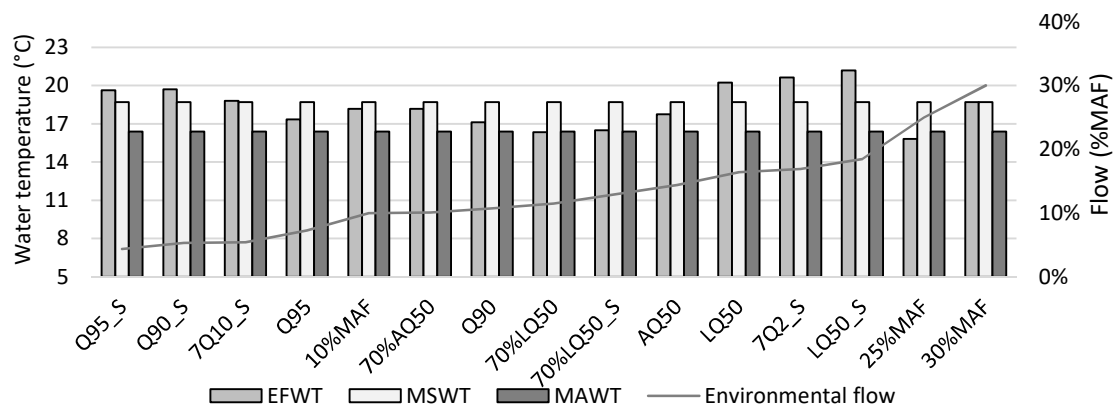
L'Acadie - 030421 - $\Delta WT = 2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $\Delta EF = 1.3\text{ m}^3/\text{s}$



Nicolet - 030103 - $\Delta WT = 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $\Delta EF = 8.0\text{ m}^3/\text{s}$

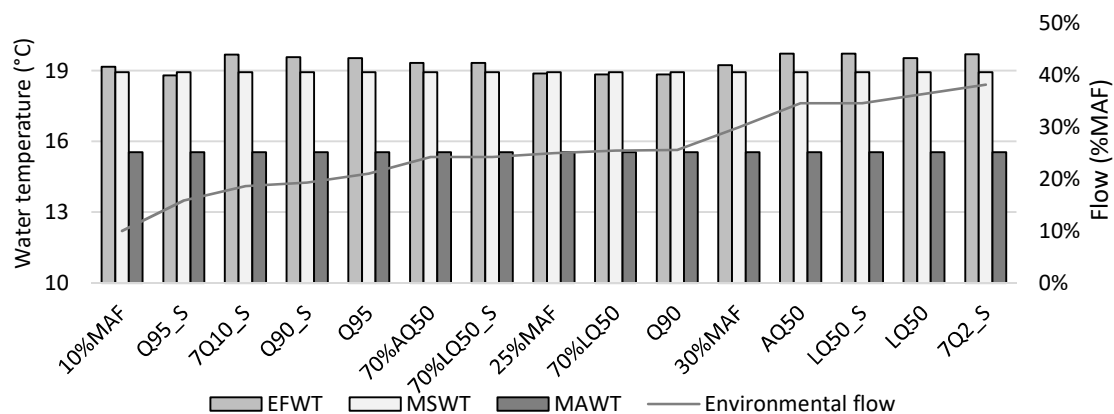


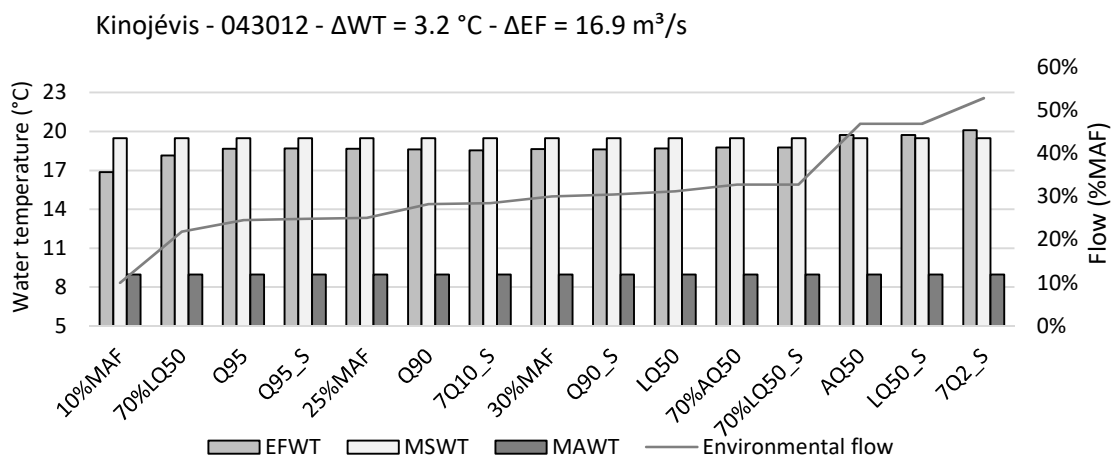
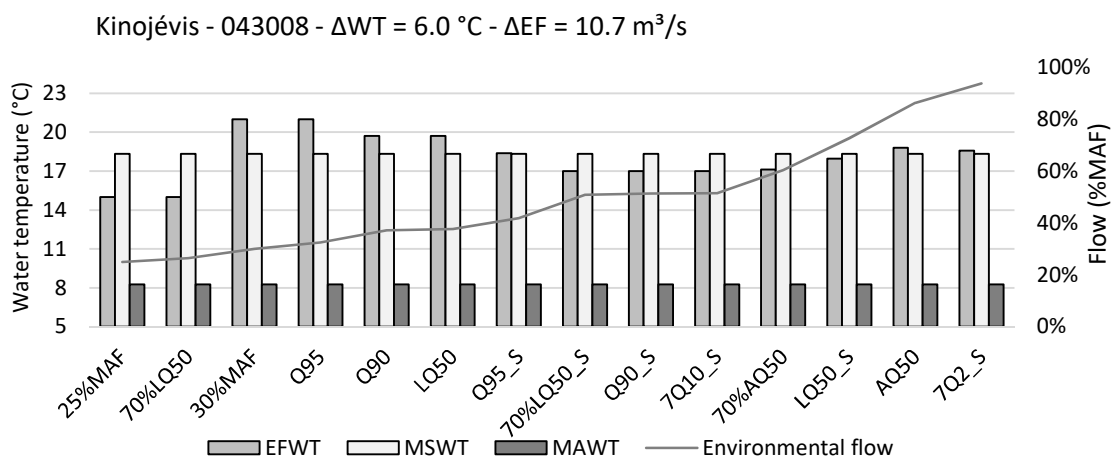
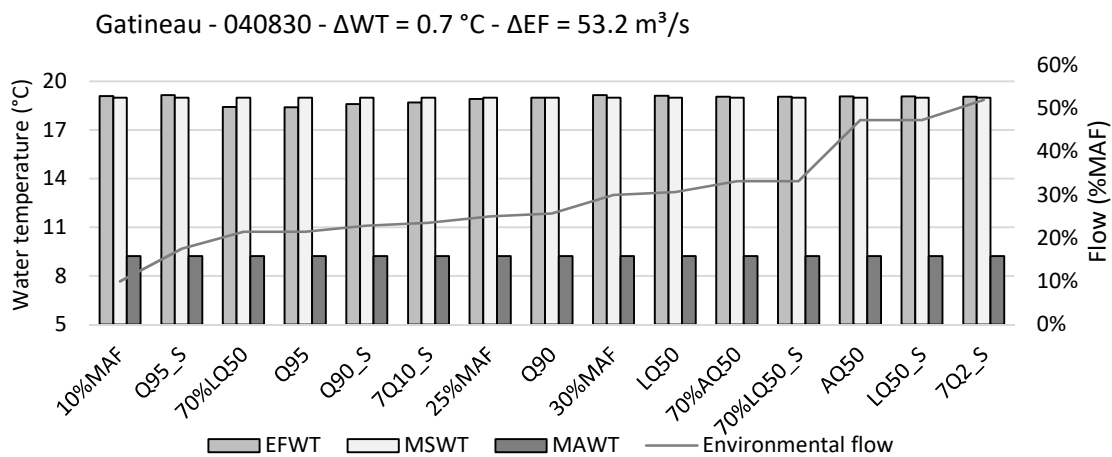
Saint-Germain - 030262 - $\Delta WT = 5.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $\Delta EF = 1.2\text{ m}^3/\text{s}$

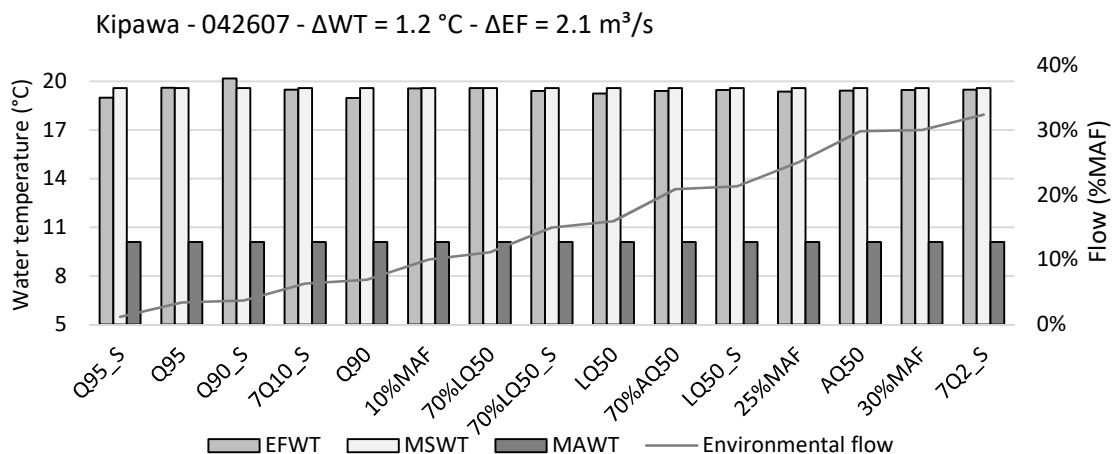


Région hydrographique 04 : Outaouais et Montréal

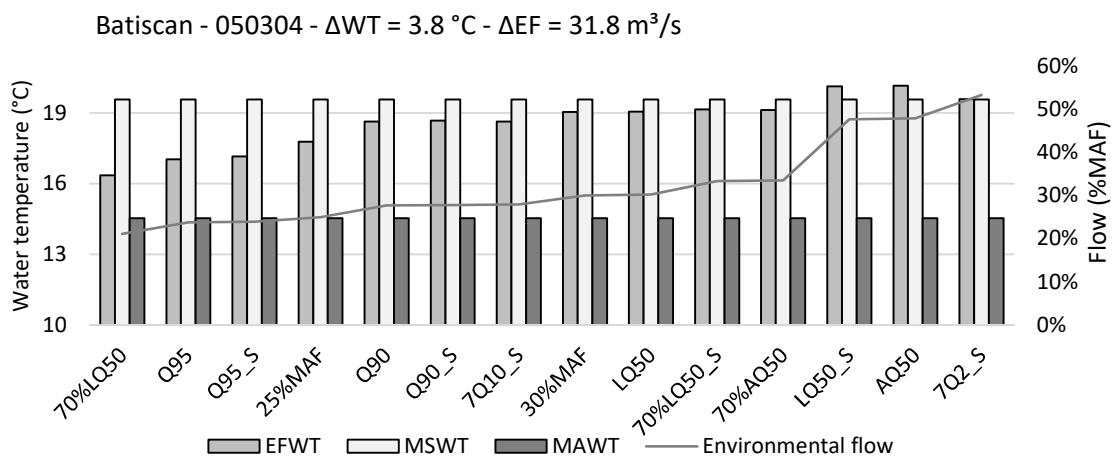
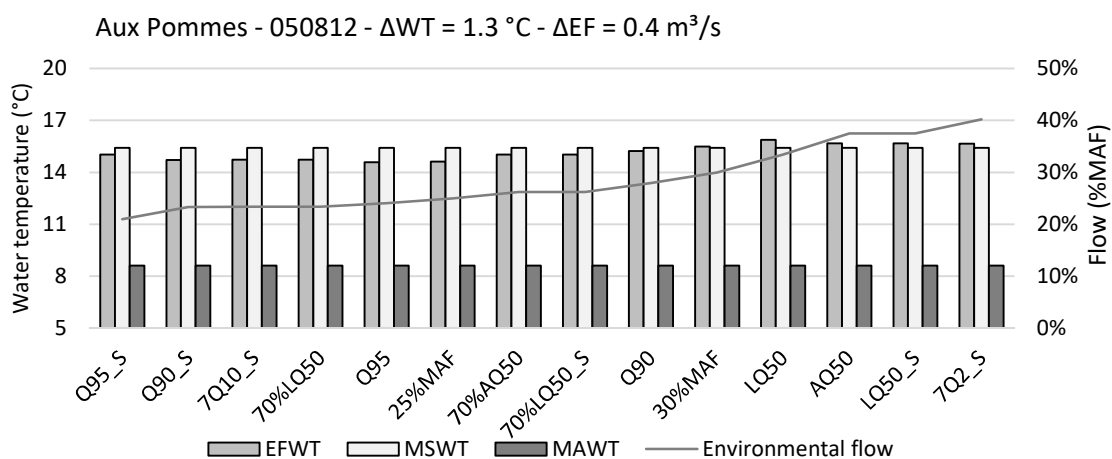
Doncaster - 040129 - $\Delta WT = 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $\Delta EF = 0.6\text{ m}^3/\text{s}$

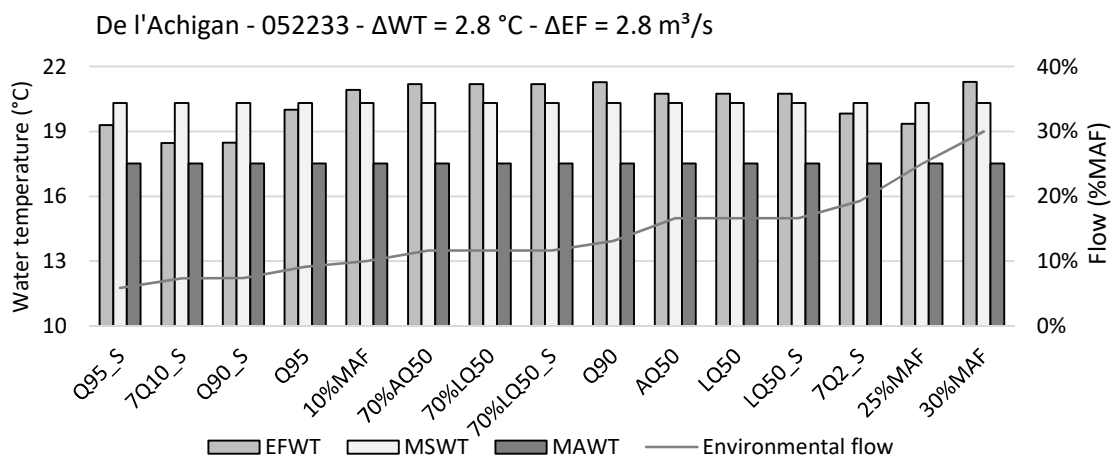
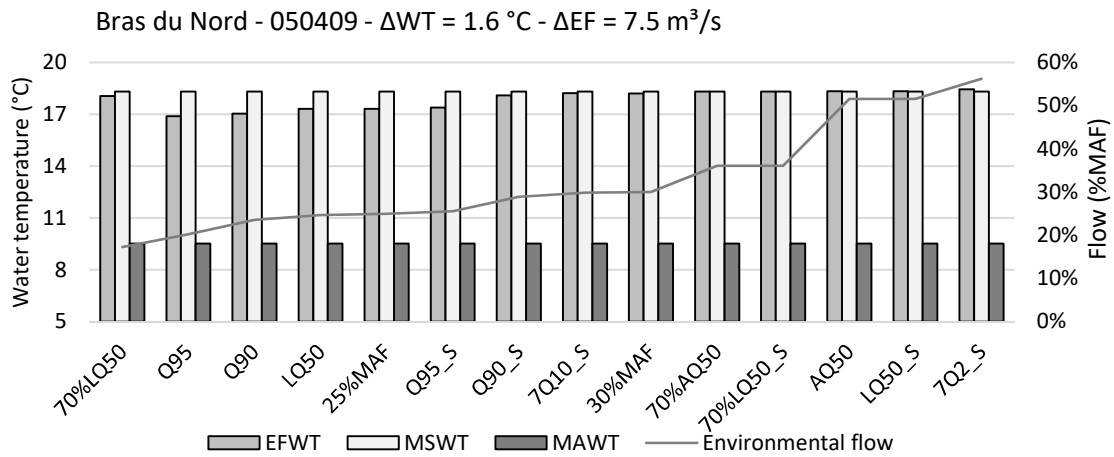
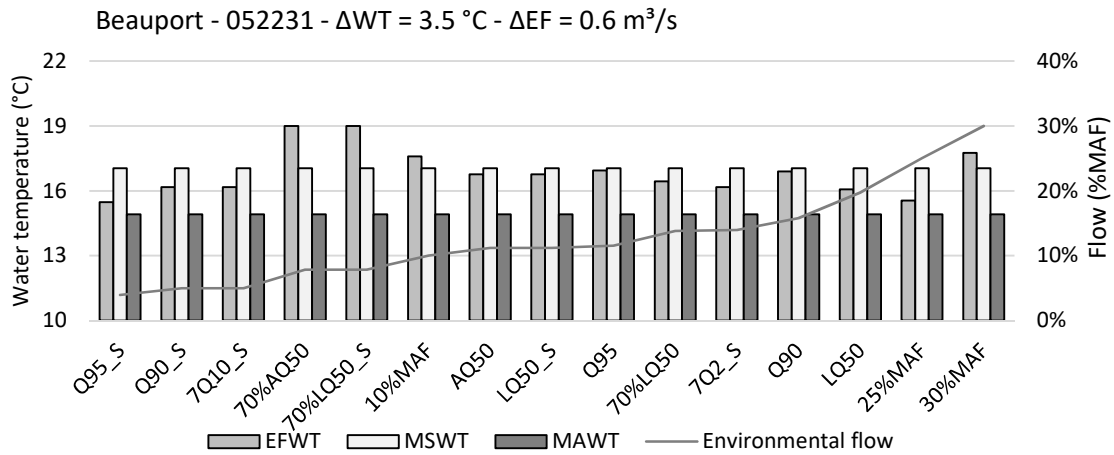


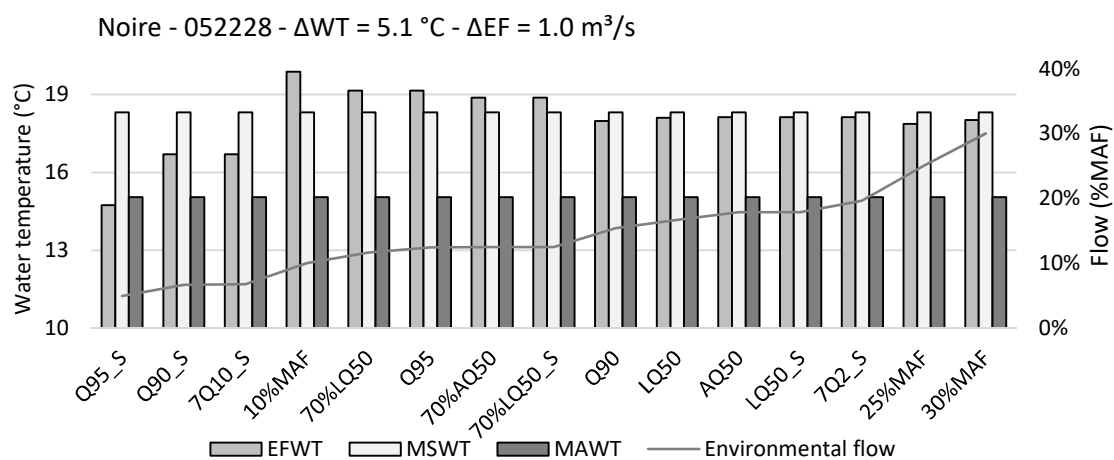
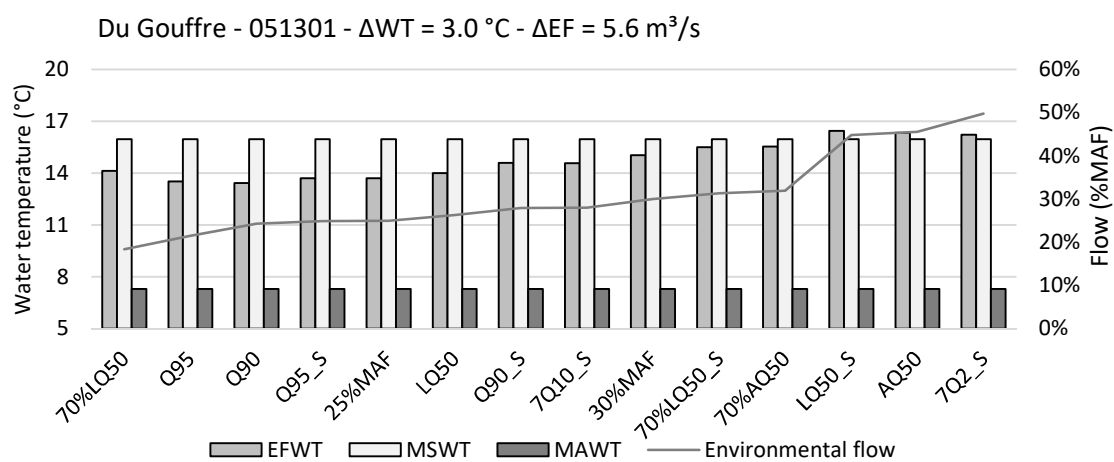
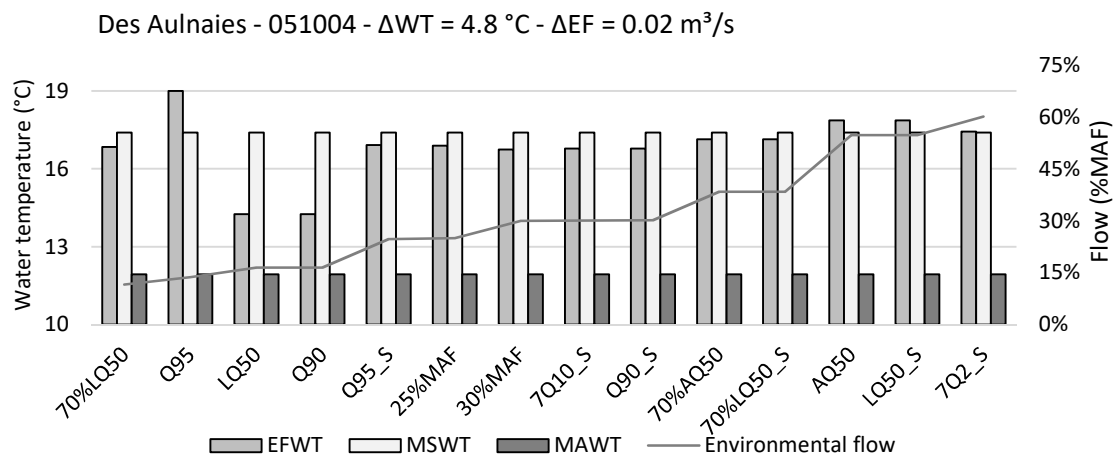


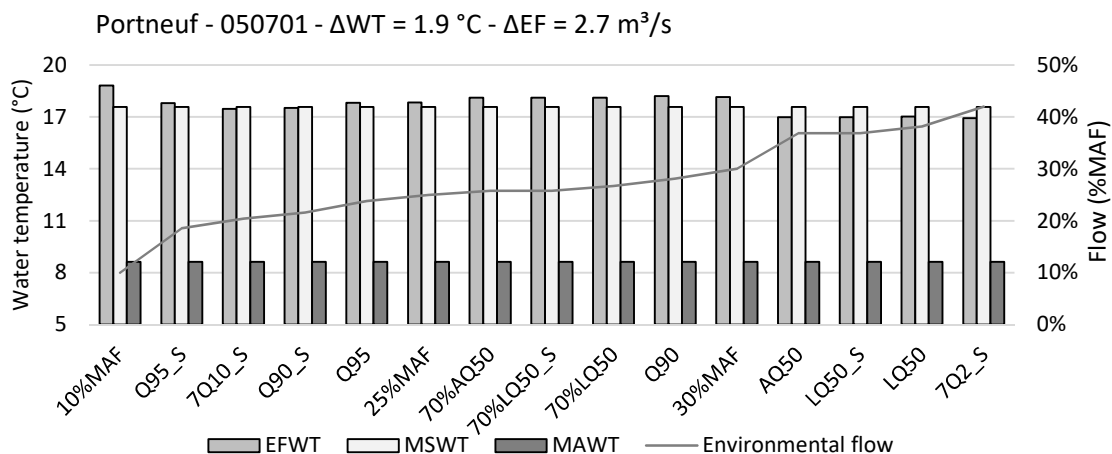


Région hydrographique 05 : Saint-Laurent nord-ouest

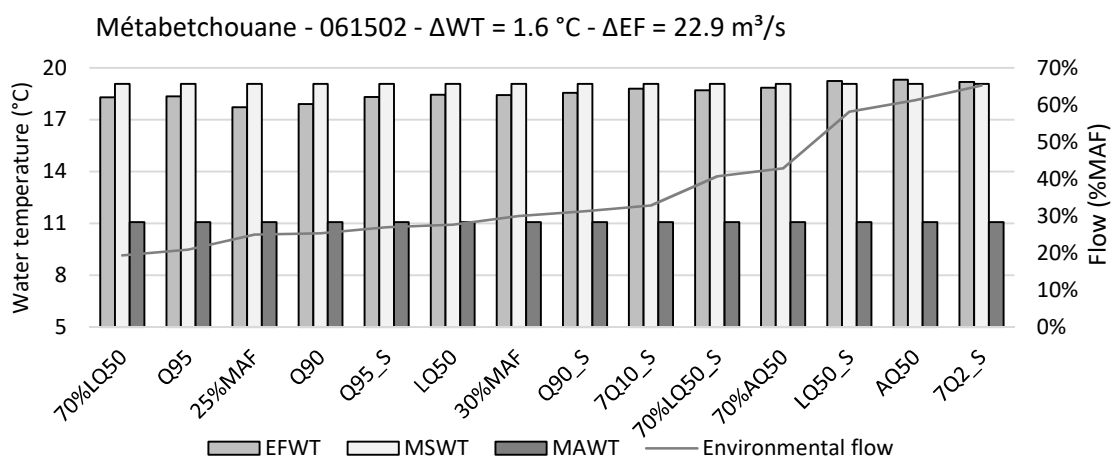
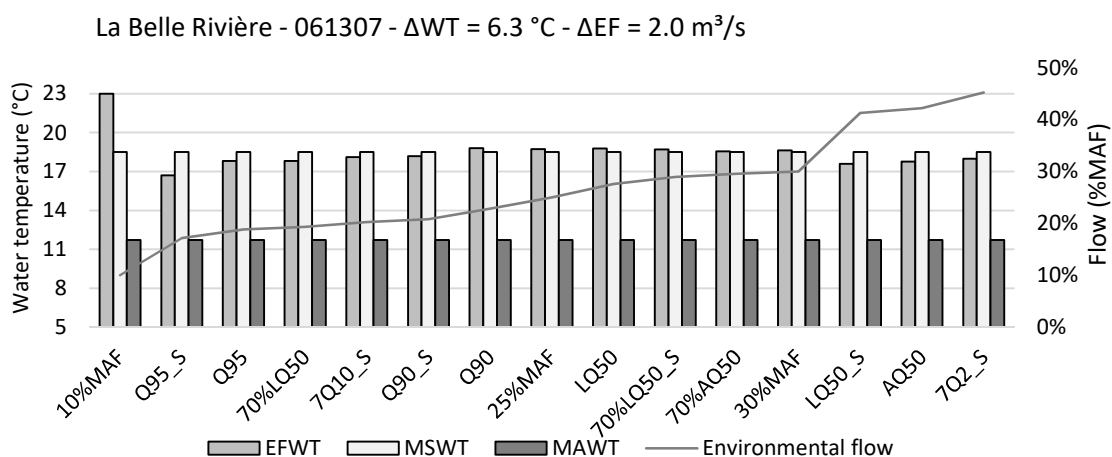


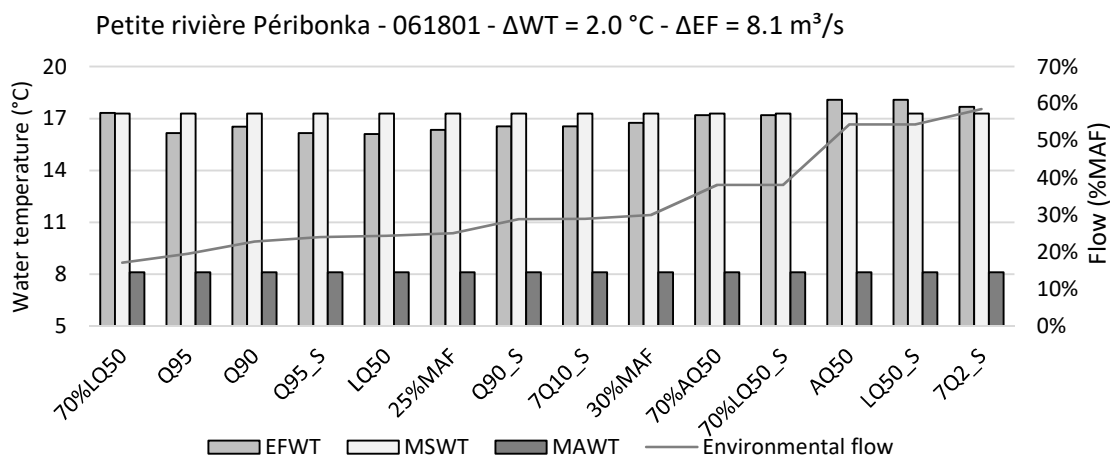
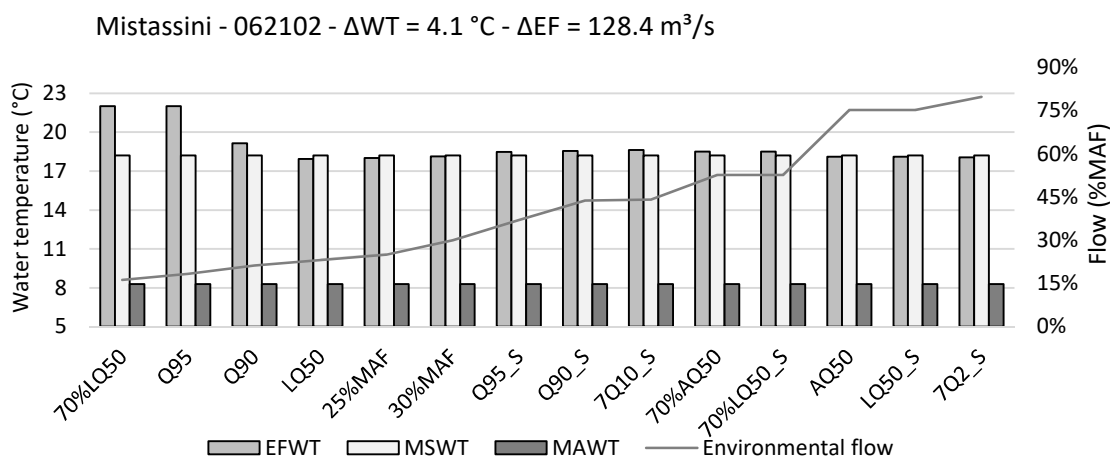
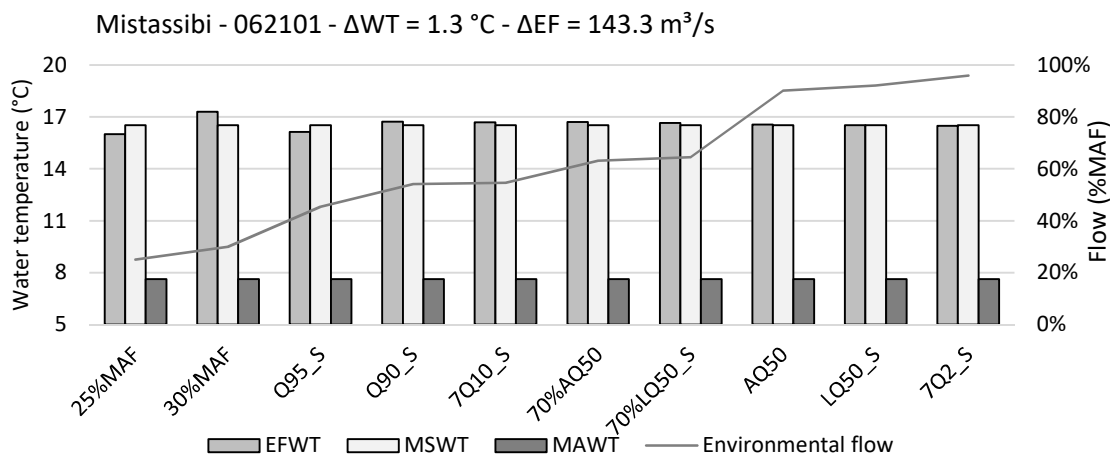


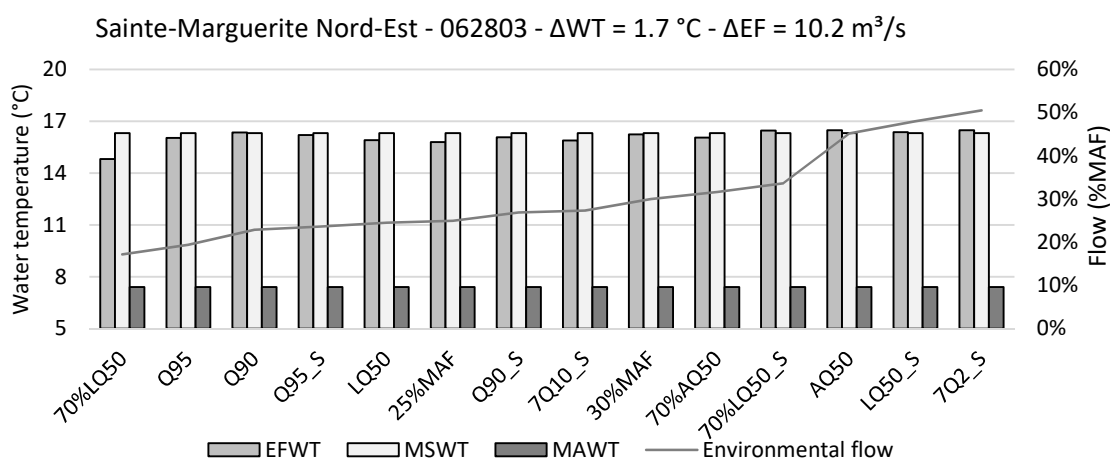
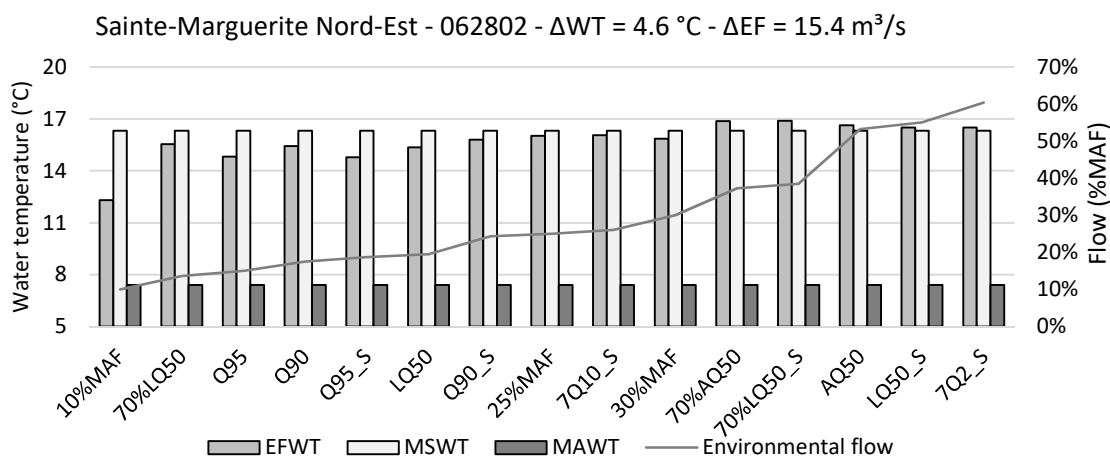




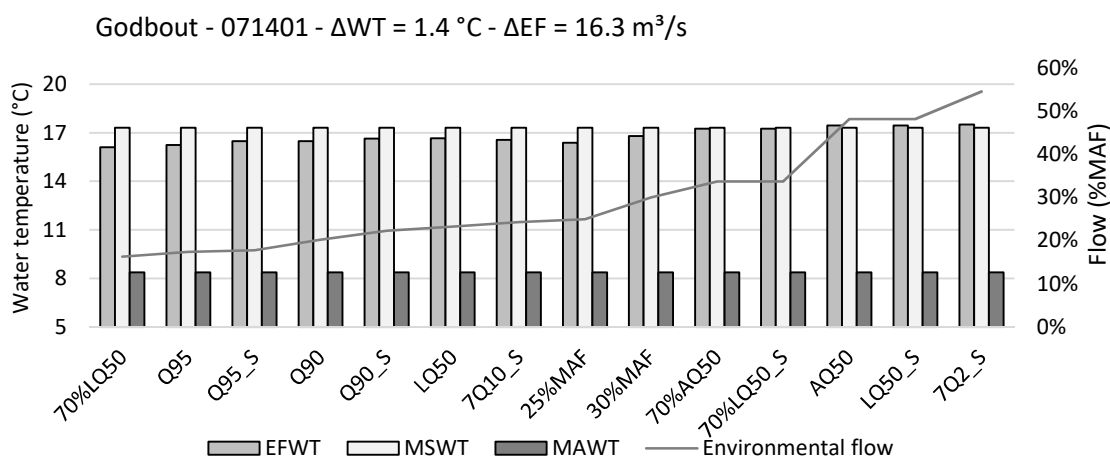
Région hydrographique 06 : Saguenay et lac Saint-Jean

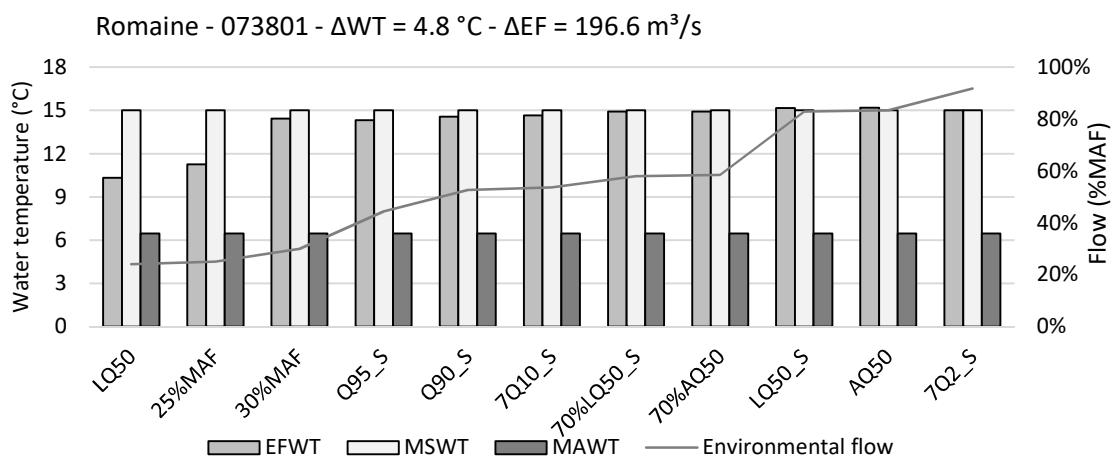
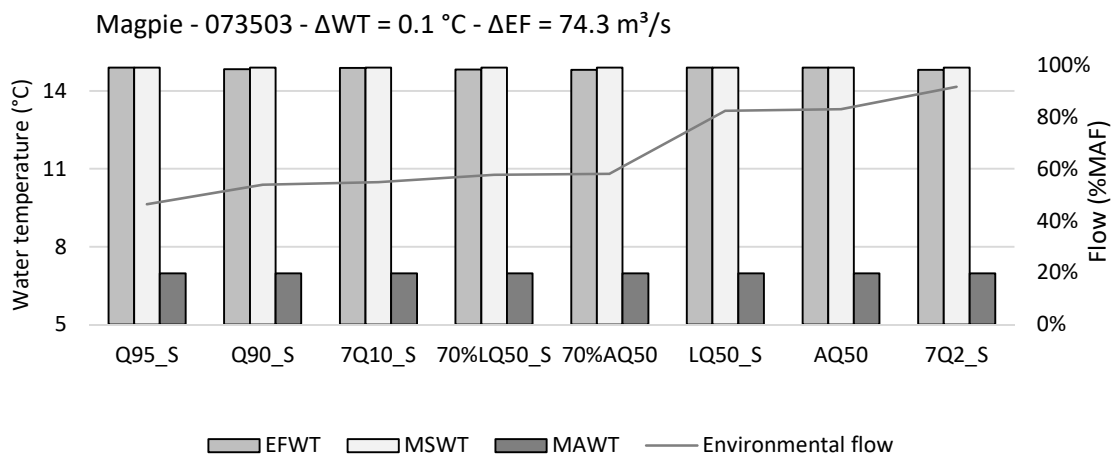




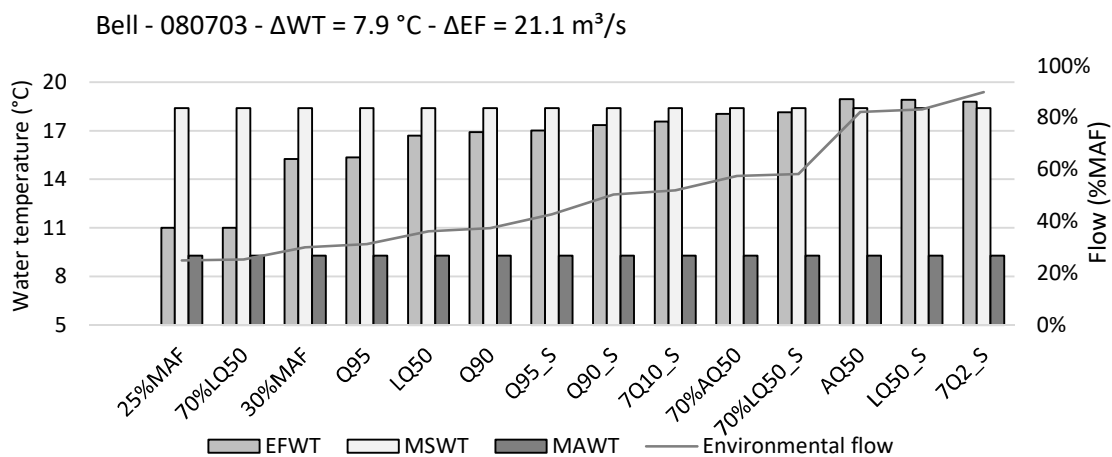


Région hydrographique 07 : Saint-Laurent nord-est





Région hydrographique 08 : Baies de Hannah et de Rupert



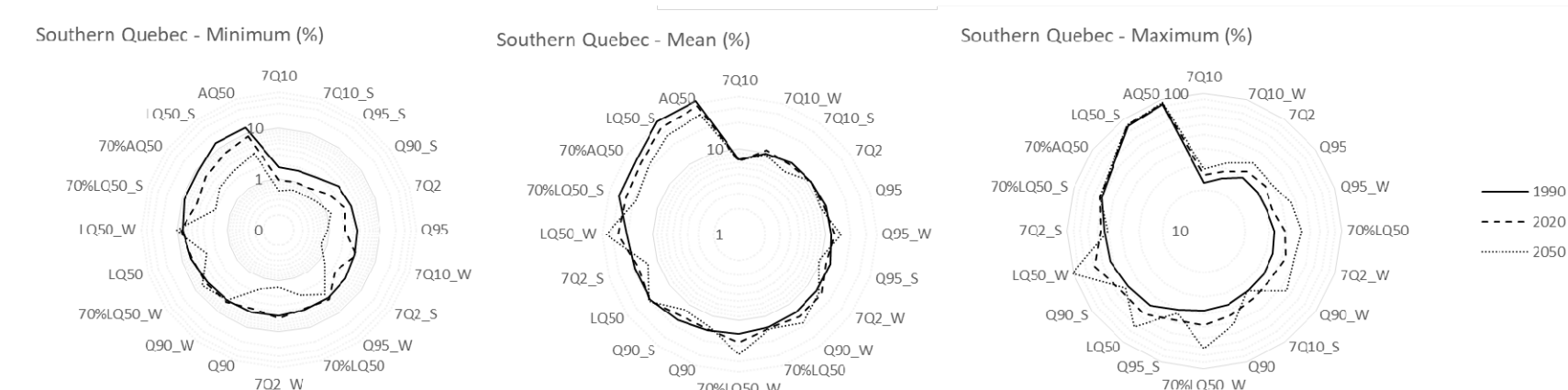
ANNEXE 5

Cette annexe présente, pour la moyenne des six scénarios climatiques :

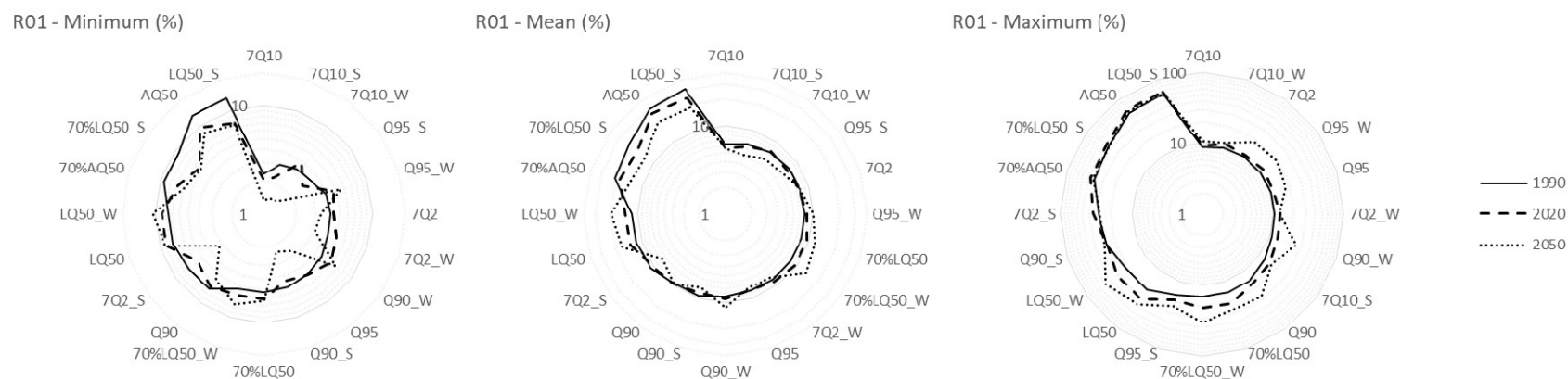
- a) L'évolution des valeurs minimales, moyennes et maximales de débits environnementaux (%MAF) pour les trois horizons 1990, 2020 et 2050 pour le Québec méridional et pour les huit régions hydrographiques;
 - b) La variation des valeurs des débits environnementaux (%MAF) sous forme de boxplot;
 - c) La variation des valeurs des débits environnementaux sous forme de nuages de points.
-

- a) L'évolution des valeurs minimales, moyennes et maximales de débits environnementaux (%MAF) pour les trois horizons 1990, 2020 et 2050 pour le Québec méridional et pour les huit régions hydrographiques;

Québec méridional

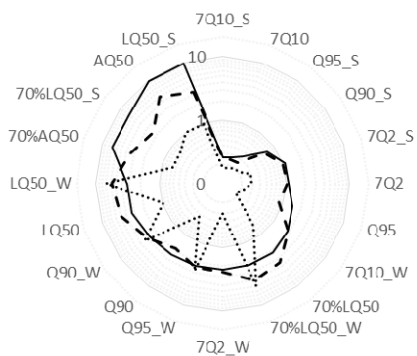


Région hydrographique 01 : Baie des chaleurs et Percé

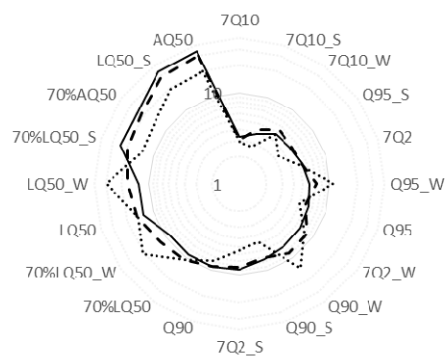


Région hydrographique 02 : Saint-Laurent sud-est

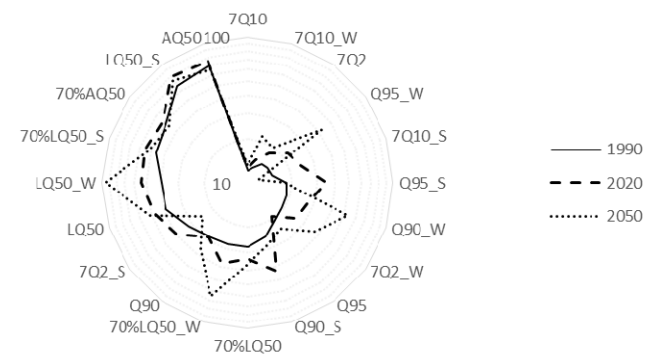
R02 - Minimum (%)



R02 - Mean (%)



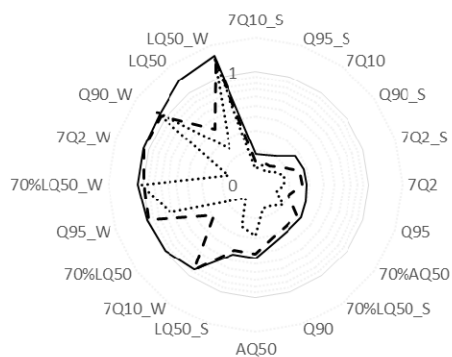
R02 - Maximum (%)



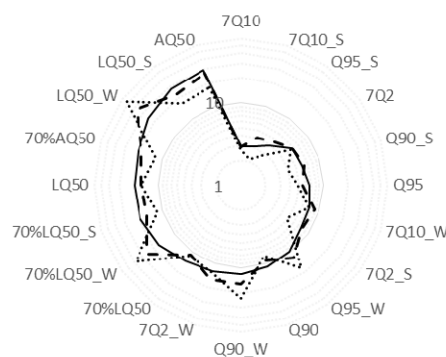
— 1990
- - 2020
... 2050

Région hydrographique 03 : Saint-Laurent sud-ouest

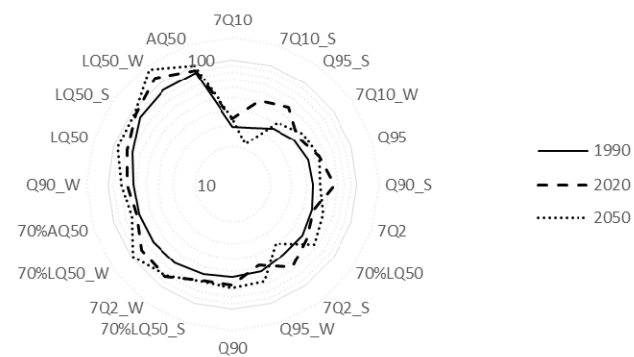
R03 - Minimum (%)



R03 - Mean (%)



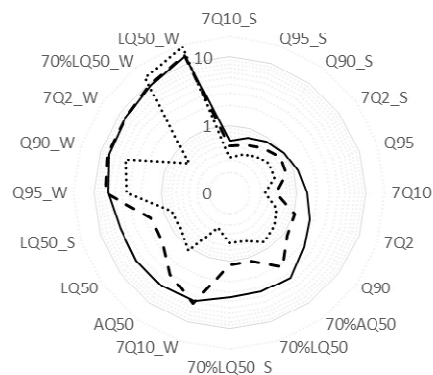
R03 - Maximum (%)



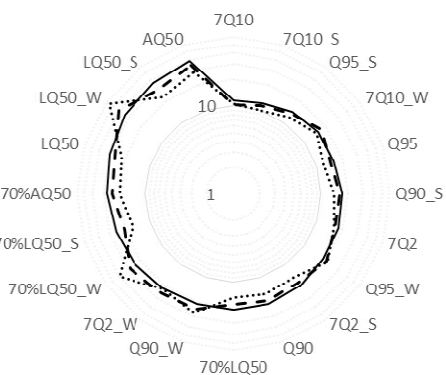
— 1990
- - 2020
... 2050

Région hydrographique 04 : Outaouais et Montréal

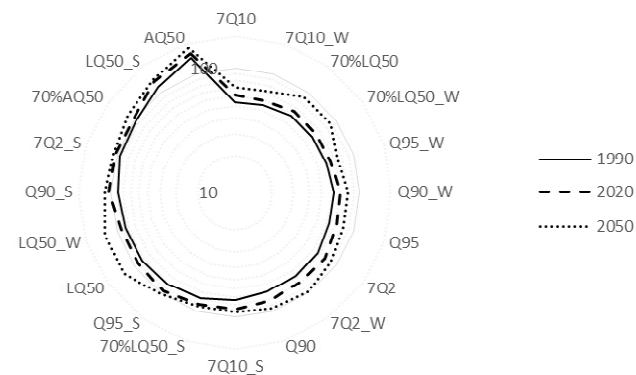
R04 - Minimum (%)



R04 - Mean (%)



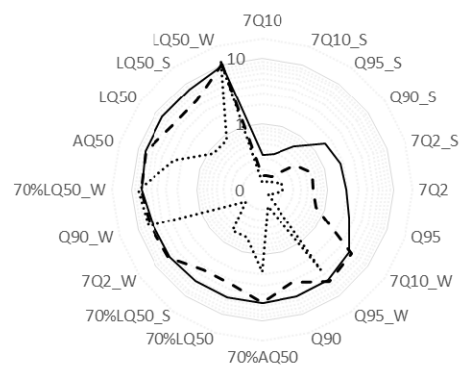
R04 - Maximum (%)



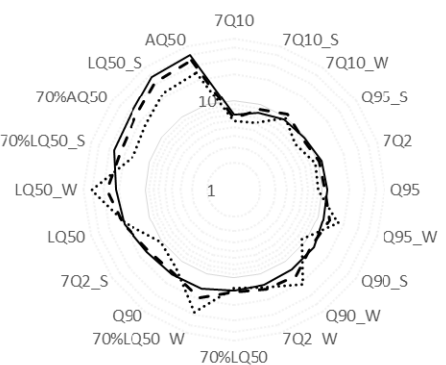
— 1990
- - 2020
... 2050

Région hydrographique 05 : Saint-Laurent nord-ouest

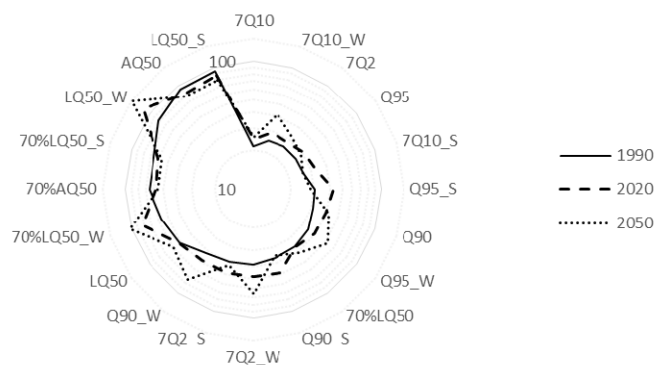
R05 - Minimum (%)



R05 - Mean (%)



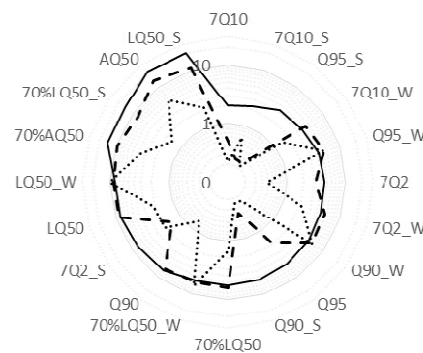
R05 - Maximum (%)



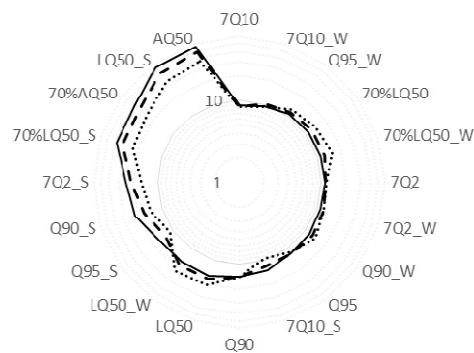
— 1990
- - 2020
... 2050

Région hydrographique 06 : Saguenay et lac Saint-Jean

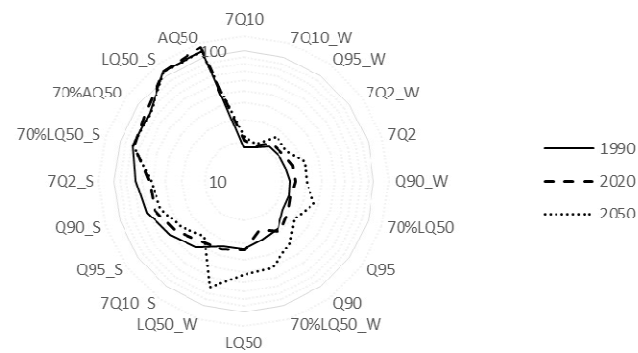
R06 - Minimum (%)



R06 - Mean (%)



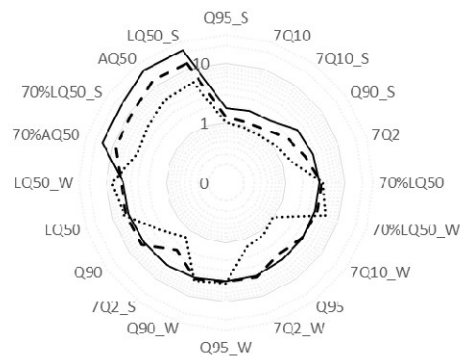
R06 - Maximum (%)



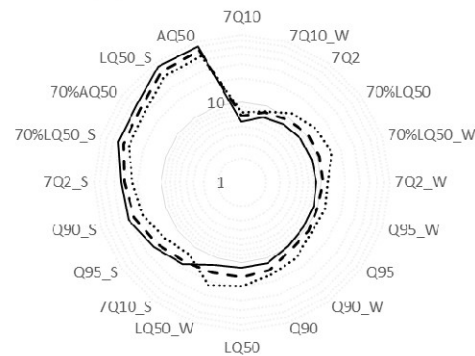
— 1990
- - 2020
... 2050

Région hydrographique 07 : Saint-Laurent nord-est

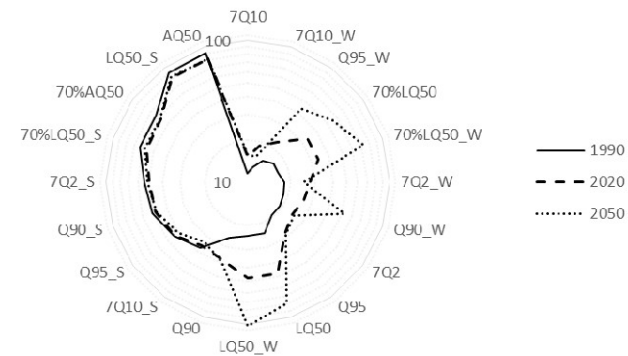
R07 - Minimum (%)



R07 - Mean (%)

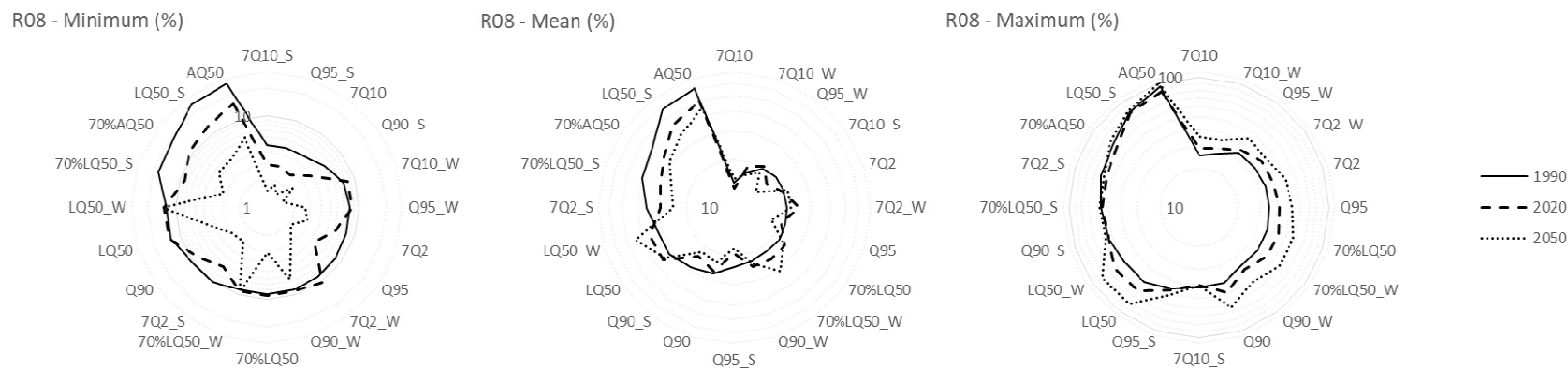


R07 - Maximum (%)



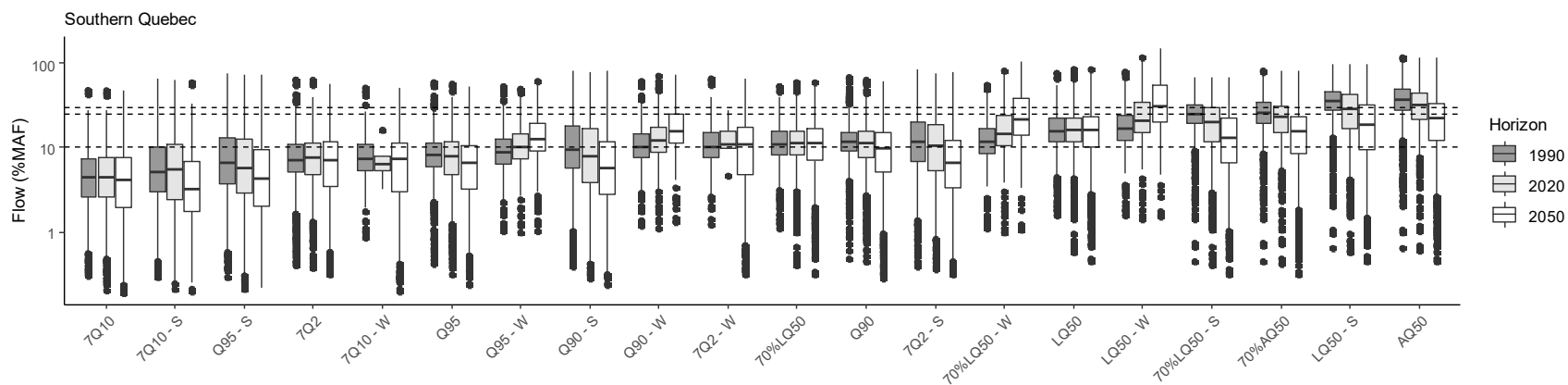
— 1990
- - 2020
... 2050

Région hydrographique 08 : Baies de Hannah et de Rupert

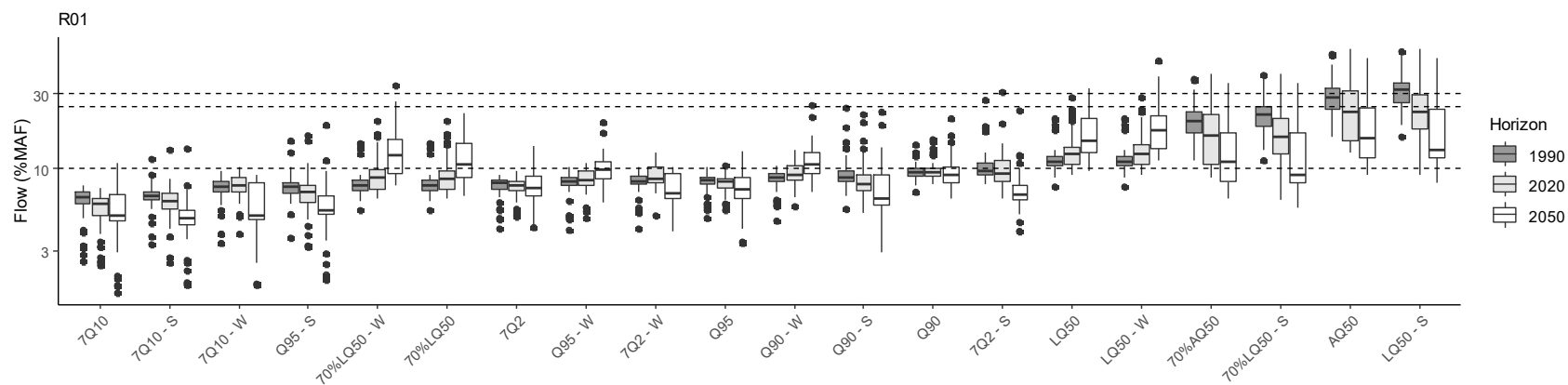


b) La variation des valeurs des débits environnementaux (%MAF) sous forme de boxplot;

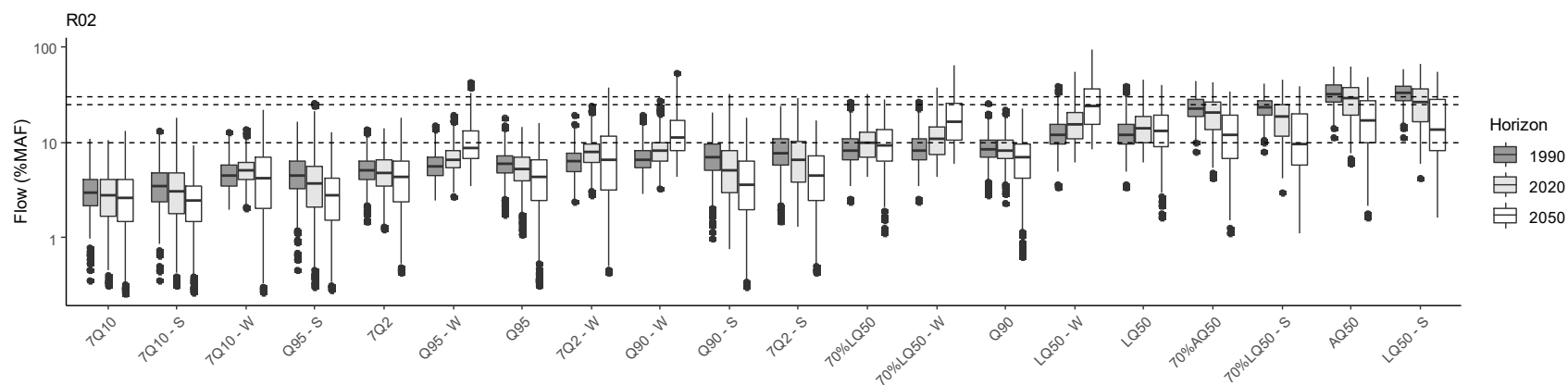
Québec méridional



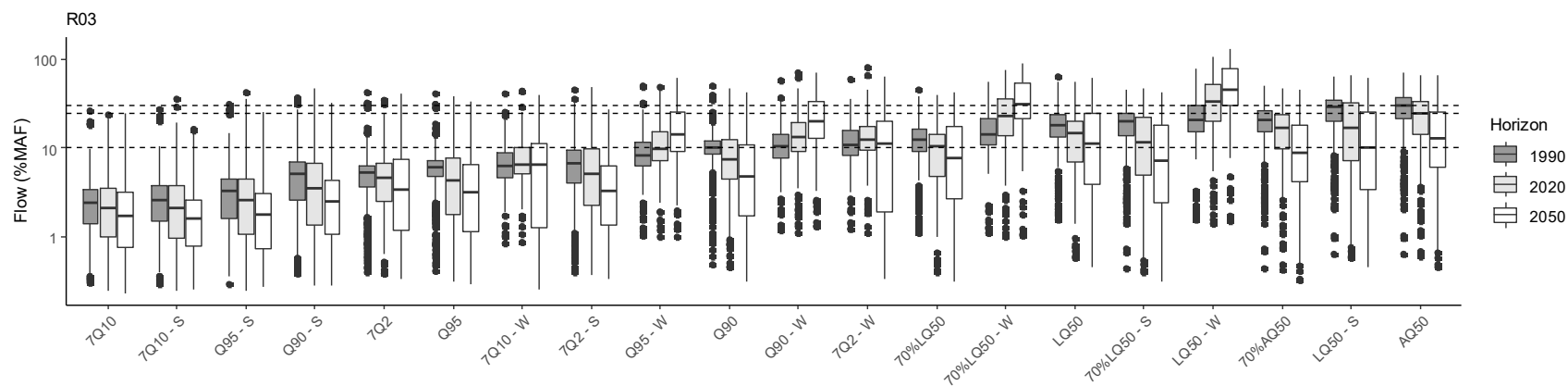
Région hydrographique 01 : Baie des chaleurs et Percé



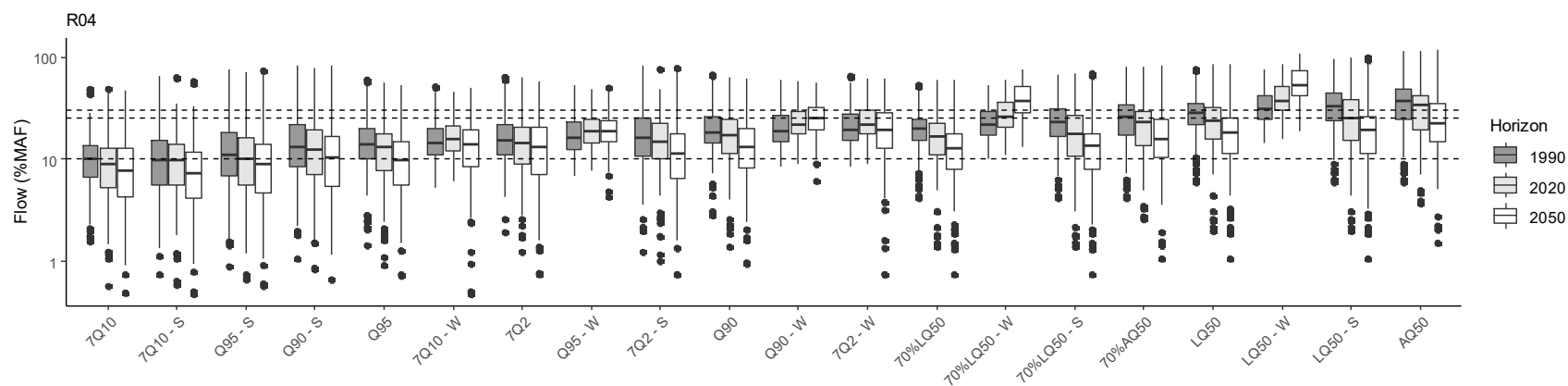
Région hydrographique 02 : Saint-Laurent sud-est



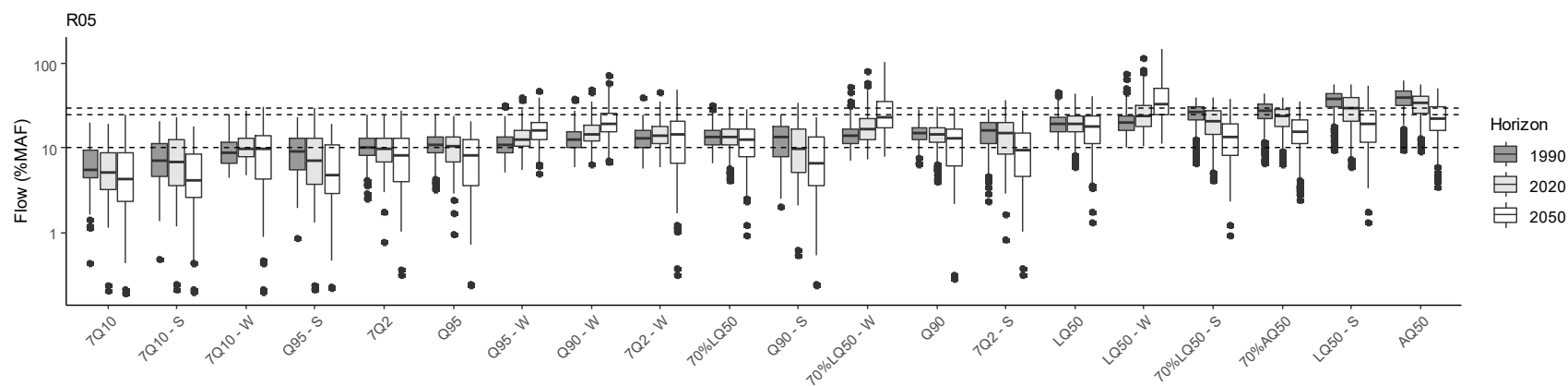
Région hydrographique 03 : Saint-Laurent sud-ouest



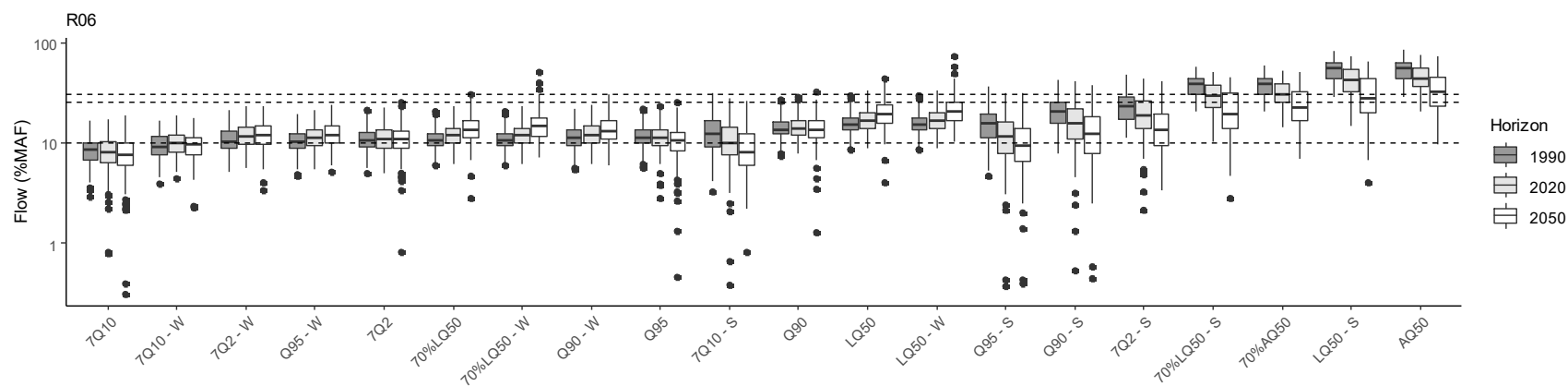
Région hydrographique 04 : Outaouais et Montréal



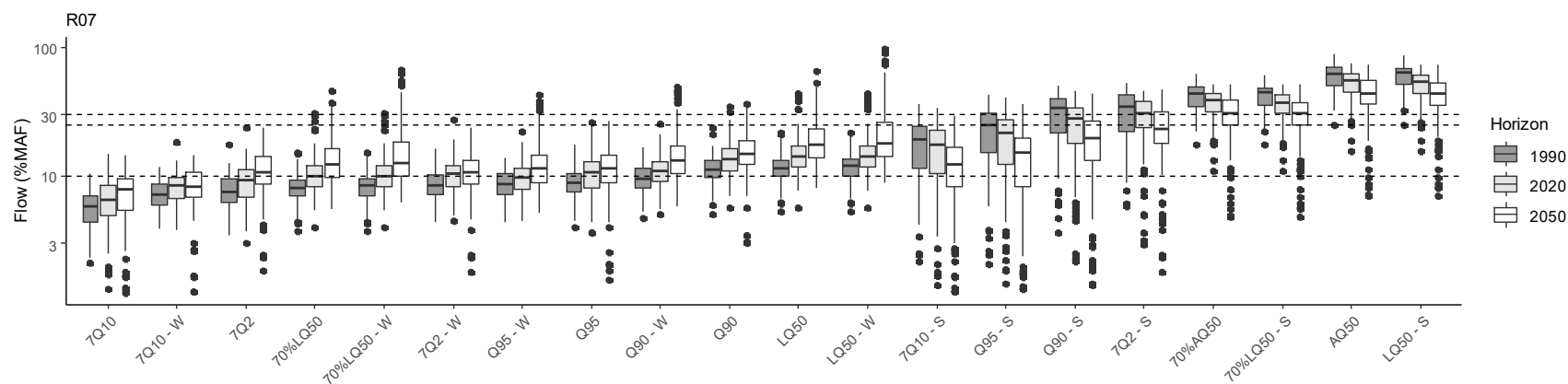
Région hydrographique 05 : Saint-Laurent nord-ouest



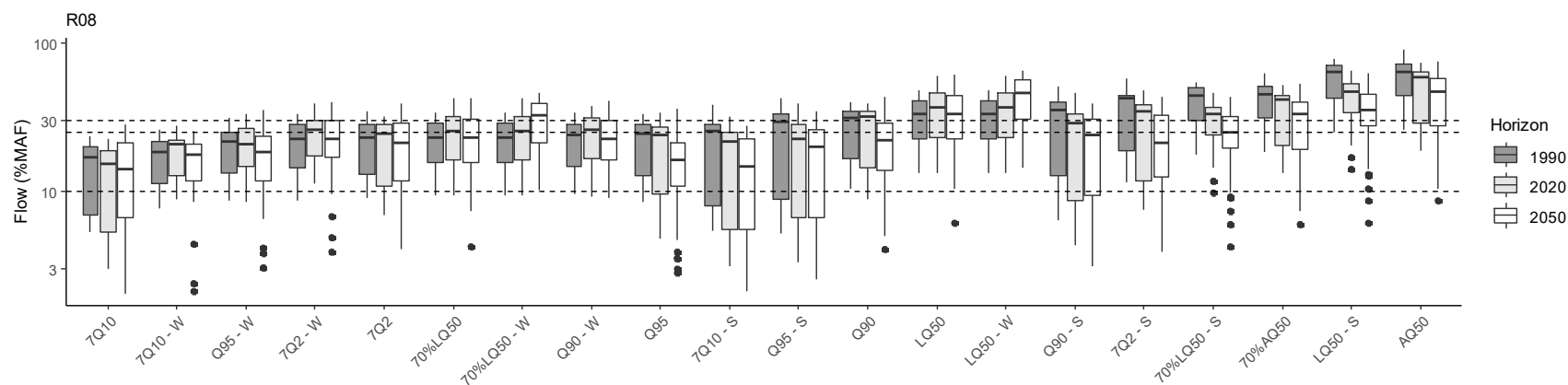
Région hydrographique 06 : Saguenay et lac Saint-Jean



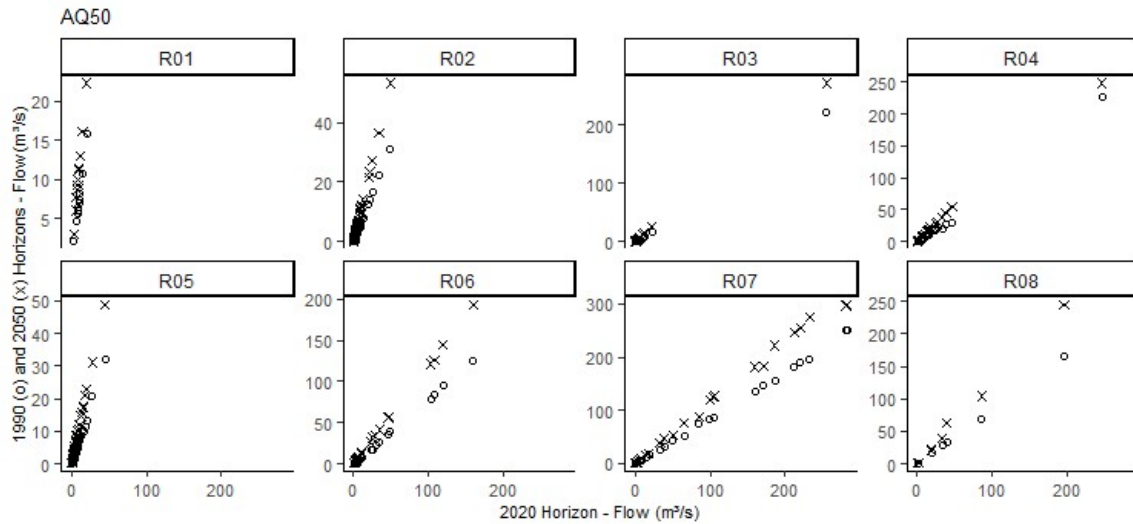
Région hydrographique 07 : Saint-Laurent nord-est



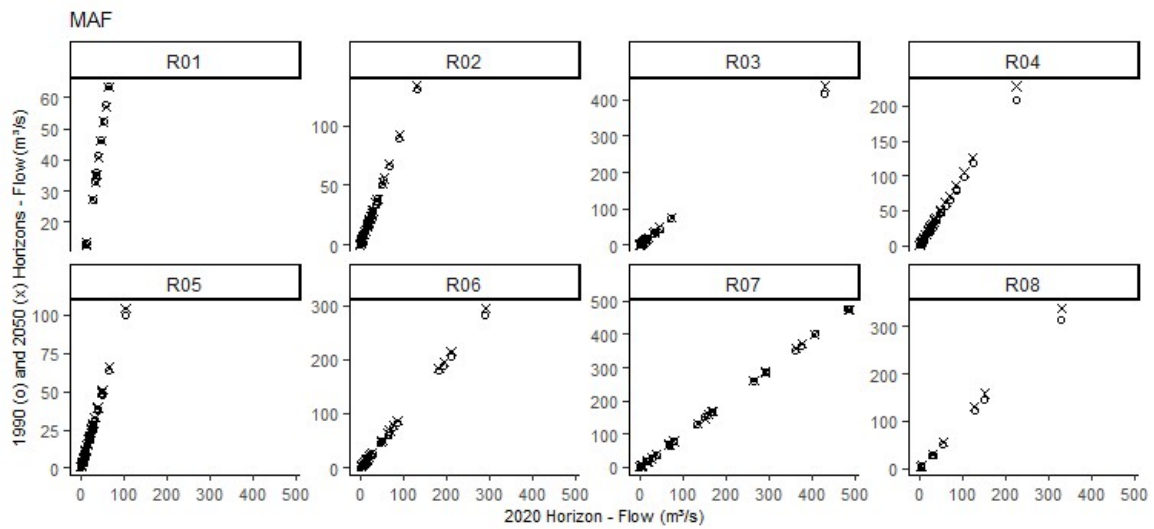
Région hydrographique 08 : Baies de Hannah et de Rupert



c) La variation des valeurs des débits environnementaux sous forme de nuages de points.

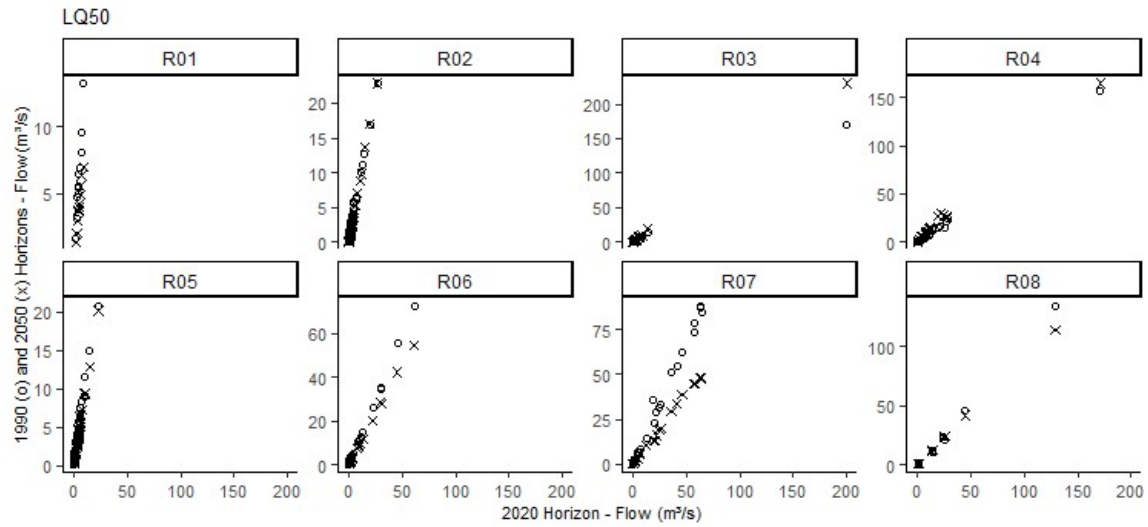


* Ce graphe vaut aussi pour 70%AQ50



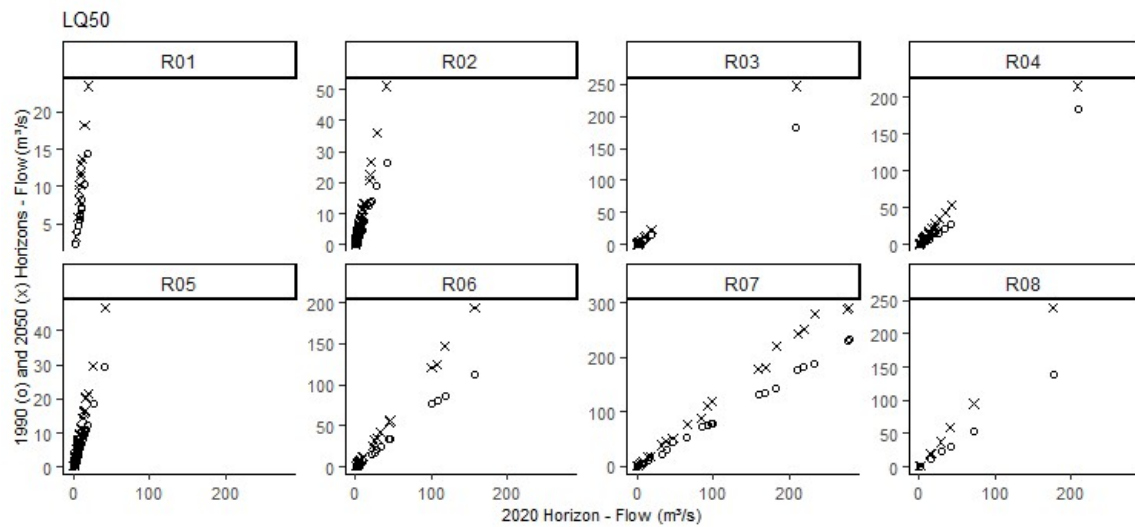
* Ce graphe vaut aussi pour 10%MAF, 25%MAF et 30%MAF

Inter-annual



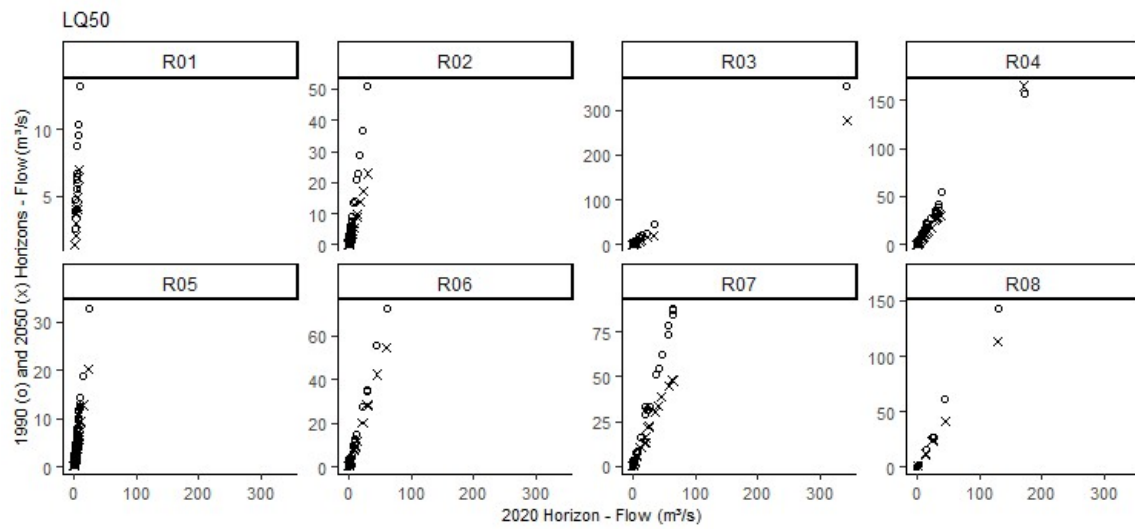
* Ce graphe vaut aussi pour 70%LQ50

Summer



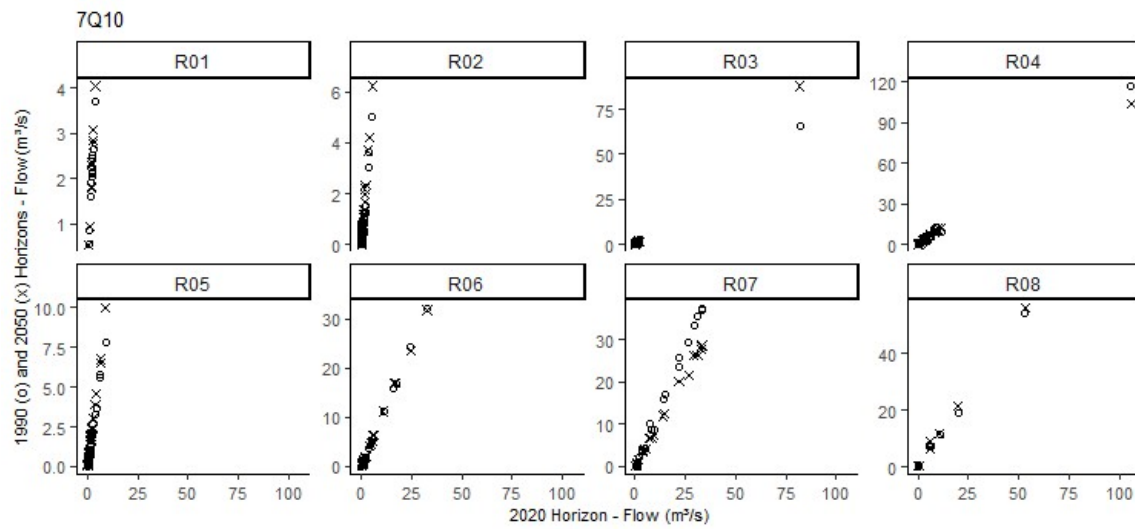
* Ce graphe vaut aussi pour 70%LQ50-S

Winter

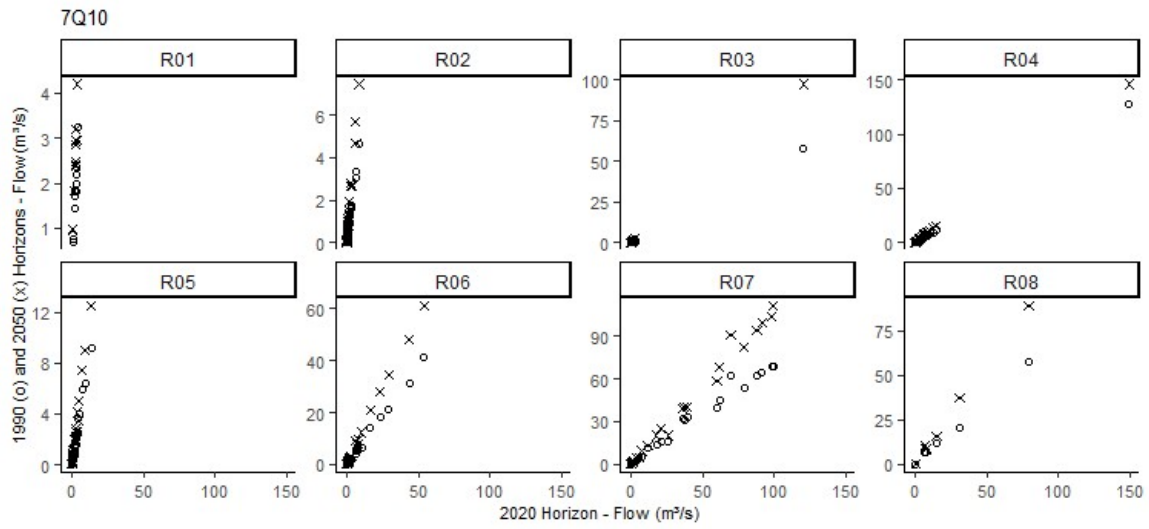


* Ce graphe vaut aussi pour 70%LQ50 - W

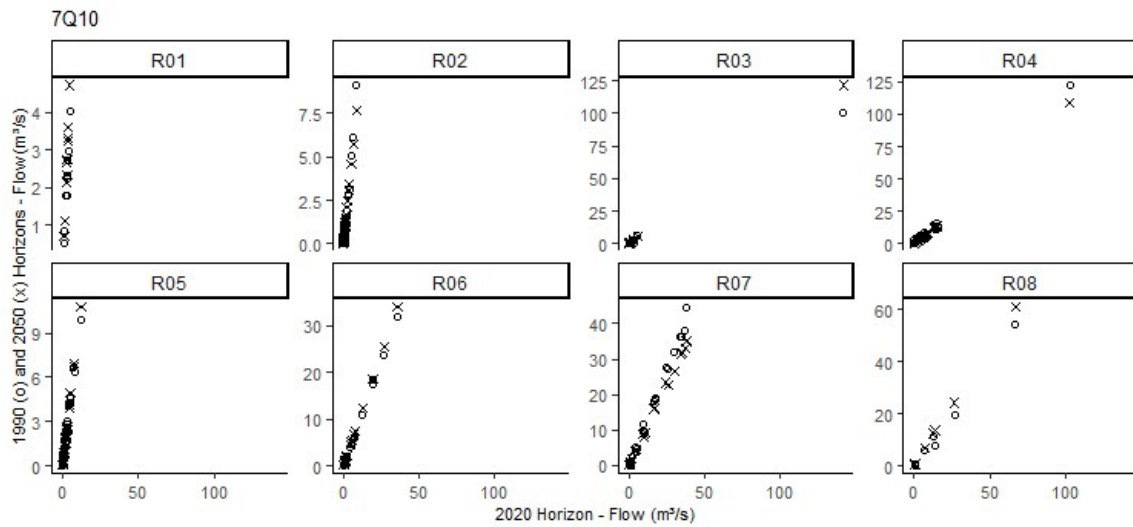
Inter-annual



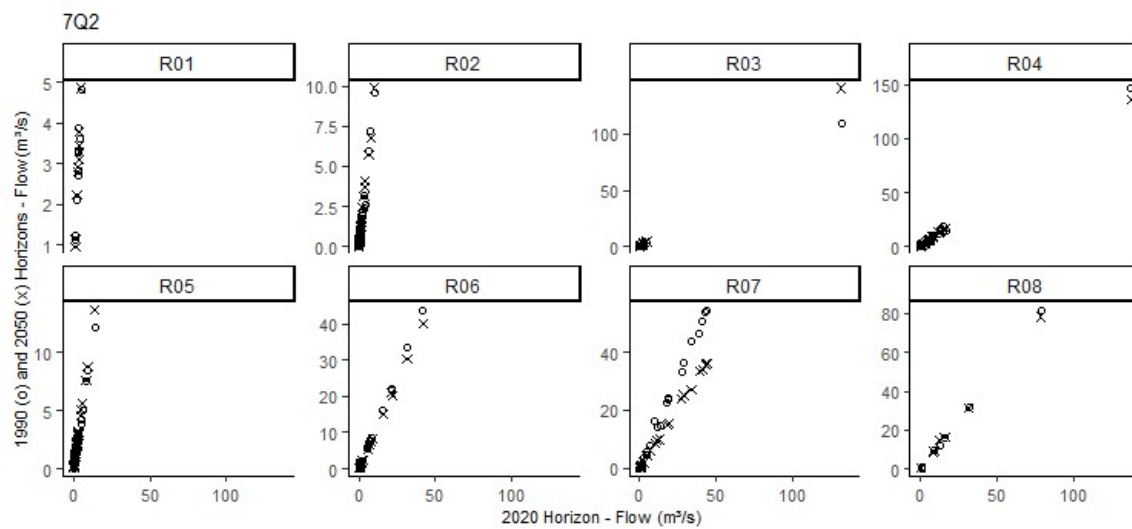
Summer



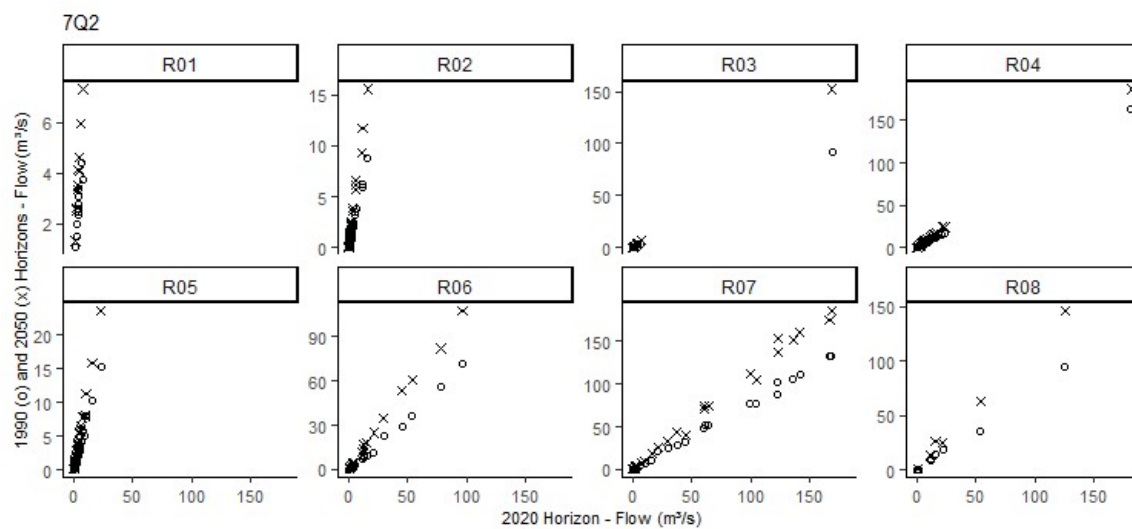
Winter



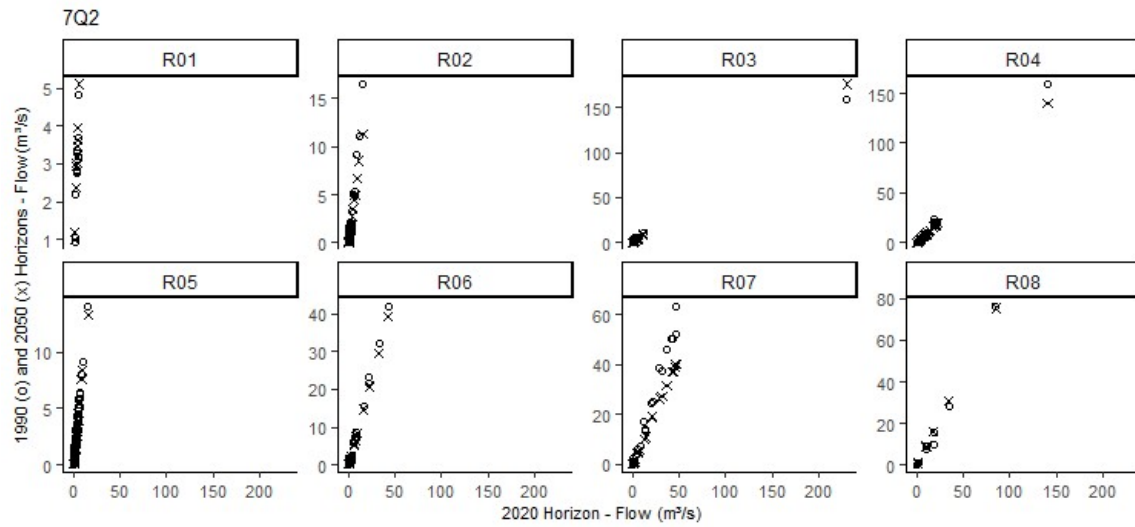
Inter-annual



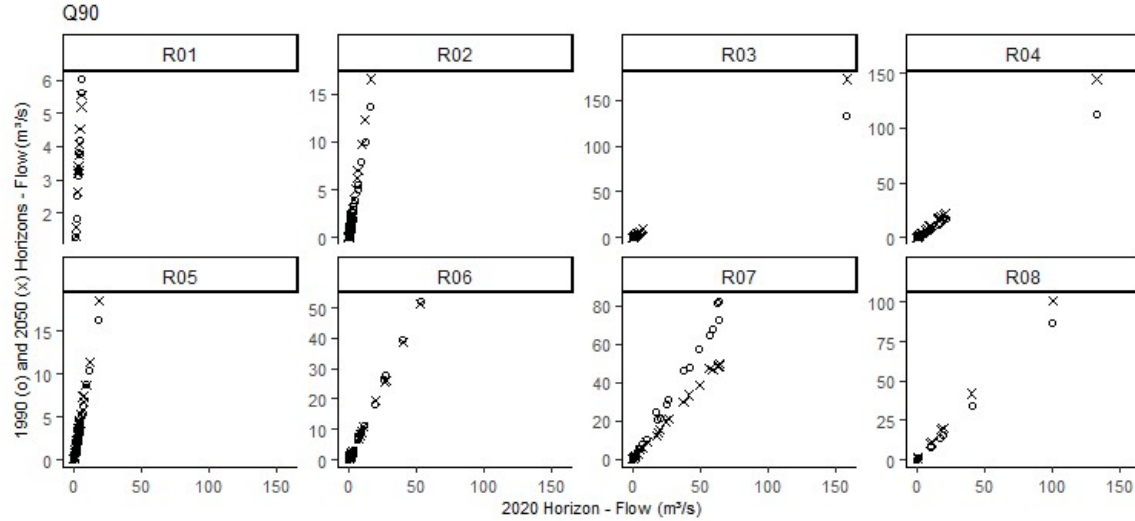
Summer



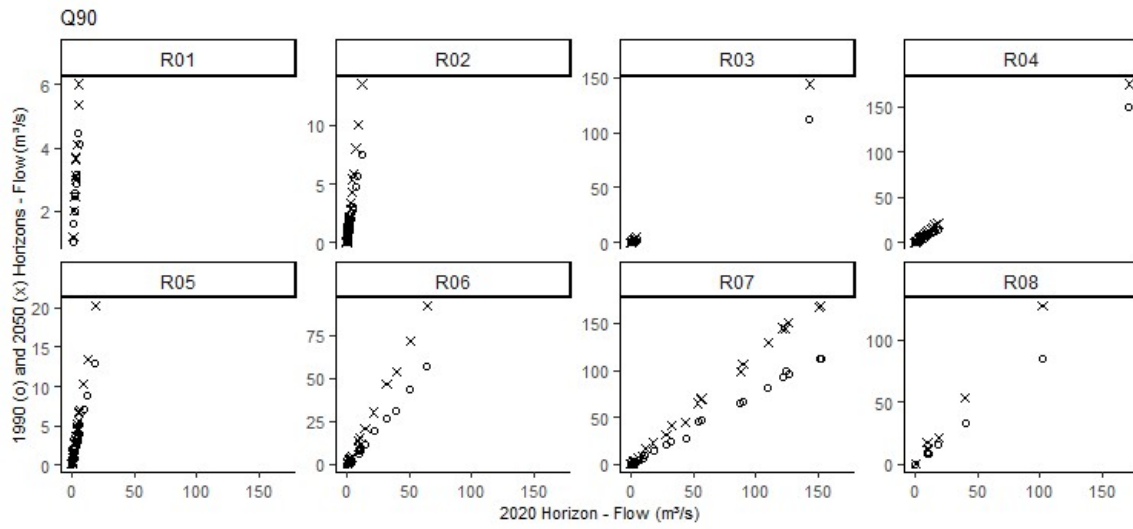
Winter



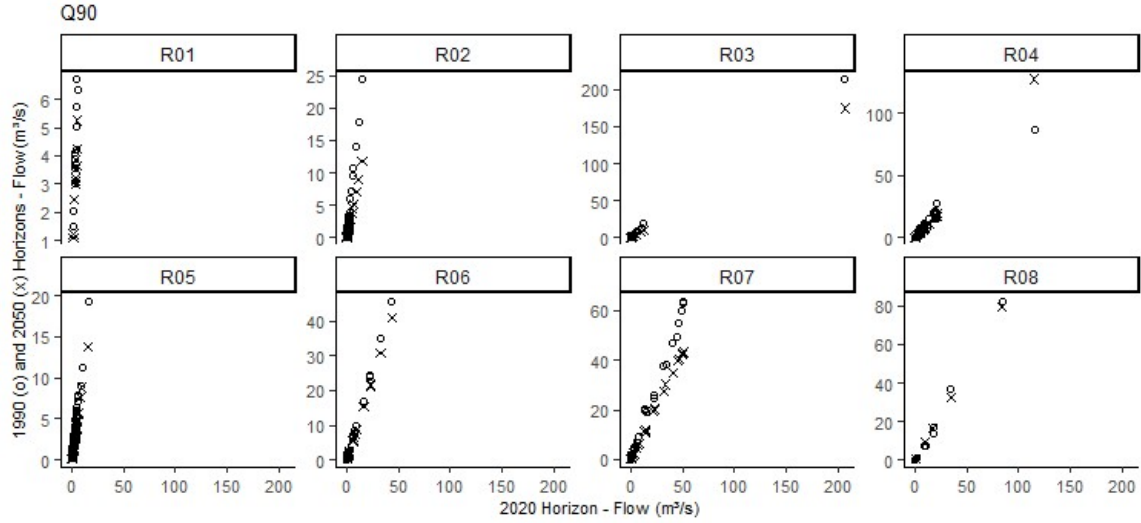
Inter-annual



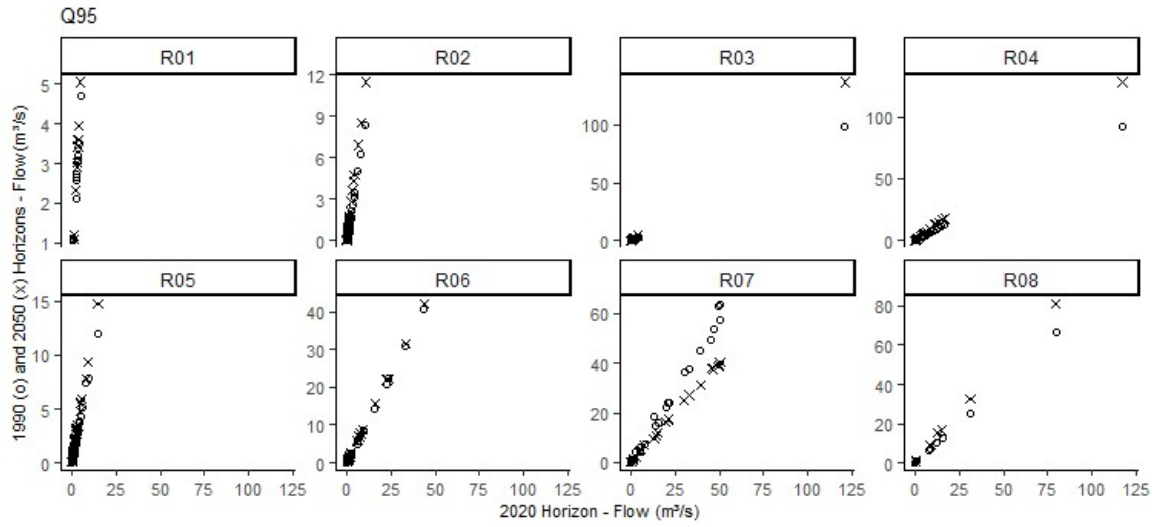
Summer



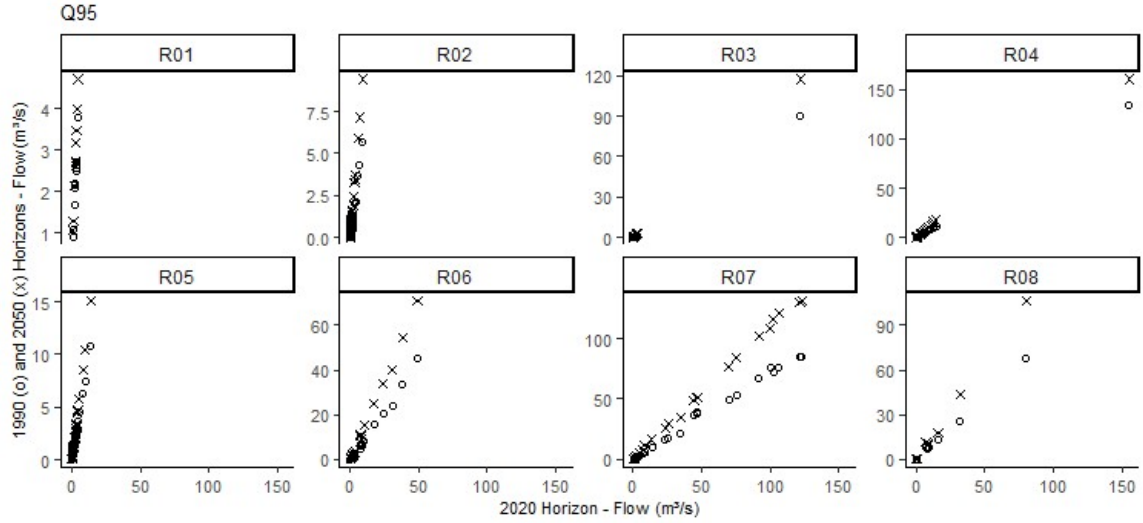
Winter



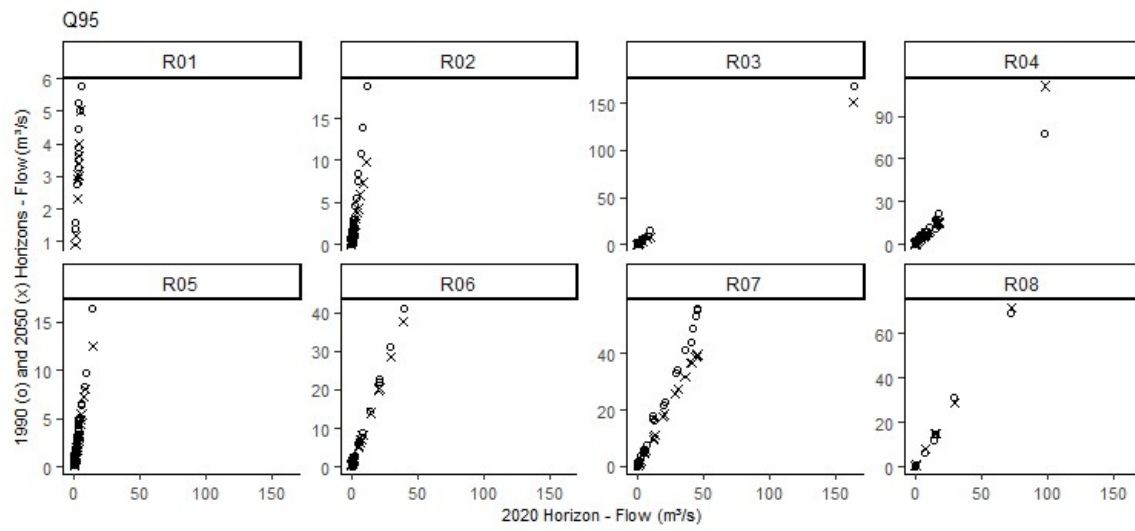
Inter-annual



Summer



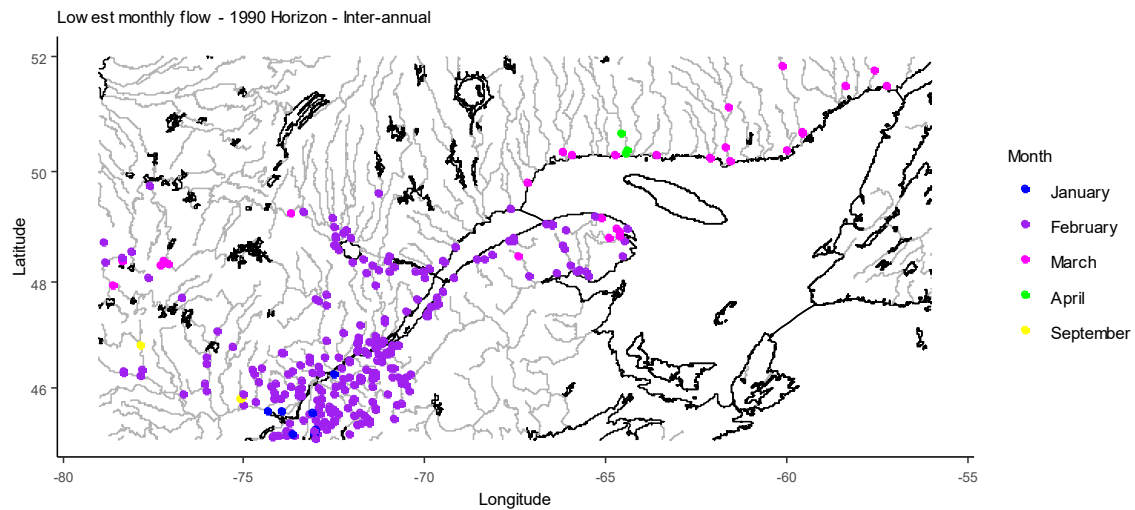
Winter



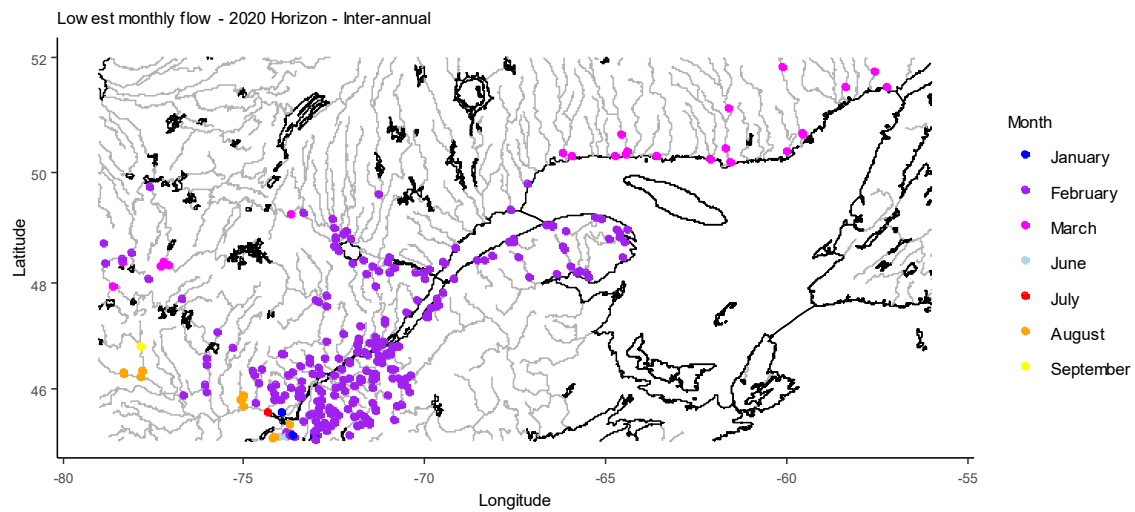
ANNEXE 6

Cartographie et évolution des mois aux plus faibles débits.

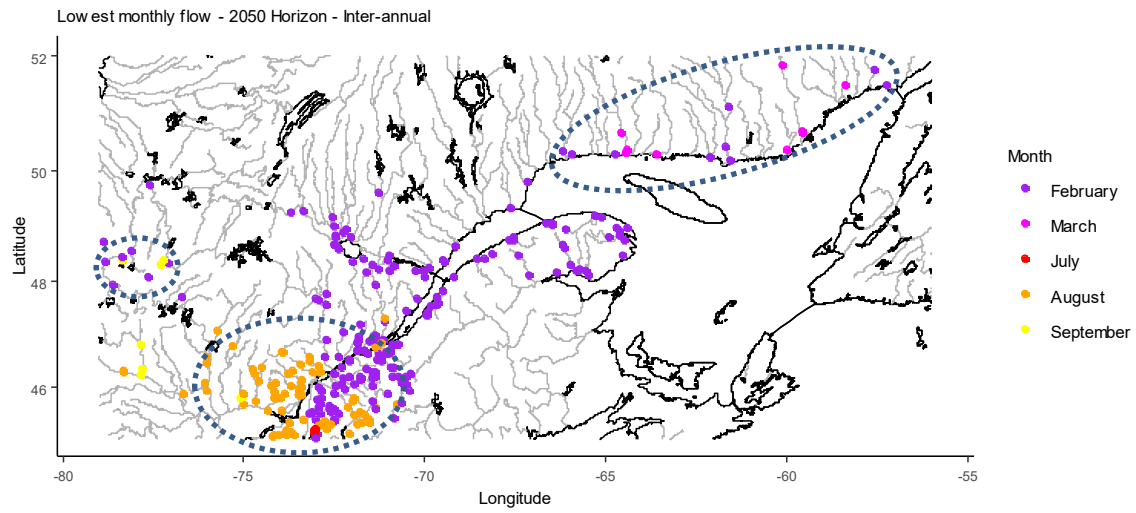
Horizon 1990 – Interannuel



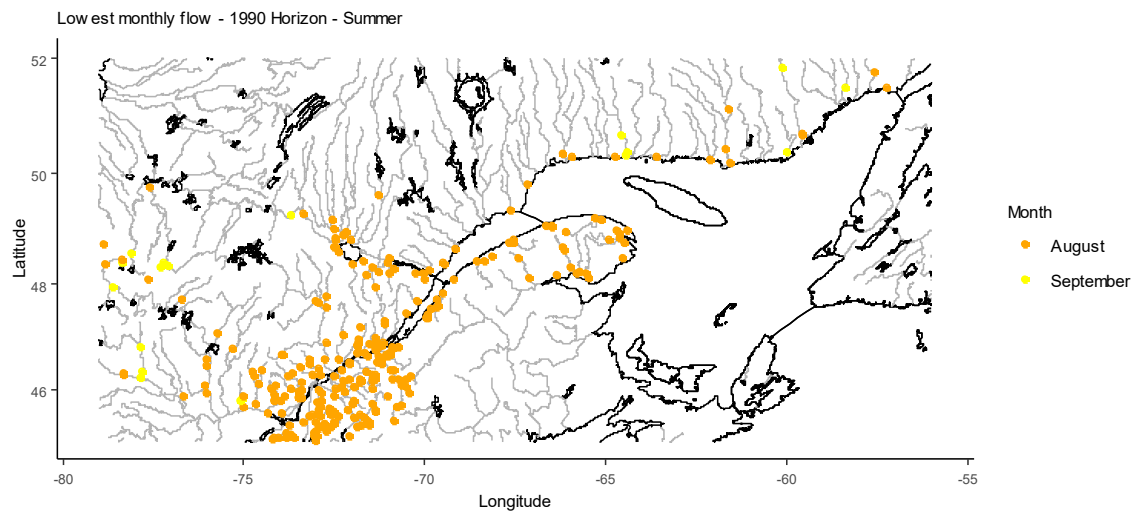
Horizon 2020 – Interannuel



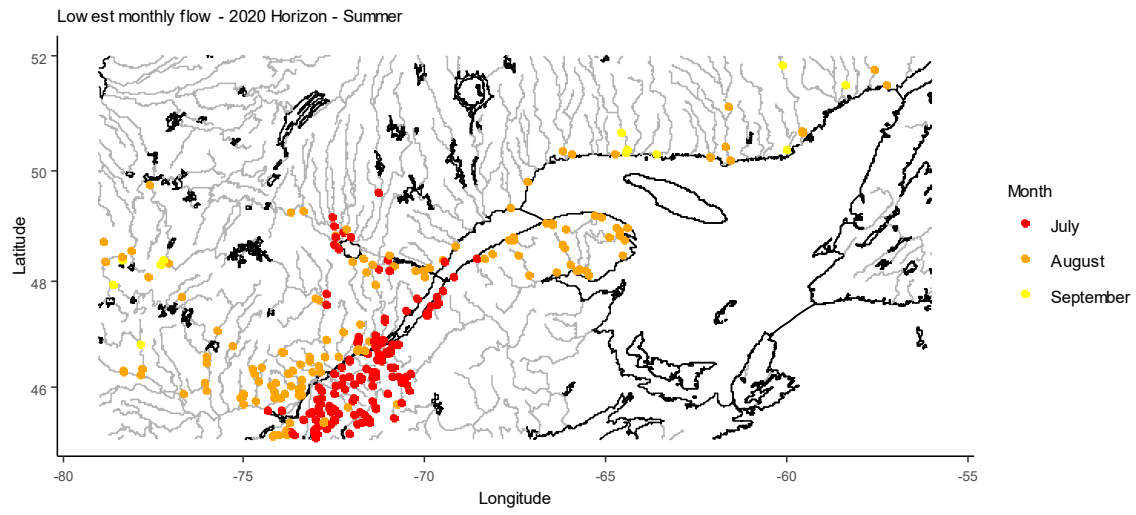
Horizon 2050 – Interannuel



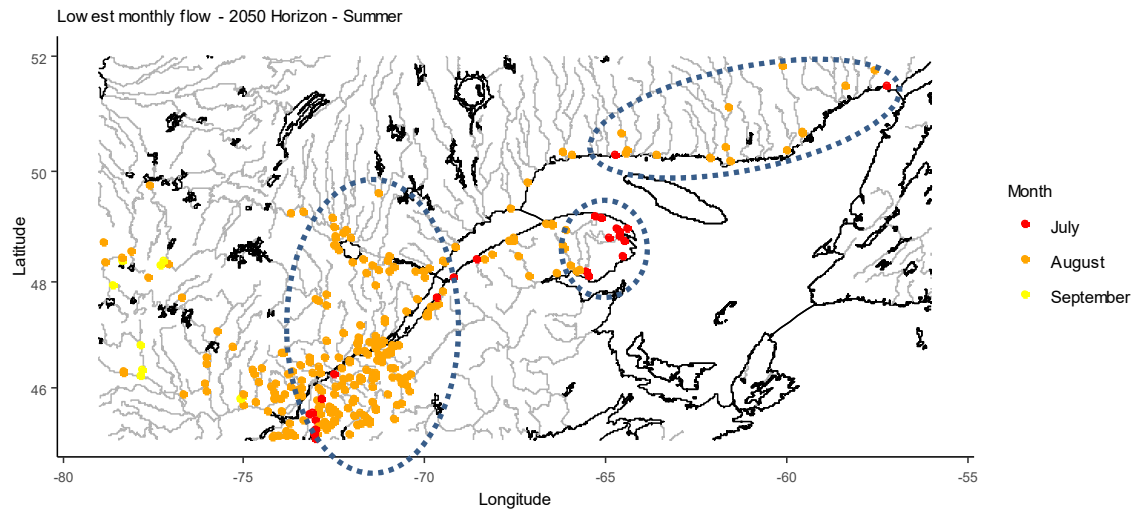
Horizon 1990 – Été



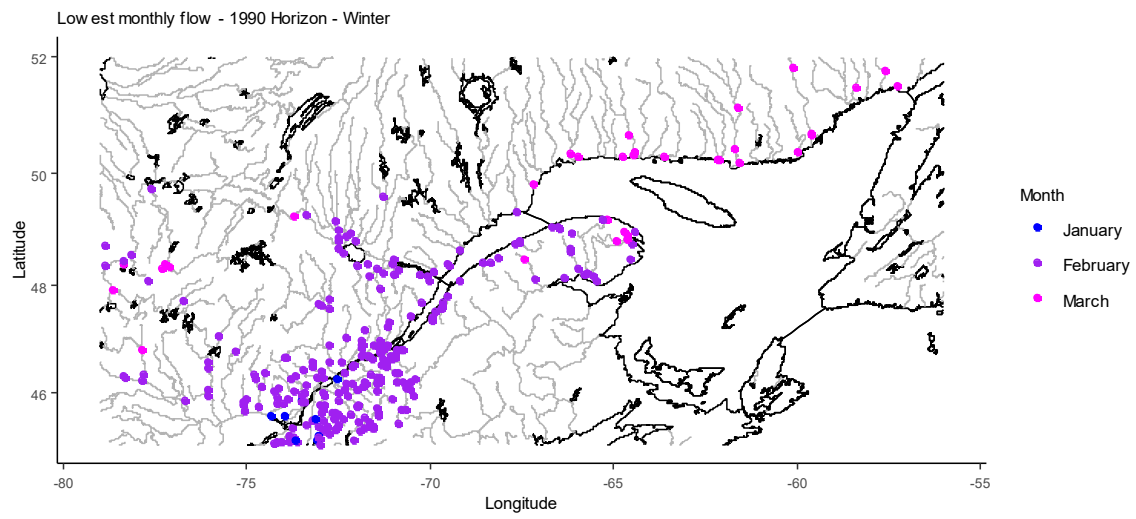
Horizon 2020 – Été



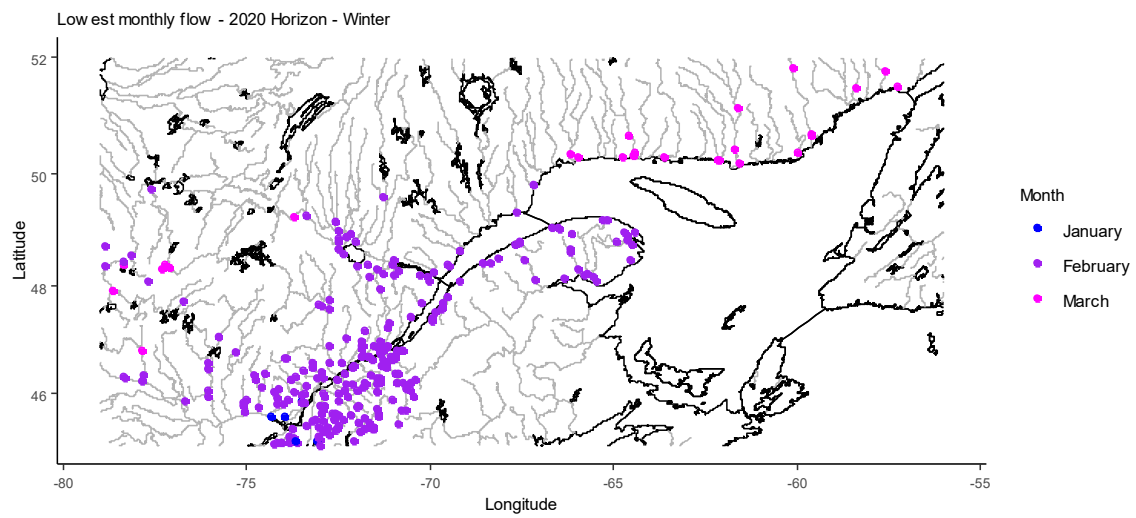
Horizon 2050 – Été



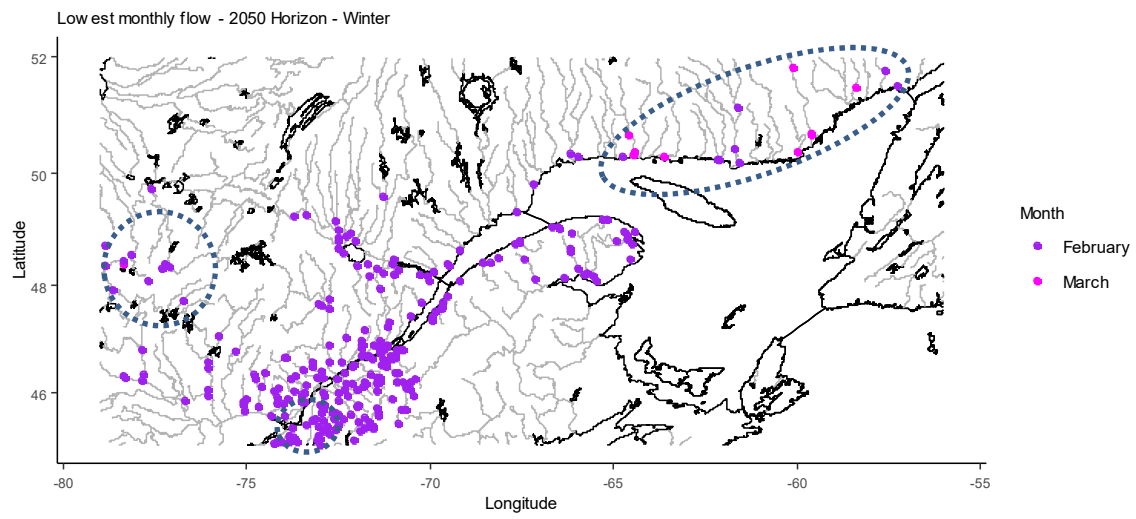
Horizon 1990 – Hiver



Horizon 2020 – Hiver



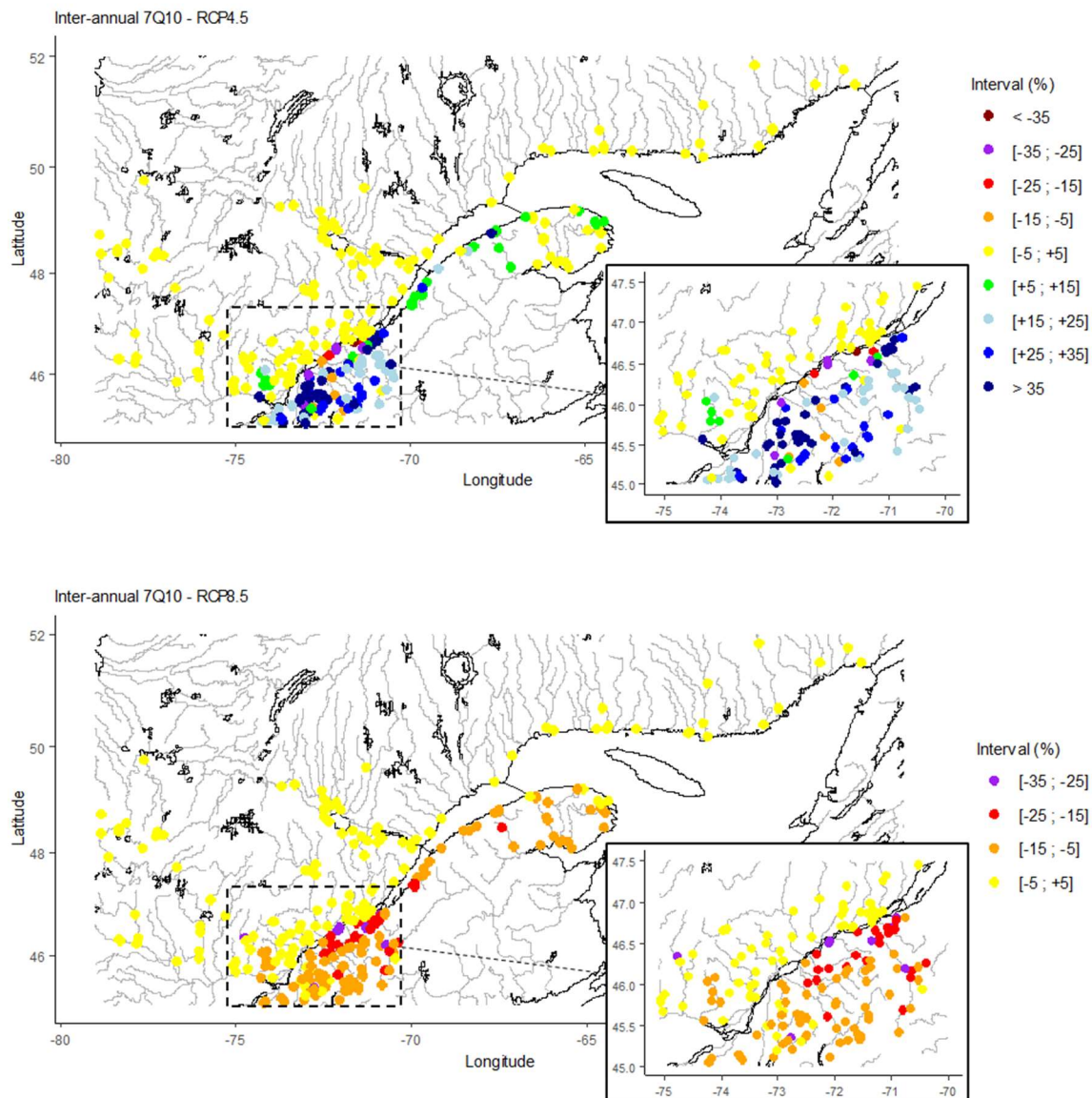
Horizon 2050 – Hiver



ANNEXE 7

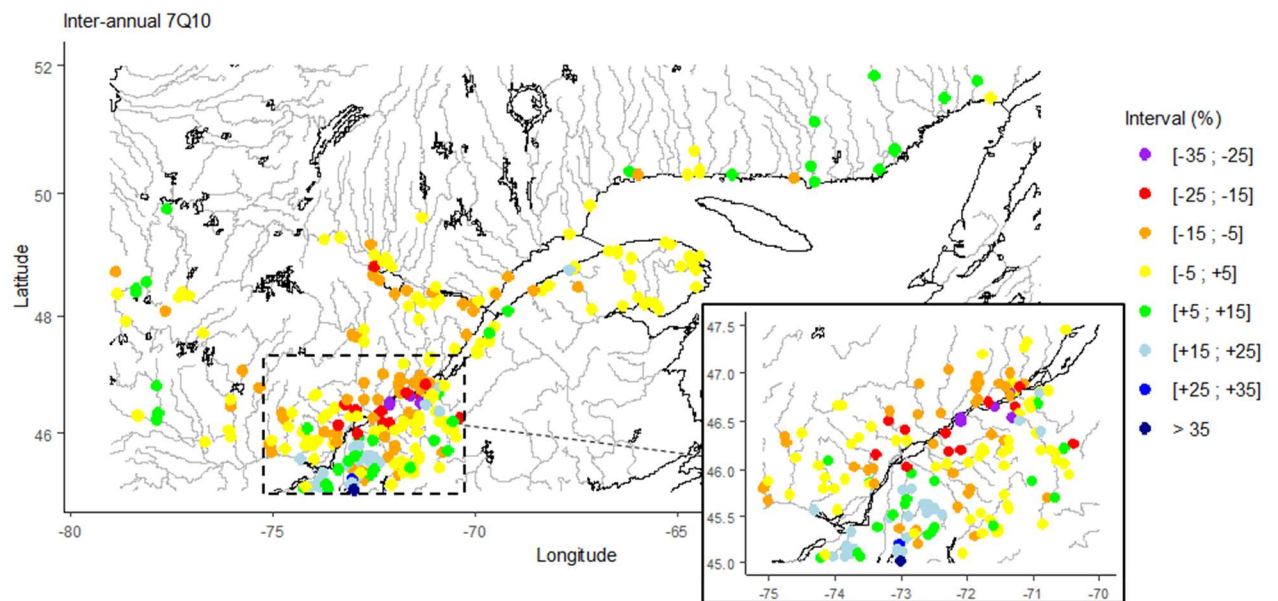
L'évolution des débits entre 2020 et 2050 (moyenne des différences en %) pour six débits environnementaux : 7Q2, 7Q10, Q90, Q95, LQ50, AQ50 et trois temporalités (interannuel, estival et hivernal). Les différences pour LQ50 et AQ50 valent pour 70%LQ50 et 70%AQ50. Les cartes sont faites pour les six scénarios RCP4.5 (optimiste) et RCP8.5 (pessimiste) réunis. Séparément, les résultats sont difficiles à interpréter.

Exemple du 7Q10 interannuel si les scénarios RCP4.5 (haut) et RCP8.5 (bas) sont séparés.

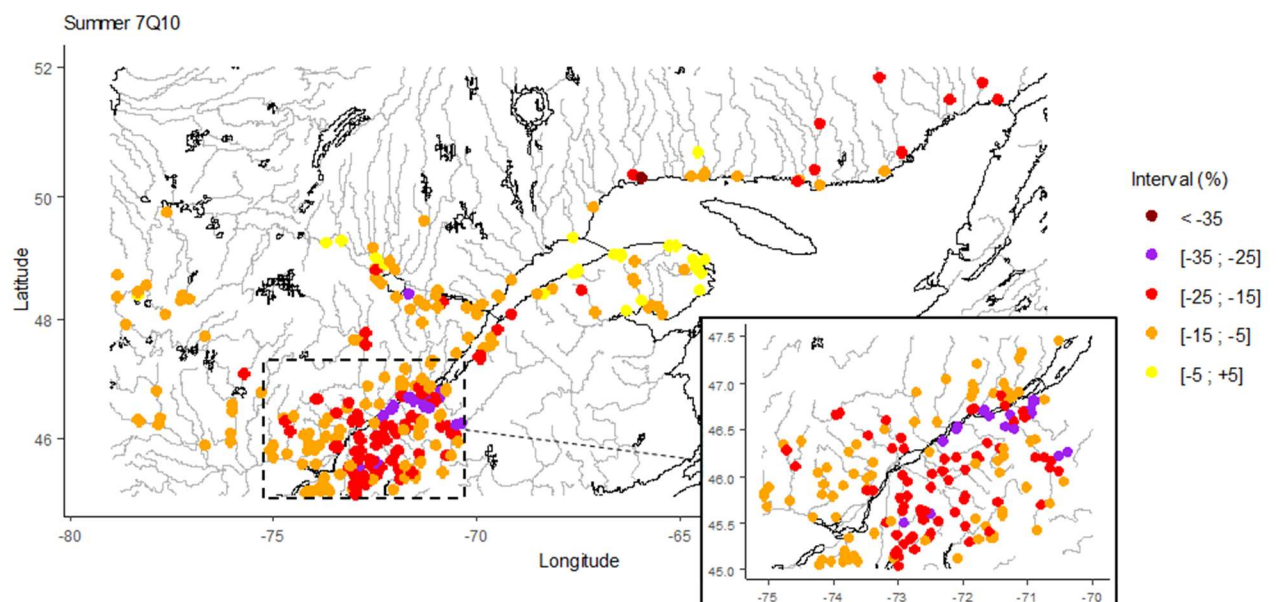


7Q10

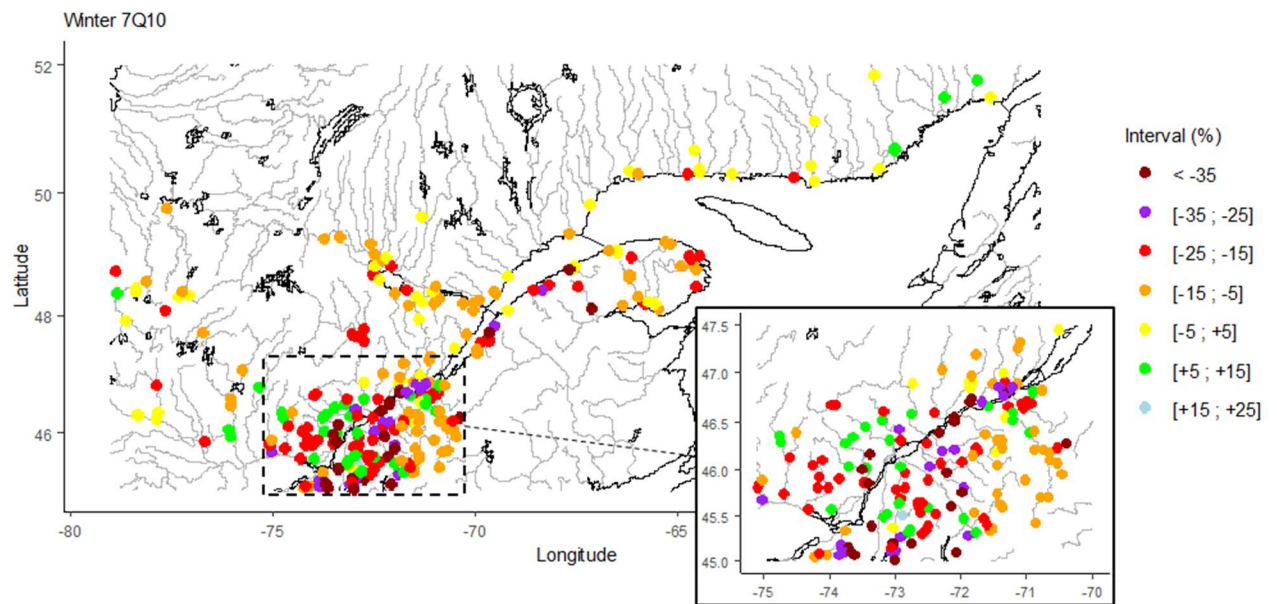
Interannuel



Été

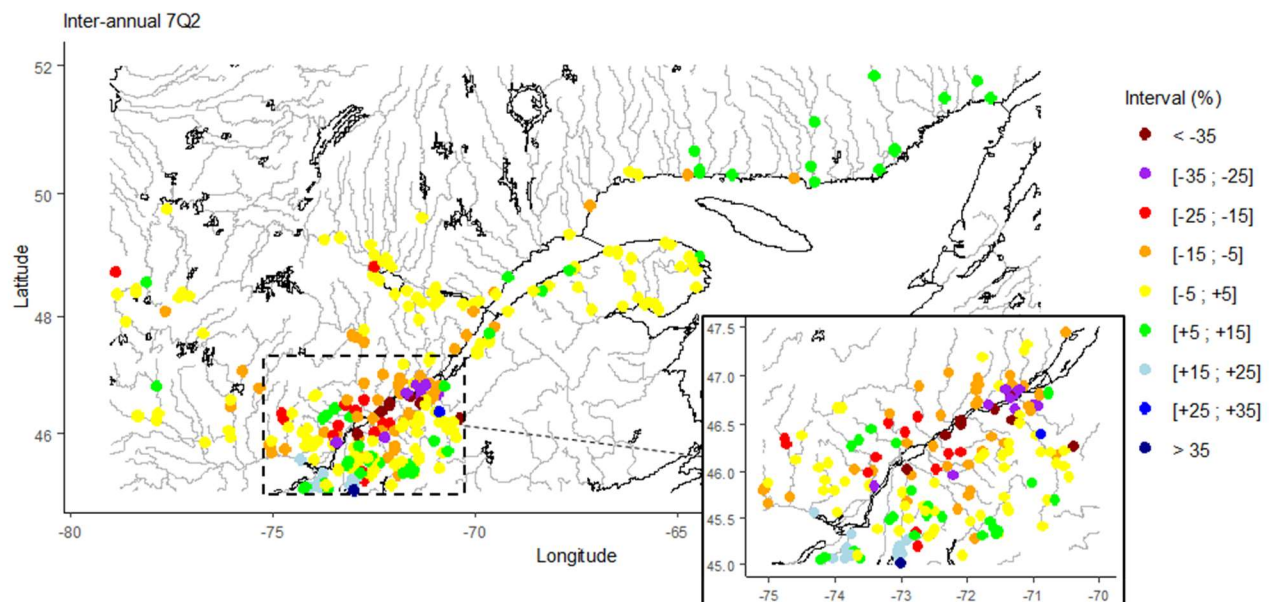


Hiver

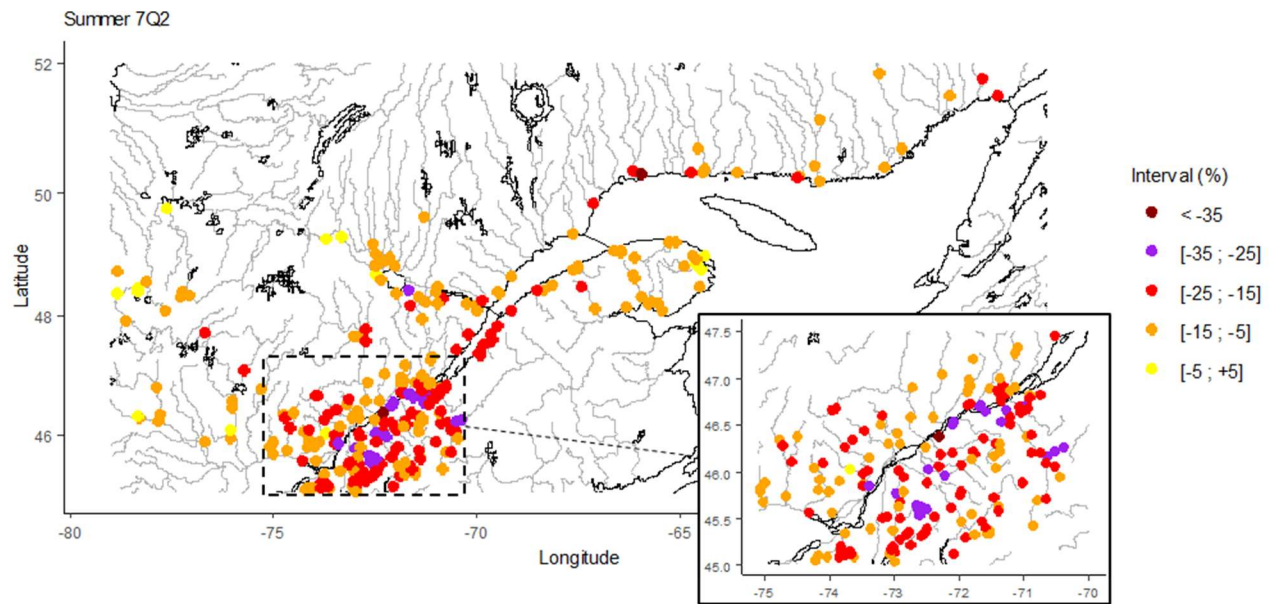


7Q2

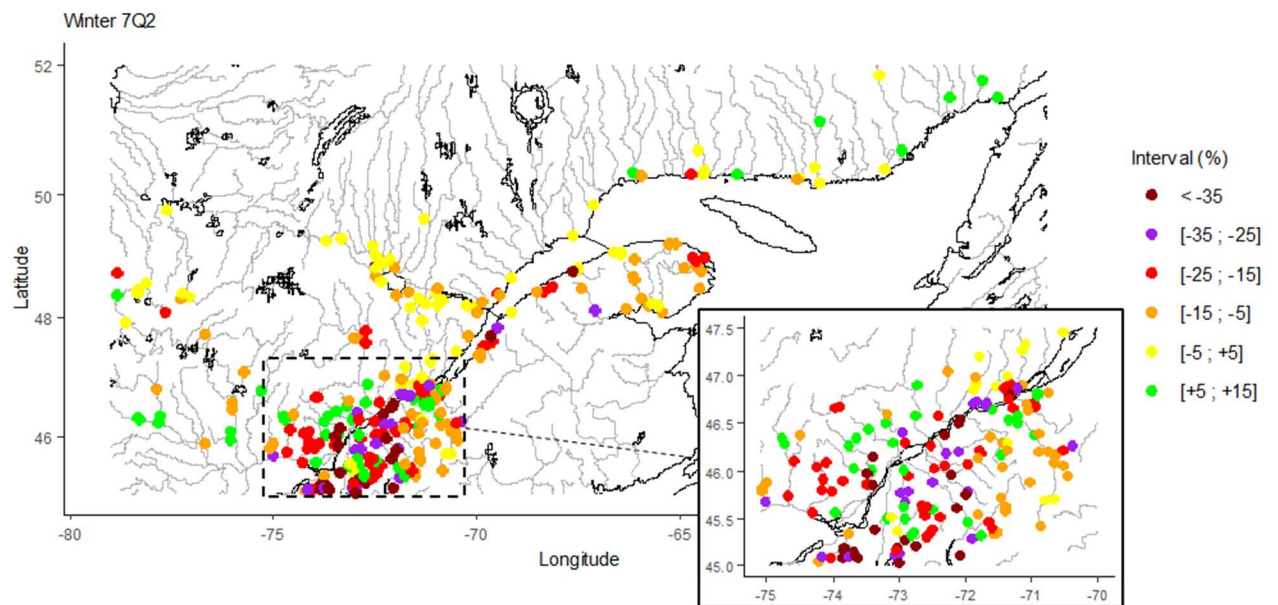
Interannuel



Été

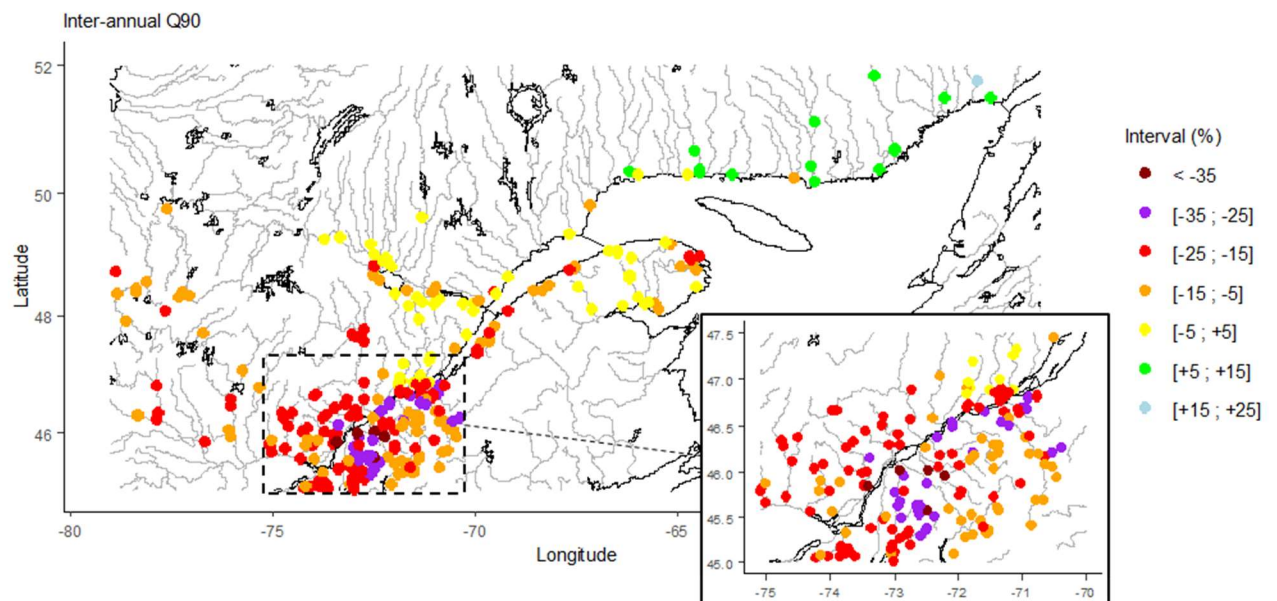


Hiver

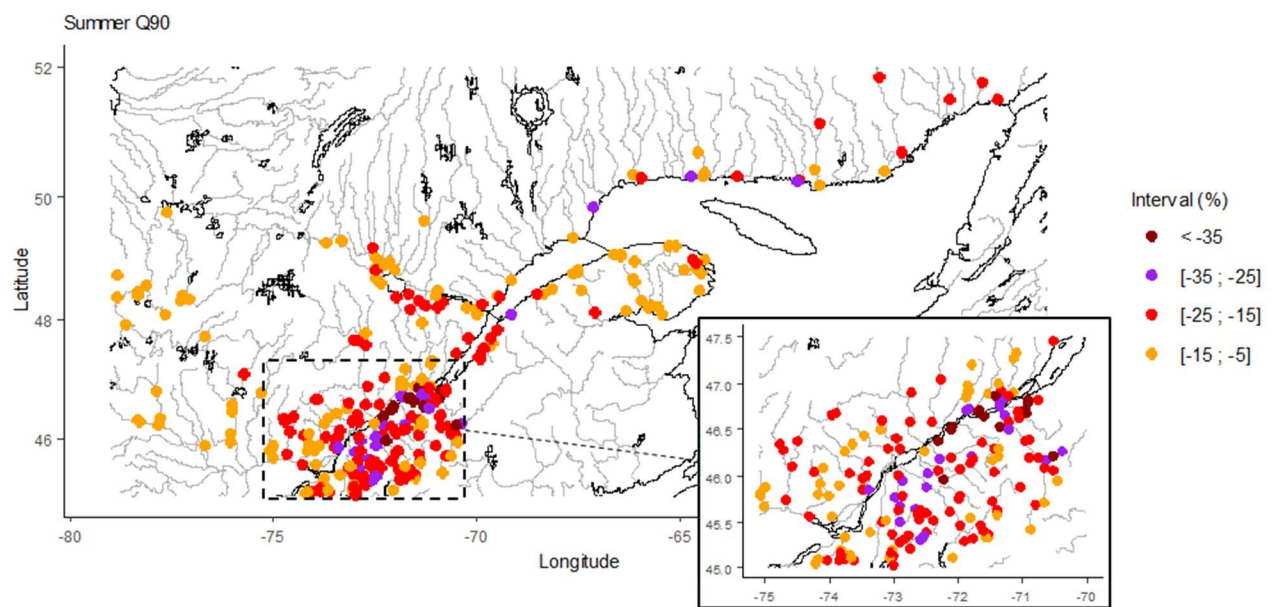


Q90

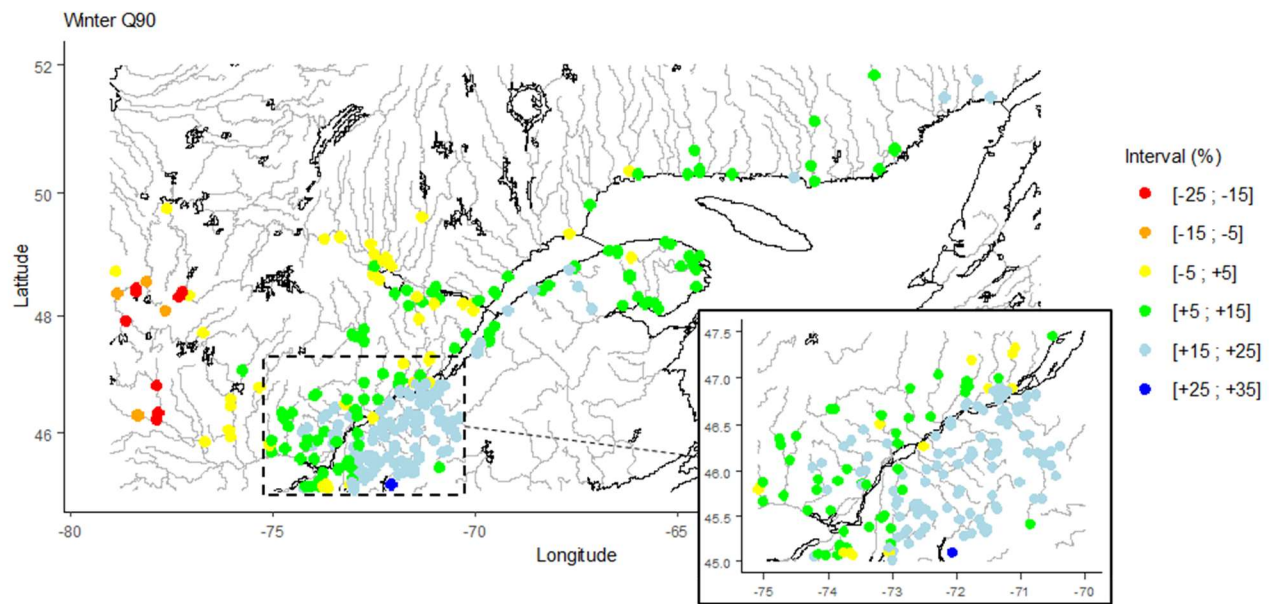
Interannuel



Été

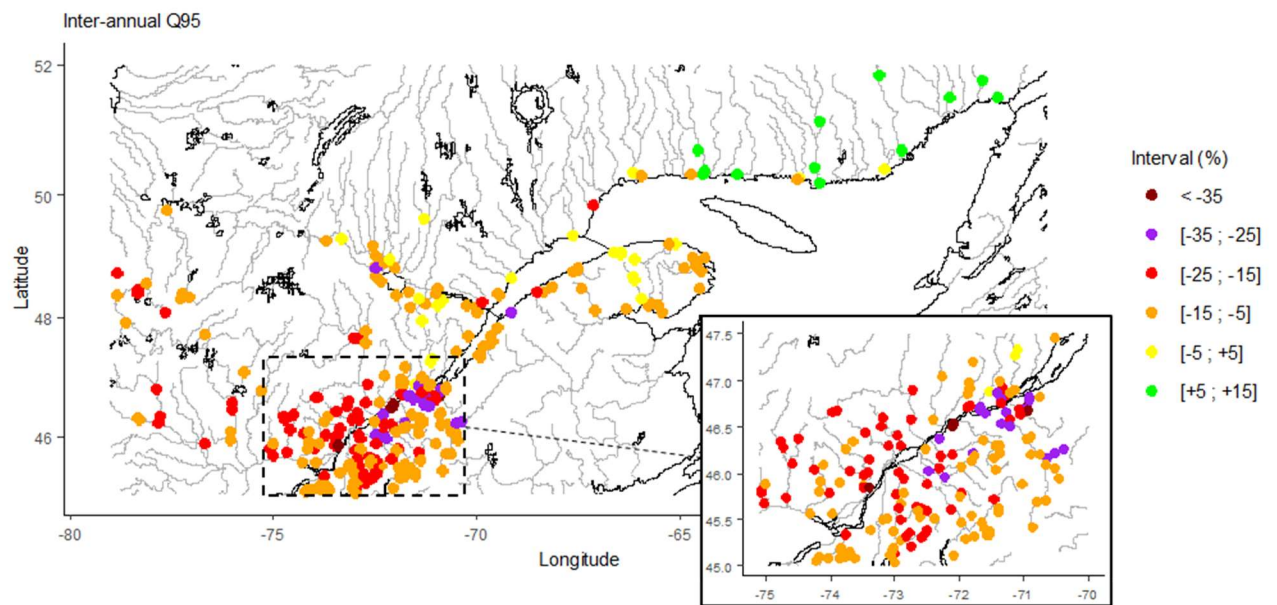


Hiver

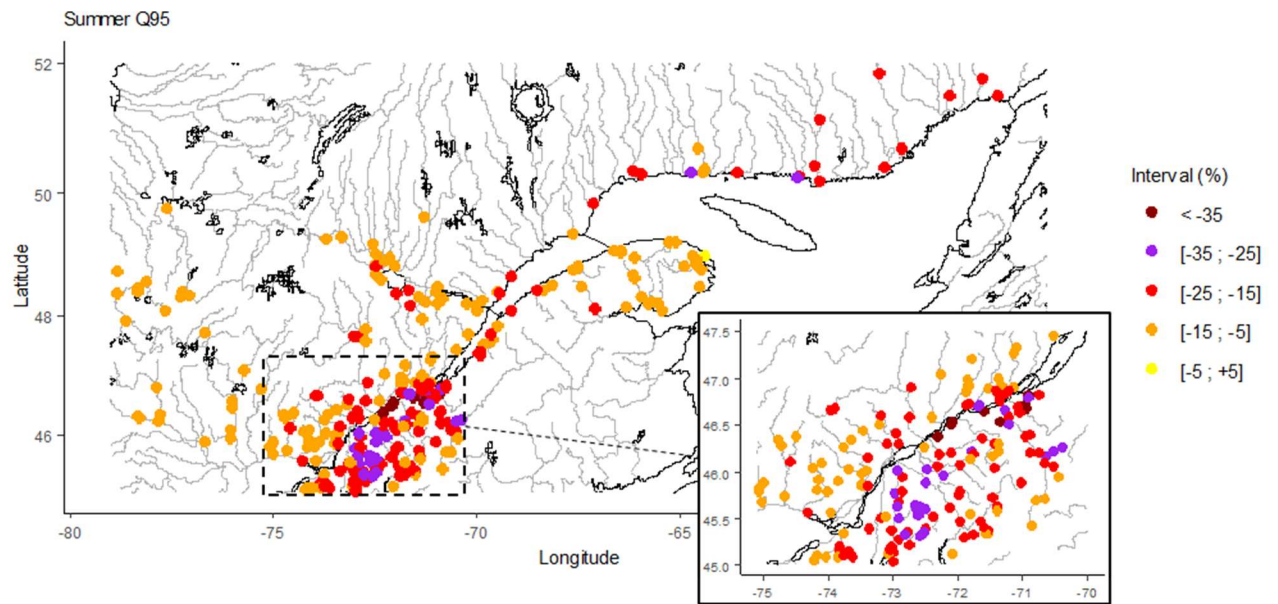


Q95

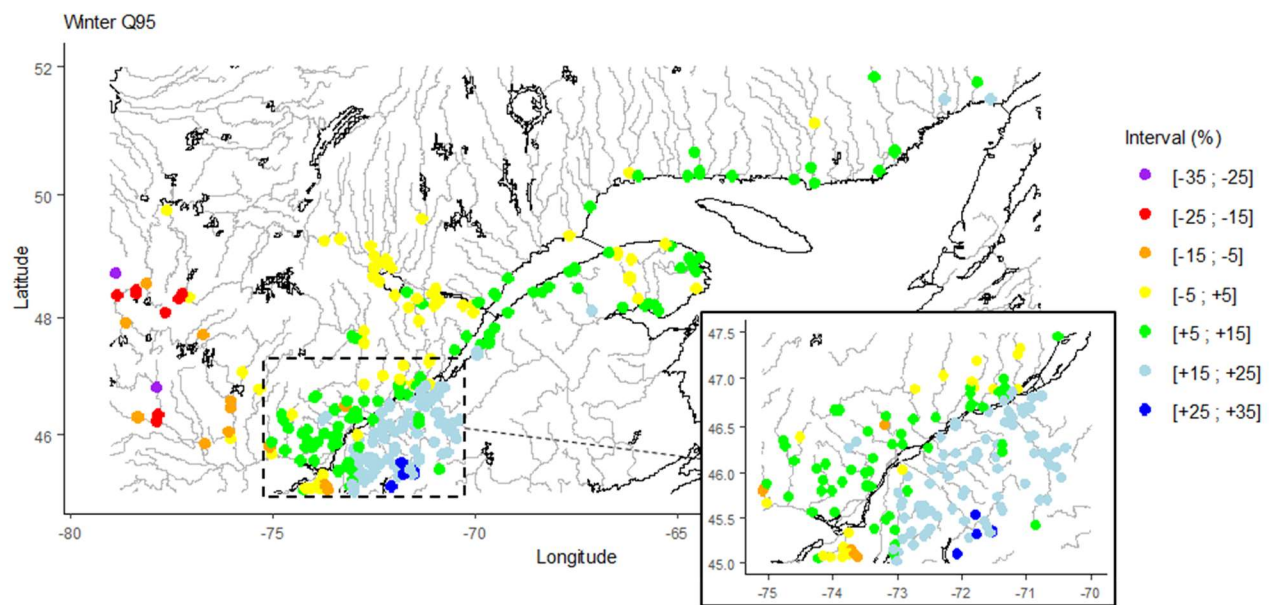
Interannuel



Été

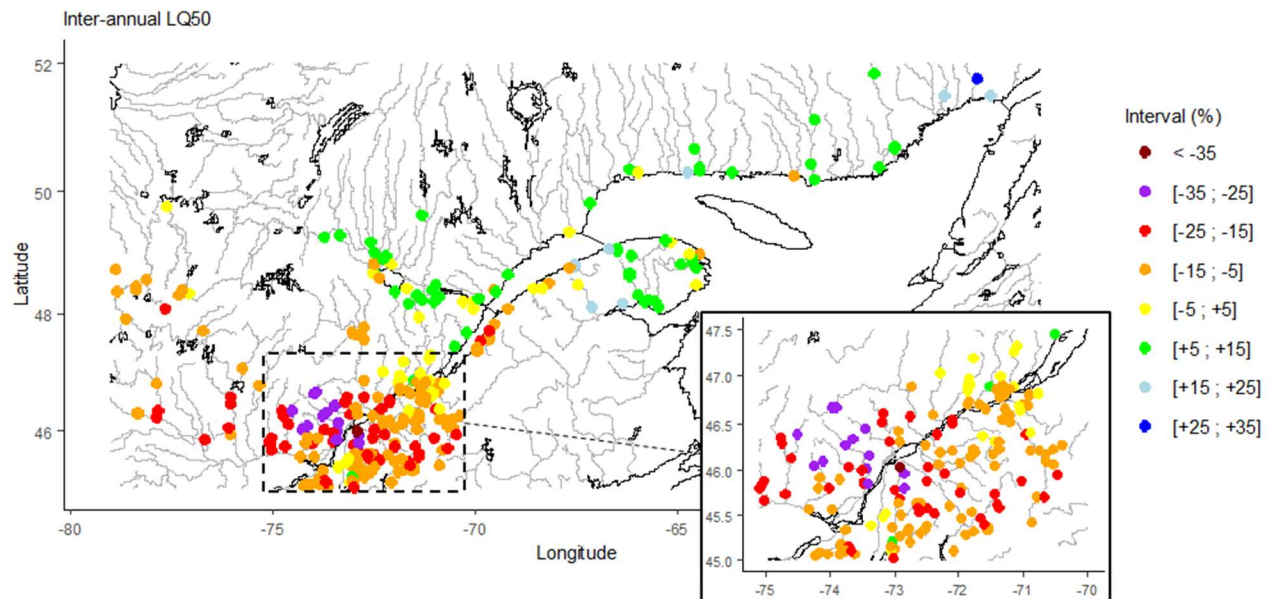


Hiver

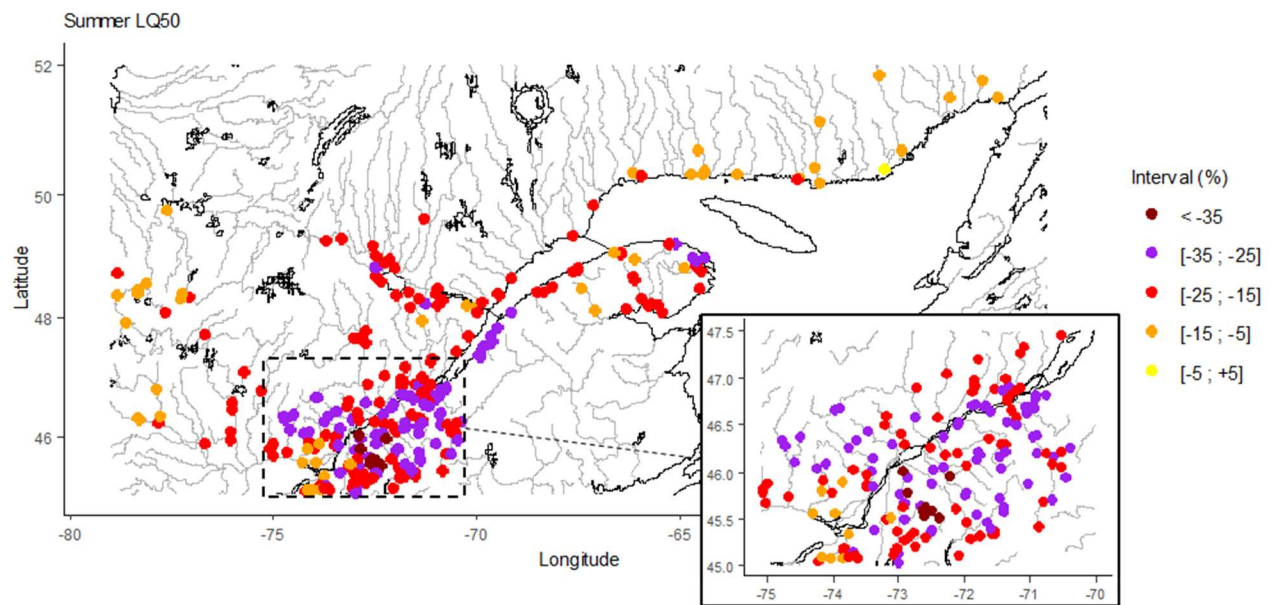


LQ50

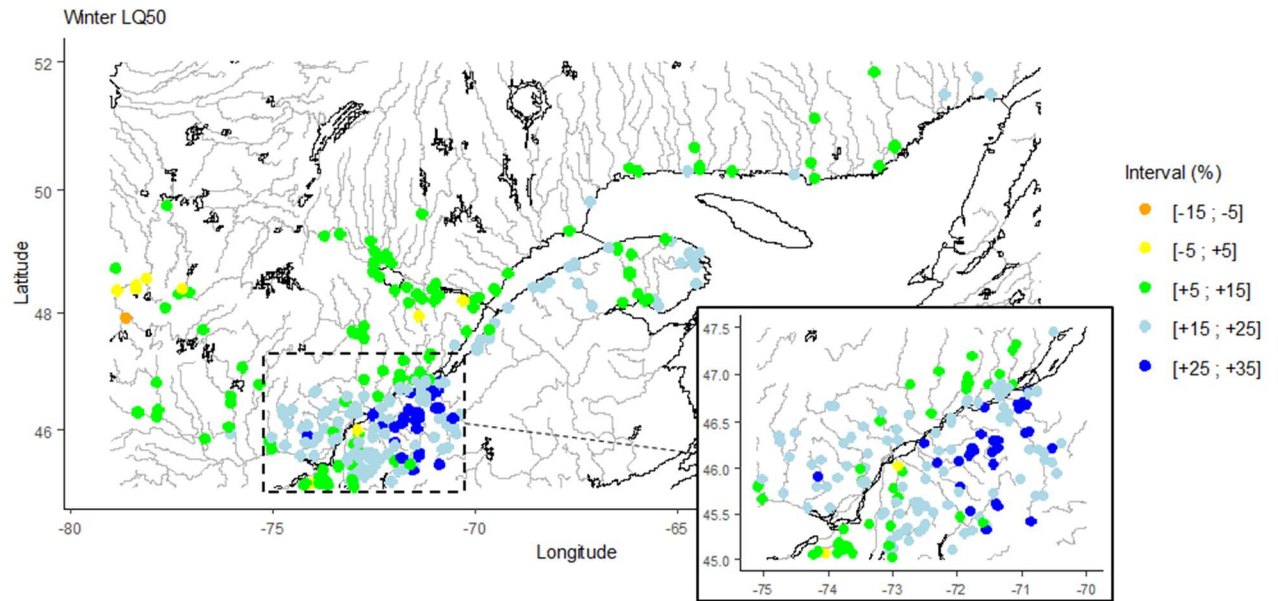
Interannuel



Été



Hiver



AQ50

