

**COMPARAISON DES MÉTHODES D'ESTIMATION DES DÉBITS
ENVIRONNEMENTAUX DANS DES CONTEXTES HYDROLOGIQUES
ET CLIMATIQUES ACTUELS ET FUTURS – CAS DU QUÉBEC
MÉRIDIONAL**

Par
Laureline Berthot

Thèse présenté(e) pour l'obtention du grade de
Philosophiae Doctor (Ph.D.)
en Sciences de l'Eau

Jury d'évaluation

| | |
|---|---|
| Président du jury et examineur interne | Alain N. Rousseau INRS-ETE |
| Examineur externe | Rebecca E. Tharme River futures |
| Examineur externe | Ali Assani Université du Québec à Trois-Rivières |
| Directeur de recherche | André St-Hilaire INRS-ETE |
| Codirecteur de recherche | Nassir El-Jabi Université de Moncton |
| | Daniel Caissie Pêches et Océans Canada |

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de thèse, André St-Hilaire, pour ce sujet, sa disponibilité, son encadrement, son soutien et sa compréhension. Dans le même élan, un grand merci à mes deux co-directeurs Daniel Caissie et Nassir El-Jabi, pour avoir accepté de m'encadrer, partagé leurs connaissances et expériences. Merci à vous trois pour votre bienveillance durant ces quatre années. Je souhaite remercier chaleureusement Judith Kirby pour avoir proposé ce sujet de thèse, Jean-François Cyr, François Larouche-Tremblay, Sébastien Ouellet-Proulx et toutes les personnes du ministère rencontrées au début et en cours de thèse, pour nos échanges constructifs et vos idées. Merci Judith Kirby et Sébastien Ouellet-Proulx pour vos relectures. Je remercie aussi Alain Rousseau, Stéphane Savary, Étienne Foulon et Eduardo Spolidorio pour leurs contributions dans mon exploration d'HYDROTEL. Merci à Sophie Duchesne et Ali Assani d'avoir évalué mon examen doctoral. Merci à mon jury de thèse d'avoir accepté de réviser mes travaux et à Rebecca Tharme d'avoir rejoint le jury et proposé une relecture très approfondie et enrichissante de mes travaux.

Merci aux membres des équipes d'hydrologie de l'INRS pour nos échanges et mes salutations aux personnes croisées qui m'ont soutenu et aidé à leur façon. Je pense à Julien Augas, Laurie Caillouet (mon R-Sensei), Hermine Bétis, Dorra Hammami, Habiba Ferchichi et Amina Msilini pour m'avoir entraîné à mon oral d'examen doctoral et encouragé, Saadi Al Mahdi, Véronique Dubos, Khawla Riahi, Mostafa Khorsandi, ainsi que celles et ceux dont j'ai croisé la route durant ces quatre années. Un merci particulier à Olivier Chimi-Chiadjeu, Claudine Boyer et Anik Daigle pour nos échanges et de m'avoir laissé l'accès à vos travaux. Merci aussi aux étudiants stagiaires qui m'ont prêté main forte sur le terrain, Rosie Morissette, Justin Moreault et Maxime Morel.

Ce serait tellement long d'énumérer toutes les personnes croisées à l'INRS, qui m'ont soutenu et qui ont éclairé mon parcours ! Rencontrées au 1316, en cours, à l'asso, dans les couloirs...ou lors d'une énième expédition engagée. Merci à Linda Lara-Jacobo, Elisabeth Viry, Oussama Affane, Ralph Tasing Kouom, Iliès Tebbiche, Aurélie Gicquel, Charlotte Fortin-Lecomte, Marc-Alexandre Fillion, Chaima Touati, Sophie Roberge, les Simones Sophie Dufour-Beauséjour et Valérie Plante Lévesque, Imad Touahar, Bharti Bhadana, Pier Paolo Comida, Aarthi Venkatesan, Laura Malbezin, l'équipe de Valérie Langlois, Harold Vigneault, Gilles Perrin... Une pensée pour

les membres des administrations du centre et générale, Linda Aubert, Jean-Daniel Bourgeault, Pascale Dion, Philippe-Edwin Bélanger, Hélène Linteau, Lise Couillard, merci pour nos échanges. Une pensée aussi pour celles et ceux croisés dans les comités et équipes que j'ai eu la chance de rejoindre durant ces quatre dernières années, à l'INRS, au centre ETE, à CentrEau, au Comité Intersectoriel Étudiant, à l'Immigrant & International Women in Sciences, à l'Espace Jeunes Femmes et à Chanterelle. Merci pour nos échanges enrichissants et votre confiance. Pour celles et ceux que je ne cite pas, je garderai un *petit sourire* de vous avec moi.

Ami(e)s, familles, amours, vous qui *m'avez chauffé le corps* comme chantait Brassens. Vous qui m'acceptez comme j'ai été, je suis, et serai, je vous aime de tout mon cœur.

Ma dernière pensée va vers mes collègues et amis de Dapaong, sans qui je n'aurai jamais pu sortir de mon cocon, apprendre de la vie et saisir les moments qui comptent,

« On est ensemble ».

RÉSUMÉ

Le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec s'intéresse à la question des débits environnementaux pour adapter sa gestion actuelle de l'eau en période d'étiage, et tenir compte des effets des changements climatiques. Les études sur les débits environnementaux et la protection des écosystèmes lotiques sont scientifiquement et politiquement plus avancées dans les autres provinces du Canada, et à l'international, par rapport au Québec. La question ici est fondamentale : comment limiter les prélèvements d'eau dans les rivières du Québec méridional pour protéger les écosystèmes lotiques tout en répondant aux demandes en eau ? Il y a quatre catégories de méthodes permettant de calculer les débits environnementaux : hydrologique, hydraulique, modèle d'habitat et exhaustive. La première catégorie, regroupant des métriques hydrologiques, s'appuie sur deux types d'analyses statistiques : descriptive et fréquentielle univariée. L'analyse fréquentielle est privilégiée dans les rivières du Québec méridional, pour limiter les prélèvements d'eau au cas par cas à un maximum de 15% du 7Q2 (débit minimum d'une moyenne mobile de sept jours et une période de retour de deux ans) durant les périodes d'étiage. Cette méthode est appliquée en considérant l'effet cumulatif des prélèvements d'eau en amont du cours d'eau pour ne pas prélever plus que la valeur de débit associée au 7Q2, qui n'est donc pas un débit plancher. Les débits environnementaux étant des débits plancher à maintenir dans une rivière, cette thèse a les objectifs suivants : (1) Comparer différentes métriques hydrologiques pouvant être actuellement appliquée à un territoire de 730 000 km² pour protéger et maintenir les écosystèmes lotiques ; (2) Étudier la possibilité de combiner une méthode hydrologique avec une méthode hydraulique, le périmètre mouillé ; (3) Analyser les effets des changements climatiques en comparant les résultats des méthodes hydrologiques et hydraulique pour des contextes hydrologiques actuels et futurs, à l'aide de scénarios de changement climatique. Les résultats montrent que les métriques hydrologiques choisies pour calculer les débits environnementaux doivent être sélectionnées pour une échelle régionale et une temporalité saisonnière ciblant la période d'étiage souhaitée. Le périmètre mouillé s'est révélé être une méthode hydraulique appropriée comme indicateur de la disponibilité physique des habitats dans les rivières aux plus faibles modules, associées aux plus petits bassins versants étudiés. Enfin, tenir compte des effets du changement climatique implique d'avoir une gestion des débits d'étiage s'adaptant aux contextes hydrologiques variés.

Mots-clés : Débits environnementaux, Québec méridional, échelle temporelle, échelle spatiale, régions hydrologiques, débits d'étiage, périmètre mouillé, protection des écosystèmes lotiques, politique de partage de l'eau, changements climatiques, analyse fréquentielle.

ABSTRACT

The Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change is addressing the issue of environmental flows to adapt its current water management during low-flow periods, and to take into account the effects of climate change. Studies on environmental flows and the protection of river ecosystem are more scientifically and policy advanced in other Canadian provinces, and internationally, than in Quebec. The question here is basic: how can water withdrawals from rivers in southern Quebec be limited to protect river ecosystem while meeting water demands? Four categories of methods exist for calculating environmental flows: hydrological, hydraulic, habitat simulation and holistic. The first category is based on hydrological metrics, which can be separated into two types of statistical analysis: descriptive and univariate frequency. Frequency analysis is currently favoured in the rivers of southern Quebec, in order to limit water withdrawals on a case-by-case basis to a maximum of 15% of the 7Q2 flow metric (minimum flow of a seven-day moving average and two-year return period) during low water periods. This hydrological method is applied by considering the cumulative effect of water withdrawals in the upstream part of the river, so as not to withdraw more than the flow value associated with 7Q2, which is therefore not a minimum flow to maintain in the river. Based on the fact that environmental flows are about flow thresholds to maintain in a river, this thesis has the following objectives, to: (1) compare different flow metrics that can be used currently as a hydrological method applied to a territory of 730,000 km² to protect and maintain river ecosystem; (2) study the possibility of combining a hydrological method with a hydraulic method, the wetted perimeter; and (3) analyse the effects of climate change by comparing the results of hydrological and hydraulic methods in a current and future hydrological contexts using climate change scenarios. Results showed that the hydrological metrics used to define environmental flows should be selected at a regional scale and a seasonal time scale focused on the low flow period of interest. The wetted perimeter was found to be a good indicator of physical availability of habitats in the rivers with the lowest average flows, and associated with the smallest catchments studied. Finally, taking into account the effects of climate change implies that the management of low flows water must be able to be adjusted to the hydrological contexts as and when required.

Keywords : Environmental flows, southern Quebec, temporal scale, spatial scale, low flows, hydrological regions, wetted perimeter, river ecosystem protection, water sharing policy, climate change, frequency analysis.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-------------|
| REMERCIEMENTS | III |
| RÉSUMÉ | V |
| ABSTRACT | VII |
| TABLE DES MATIÈRES | IX |
| LISTE DES FIGURES | XIII |
| LISTE DES TABLEAUX | XV |
| LISTE DES ABRÉVIATIONS | XVII |
| 1 INTRODUCTION | 21 |
| 1.1 MISE EN CONTEXTE | 21 |
| 1.1.1 <i>Débits environnementaux et méthode de concertation</i> | 21 |
| 1.1.2 <i>Gestion de l'eau en période d'étiage au Québec et incertitudes quant à la protection des écosystèmes lotiques</i> | 21 |
| 1.1.3 <i>Problématique de la recherche</i> | 22 |
| 1.1.4 <i>Objectifs de la recherche</i> | 22 |
| 1.2 REVUE DE LITTÉRATURE..... | 23 |
| 1.2.1 <i>Les débits environnementaux et la protection des écosystèmes lotiques</i> | 23 |
| 1.2.2 <i>Les méthodes hydrologiques : entre méthodes et métriques</i> | 28 |
| 1.2.3 <i>Les méthodes de détermination des débits environnementaux hydrauliques et les modèles d'habitat</i> | 39 |
| 1.2.4 <i>Chronologie historique et méthodes exhaustives</i> | 43 |
| 1.2.5 <i>Site d'étude et recherches au Québec</i> | 48 |
| 1.3 STRUCTURE DE LA THESE | 51 |
| 2 PREMIER ARTICLE | 55 |
| 2.1 RESUME..... | 57 |
| 2.2 ABSTRACT..... | 59 |
| 2.3 INTRODUCTION | 61 |
| 2.4 METHODOLOGY | 62 |
| 2.4.1 <i>Hydrological data</i> | 62 |
| 2.4.2 <i>Low flow metrics</i> | 63 |
| 2.4.3 <i>Environmental flows in Southern Quebec</i> | 64 |
| 2.4.4 <i>Frequency analysis, statistical non-parametric tests and multivariate analysis</i> | 65 |
| 2.5 RESULTS..... | 66 |
| 2.5.1 <i>Overview of low flow results</i> | 66 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.5.2 | <i>New hydrological regions</i> | 67 |
| 2.5.3 | <i>Comparison of low flow metrics within historical and new hydrological regions</i> | 69 |
| 2.5.4 | <i>Monthly low flow metrics within PC-HC</i> | 71 |
| 2.5.5 | <i>Environmental flow values and catchment size</i> | 73 |
| 2.6 | DISCUSSION AND CONCLUSION | 78 |
| 2.7 | ACKNOWLEDGMENTS | 79 |
| 3 | DEUXIÈME ARTICLE | 81 |
| 3.1 | ABSTRACT | 83 |
| 3.2 | INTRODUCTION | 85 |
| 3.3 | METHODOLOGY | 88 |
| 3.3.1 | <i>Selection of the study sites</i> | 88 |
| 3.3.2 | <i>Study sites</i> | 90 |
| 3.4 | ENVIRONMENTAL FLOW METHODS | 93 |
| 3.4.1 | <i>Wetted perimeter linked to environmental flows</i> | 94 |
| 3.5 | RESULTS | 96 |
| 3.5.1 | <i>Wetted perimeter associated with low flow metrics</i> | 96 |
| 3.5.2 | <i>Spatial distribution of the wetted perimeters</i> | 97 |
| 3.5.3 | <i>Wetted perimeter: hydrographic regions</i> | 100 |
| 3.6 | DISCUSSION | 103 |
| 3.7 | CONCLUSION | 106 |
| 3.8 | ACKNOWLEDGMENTS | 106 |
| 4 | TROISIEME ARTICLE | 107 |
| 4.1 | ABSTRACT | 109 |
| 4.2 | INTRODUCTION | 111 |
| 4.3 | METHODOLOGY | 113 |
| 4.3.1 | <i>Hydrological methods</i> | 113 |
| 4.3.2 | <i>HYDROTEL</i> | 114 |
| 4.3.3 | <i>Selection of the study sites and hydrological indices for low flow regions</i> | 117 |
| 4.3.4 | <i>The wetted perimeter</i> | 118 |
| 4.4 | RESULTS | 119 |
| 4.4.1 | <i>Low flow metrics from 1990 to horizons 2020 and 2050</i> | 119 |
| 4.4.2 | <i>Low flow regions for horizons 1990, 2020 and 2050</i> | 123 |
| 4.4.3 | <i>The wetted perimeter</i> | 126 |
| 4.5 | DISCUSSION | 128 |
| 4.6 | CONCLUSIONS | 131 |
| 4.7 | ACKNOWLEDGMENTS | 132 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5 | DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION | 133 |
| 5.1 | BILAN ET RESUME DES CONCLUSIONS | 133 |
| 5.2 | L'ANALYSE FREQUENTIELLE : NON CONSEILLÉE POUR LES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX | 134 |
| 5.3 | PERSPECTIVES POUR LE QUEBEC MERIDIONAL..... | 135 |
| 6 | BIBLIOGRAPHIE | 139 |
| | ANNEXE I | 151 |
| | ANNEXE II | 155 |
| | ANNEXE III | 157 |
| | ANNEXE IV | 159 |
| | ANNEXE V | 161 |
| | ANNEXE VI | 165 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|-------------|--|----|
| FIGURE 1.1 | CINQ CARACTERISTIQUES DE L’HYDROGRAMME D’UNE RIVIERE | 26 |
| FIGURE 1.2 | 30%MAF SUR L’HYDROGRAMME D’UNE RIVIERE DONNEE | 30 |
| FIGURE 1.3 | L’APPROCHE <i>SUSTAINABILITY BOUNDARY</i> SUR L’HYDROGRAMME D’UNE RIVIERE DONNEE..... | 31 |
| FIGURE 1.4 | L’APPROCHE JOURNALIERE DES <i>PRESUMPTIVE STANDARDS</i> SUR L’HYDROGRAMME D’UNE RIVIERE DONNEE..... | 32 |
| FIGURE 1.5 | METHODE DE TENNANT (A) ET METHODE DES DEBITS CLASSES, EXEMPLE DU 90 ^e PERCENTILE (B) | 33 |
| FIGURE 1.6 | LOIS DE DISTRIBUTION TESTEES SUR LES MINIMUMS DE LA MOYENNE MOBILE SEPT JOURS POUR UNE RIVIERE DONNEE..... | 35 |
| FIGURE 1.7 | LARGEUR AU MIROIR (A), PROFONDEUR MOYENNE (B), VITESSE MOYENNE (C), ET PERIMETRE MOUILLE (D) EN FONCTION DU DEBIT POUR LA RIVIERE DU LOUP (STATION 022507 – SECTION 54, ISSUE DES DONNEES DU CEHQ) | 42 |
| FIGURE 1.8 | CHRONOLOGIE HISTORIQUE DES COMPOSANTES DES ETUDES SUR LES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX | 44 |
| FIGURE 1.9 | PROCESSUS SCIENTIFIQUE ET SOCIAL DE LA METHODE ELOHA | 46 |
| FIGURE 1.10 | CONDITIONS D’ALTERATION BIOLOGIQUES EN FONCTION DE L’AUGMENTATION DES FACTEURS DE STRESS..... | 47 |
| FIGURE 1.11 | CANADA (GAUCHE) ET QUEBEC (DROITE)..... | 49 |
| FIGURE 2.1 | NUMBER OF STATIONS WITH METRICS UNDER THE 30%MAF, 25%MAF, AND 10%MAF THRESHOLDS FOR INTER-ANNUAL (A), MARCH (B) AND AUGUST (C) FLOW METRICS. | 67 |
| FIGURE 2.2 | HYDROMETRIC STATIONS BY PC-HC GROUPS COMPARED TO ORIGINAL HYDROLOGICAL REGIONS SHOWN BY NUMBERS (QUEBEC MAP FROM DEFACC 2020) | 68 |
| FIGURE 2.3 | ASCENDANT HIERARCHICAL CLUSTERING OF HYDROMETRIC STATIONS BY PC-HC GROUPS: NUMBER OF HYDROMETRIC STATIONS; MEAN CATCHMENT SIZES; MEAN OF THE MAF IN SPECIFIC FLOWS. | 69 |
| FIGURE 2.4 | INTER-ANNUAL METRICS RESULTS DIVIDED BY MAF FOR HYDROLOGICAL REGIONS..... | 71 |
| FIGURE 2.5 | INTER-ANNUAL METRICS RESULTS DIVIDED BY MAF FOR PC-HC..... | 72 |
| FIGURE 2.6 | MEAN OF MONTHLY METRIC RESULTS DIVIDED BY MAF FOR PC-HC GROUPS. | 73 |
| FIGURE 2.7 | MOST CONSERVATION AND RESTRICTIVE INTER-ANNUAL FLOW METRICS ABOVE THE 30%MAF THRESHOLD, DEPENDING ON CATCHMENT SIZE FOR EACH PC-HC AND SOUTHERN QUEBEC (SQ) | 76 |
| FIGURE 3.1 | STUDY RIVER SITES IN SOUTHERN QUEBEC (QUEBEC MAP FROM MELCC, 2020) | 90 |
| FIGURE 3.2 | EXAMPLE OF THE MAXIMUM CURVATURE METHOD TO DETERMINE A RIVER ENVIRONMENTAL FLOW WITH A=26.54 AND B=0.17. | 95 |
| FIGURE 3.3 | STANDARDIZED LOW FLOW METRICS (A) AND THEIR ASSOCIATED WETTED PERIMETERS (B) GROUPED FOR THE FOLLOWING PERIODS: INTER-ANNUAL, SUMMER (S) AND WINTER (W). HORIZONTAL LINES: 10%MAF, 25%MAF AND 30%MAF FLOW THRESHOLDS (A) AND THEIR ASSOCIATED WETTED PERIMETER MEDIAN VALUES (B). | 97 |
| FIGURE 3.4 | WPS _{METRIC} CORRESPONDING TO THE LOWEST (A, C, E) AND HIGHEST (B, D, F) MEAN VALUES FOR INTER-ANNUAL (TOP TWO), SUMMER (S; MIDDLE) AND WINTER (W; BOTTOM) PERIODS | 98 |

| | | |
|------------|--|-----|
| FIGURE 3.5 | FLOW METRICS (DOTTED LINE) AND WPSMETRIC (FULL LINE) VARIATION FOR SELECTED RIVERS. MAF: MEAN ANNUAL FLOW; LMF: LOWEST MONTHLY FLOW..... | 99 |
| FIGURE 4.1 | SELECTED SITES OF THE STUDY (QUEBEC MAP FROM DEFACC 2020) | 117 |
| FIGURE 4.2 | STANDARDIZED METRIC FLOW VALUES FOR HORIZONS 1990, 2020 AND 2050. “-S” FOR SUMMER AND “-W” FOR WINTER FLOW METRICS (DOTTED LINES ARE 10%MAF, 25%MAF AND 30%MAF FLOW THRESHOLDS) | 120 |
| FIGURE 4.3 | DIFFERENCES (%) IN ENVIRONMENTAL FLOW METRIC VALUES BETWEEN HORIZONS 2020 AND 2050 FOR THE 7Q2 (A), Q90 (B), LQ50 (C), AND AQ50 (D) FLOW METRICS..... | 122 |
| FIGURE 4.4 | LOW FLOW REGIONS FROM THE HIERARCHICAL ASCENDANT CLASSIFICATION (HC1 TO HC8) FOR HORIZONS 1990 (A), 2020 (B) AND 2050 (C)..... | 123 |
| FIGURE 4.5 | MAP OF THE MONTH WITH THE LOWEST FLOWS FOR THE INTER-ANNUAL (A), SUMMER (B) AND WINTER (C) PERIODS OF THE HORIZON 2050. THE DASHED RED CIRCLES SHOW THE REGIONS WHERE THERE HAS BEEN A CHANGE OF THE MONTH WITH THE LOWEST FLOW BETWEEN HORIZONS 2020 AND 2050. | 125 |
| FIGURE 4.6 | FLOW METRICS (DOTTED LINE) AND THEIR ASSOCIATED WETTED PERIMETER VALUES (FULL LINE) FOR SELECTED RIVERS. QMC: MAXIMUM CURVATURE FLOW VALUE AND ITS ASSOCIATED WETTED PERIMETER THRESHOLD FOR A CONSERVATIVE PHYSICAL HABITAT; WP: WETTED PERIMETER; Q: FLOW. THE SIX CLIMATE CHANGE SCENARIOS FLOW VALUES ARE FOR THE HORIZON 2050, THE HORIZON 2020 VALUES ARE EMPIRICAL (REFER TO BERTHOT ET AL. 2021, <i>SUBMITTED</i>). | 128 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-------------|---|-----|
| TABLEAU 1.1 | CATEGORIES DE METHODES DE DETERMINATION DES DEBITS ENVIRONNEMENTAUX..... | 24 |
| TABLEAU 1.2 | DEBITS DE BASE RECOMMANDES POUR PRESERVER LES ECOSYSTEMES LOTIQUES | 29 |
| TABLEAU 1.3 | METRIQUES HYDROLOGIQUES APPLICABLES AU QUEBEC MERIDIONAL | 34 |
| TABLEAU 1.4 | DESCRIPTION DES METRIQUES HYDROLOGIQUES SUR UNE BASE MENSUELLE. MAF : DEBIT MOYEN INTERANNUEL ; MMF : DEBIT MENSUEL MOYEN ; Q90 : 90 ^E PERCENTILE DES DEBITS CLASSES ; Q50 : DEBIT MEDIAN. LES HFR, IFR ET LFR DISTINGUENT LES BESOINS EN DEBITS ELEVES, INTERMEDIAIRES ET FAIBLES. | 38 |
| TABLE 2.1 | HYDROLOGICAL INDICES RETAINED TO BE USED IN THE ASCENDANT HIERARCHICAL CLUSTERING | 68 |
| TABLE 2.2 | SUMMARY OF THE RESULTS AND THE MORE CONSERVATIVE AND RESTRICTIVE FLOW METRICS. 77 | |
| TABLE 3.1 | RIVER CHARACTERISTICS AND HYDRAULIC PARAMETERS BY HYDROGRAPHIC REGION. HS: HYDROMETRIC STATION, GS: GAUGING SITE, NM: MEAN OF THE NUMBER OF MEASUREMENTS, LMF: LOWEST MONTHLY FLOW, MAF: MEAN ANNUAL FLOW (M ³ S ⁻¹), V: VELOCITY (M S ⁻¹), D: DEPTH (M), WP: WETTED PERIMETER (M), Q: FLOW (M ³ S ⁻¹), A, B, C, F, K, M: NUMERICAL COEFFICIENTS TO BE ADJUSTED. | 92 |
| TABLE 3.2 | DEFINITIONS AND USES OF ENVIRONMENTAL FLOW METRICS | 93 |
| TABLE 3.3 | 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) | 101 |
| TABLE 4.1 | ENVIRONMENTAL FLOW METRICS, DEFINITIONS AND USES | 113 |
| TABLE 4.2 | SELECTED GLOBAL CLIMATE MODELS AND NUMBER OF HYDROMETRIC STATIONS AVAILABLE TO CALCULATE THE 7Q2 AND 7Q10 FLOW METRICS | 116 |
| TABLE 4.3 | HYDROLOGICAL INDICES USED TO DEFINE LOW FLOW REGIONS (DEFINITIONS FROM DAIGLE ET AL. 2011) | 118 |
| TABLE 4.4 | HYDROLOGICAL INDICES MEAN VALUES BY HC FOR HORIZONS 1990, 2020 AND 2050 | 124 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Métriques hydrologiques, indices et méthodes

30Q5 : débit minimum d'une moyenne mobile de 30 jours et une période de retour de 5 ans

7Q2 : débit minimum d'une moyenne mobile de 7 jours et une période de retour de 2 ans

7Q10 : débit minimum d'une moyenne mobile de 7 jours et une période de retour de 10 ans

70%AQ50 : 70% du débit médian du mois d'août

70%LQ50 : 70% du débit médian du mois au plus faible débit

AQ50 : débit médian du mois d'août

BFI: *Base Flow Index*

DRIFT: *Downstream Response to Imposed Flow Transformation*

ELOHA: *Ecological Limits of Hydrologic Alteration*

HI: *Hydrological Indices*

HFR: *High-Flow Requirement*

HVI: *Hydrological Variability Index*

IFIM: *Instream Flow Incremental Methodology*

IFR: *Intermediate-Flow Requirement*

IHA: Indicateurs Hydrologiques d'Altération

LFR: *Low-Flow Requirement*

LQ50 : débit médian du mois au plus faible débit

MAF : débit moyen interannuel (ou module)

« Métrique » - S : métrique hydrologique calculée pour la période estivale (*summer*)

« Métrique » - W : métrique hydrologique calculée pour la période hivernale (*winter*)

MMF : Débit moyen mensuel

PHABSIM: *Physical Habitat Simulation*

PS: *Presumptive Standards*

Q50 : débit médian

Q90 : 90^e percentile des débits classés

Q95 : 95^e percentile des débits classés

QMC : Débit lié à la méthode du Maximum de Courbure

RVA: *Range of Variability Approach*

SBA: *Sustainability Boundary Approach*

SUMHA: *Sustainable Management of Hydrological Alterations*

WP : Périmètre mouillé

WPS_{metric}: *Wetted Perimeter Standardized associated with a hydrological metric*

WPS_{QMC}: *Wetted Perimeter Standardized associated with the maximum curvature method*

WPS_{MAF}: *Wetted Perimeter Standardized associated with the mean annual flow*

Modèles climatiques

CanESM2: *Canadian Earth System Model version 2*

CESM: *Carbon Earth System Model*

CMCC-CESM: *Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamento Climatici Model*

CMIP5: *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

CMOC: *Canadian Model of Ocean Carbon*

CRCM5: *Canadian Regional Climate Model*

CTEM: *Canadian Terrestrial Ecosystem Model*

GCM: *Global Climate Model*

INMCM4: *Russian Institute for Numerical Mathematics Climate Model Version 4*

IPSL-CM5A-LR: *Institute Pierre Simon Laplace Model with low resolution (-LR)*

NEMO: *Nucleus for European Modelling of the Ocean model*

RCP: *Representative Concentration Pathways*

Autres

AIC: *Akaike Information Criteria*

BIC: Bayesian Information Criteria

DEFACC: *Department of Environment and Fight Against Climate Change*

DEHQ : Département de l'Expertise Hydrique du Québec

GES : Gaz à Effet de Serre

GEV: *Generalized Extreme Value*

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

H0 : Hypothèse nulle (test statistique)

H1 : Hypothèse alternative à H0 (test statistique)

HCAN : Hydrologie du Canada

IQR: *Inter-Quartile Range* LSE : Loi sur l'Eau

LQE : Loi sur la Qualité de l'Environnement

MCS: *Mean Catchment Size*

MELCC : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre le Changement Climatique

MFFP : Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs

MPO : Pêches Océans Canada

PCA: *Principal Component Analysis*

PC-HC : Groupes issus d'une Analyse à Composantes Principales (PC) et d'une Classification Ascendante Hiérarchique (HC)

R0 / R0X : Région hydrographique ; X, numéro de 1 à 8

UN-SDG: *United Nations Sustainable Development Goals*

USFWS: *United States Fish and Wildlife Service*

USGS: *United States Geological Survey*

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

1.1.1 Débits environnementaux et méthode de concertation

Cette présente étude propose de comprendre, de développer et d'appliquer la notion du débit environnemental dans la gestion des ressources en eau du Québec méridional. Celui-ci 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). Quatre catégories de méthodes ont été répertoriées pour calculer les débits environnementaux : hydrologiques, hydrauliques, modèles d'habitat, ou exhaustives (Tharme 2003). La dernière catégorie incorpore la totalité ou une partie des trois premières. Les travaux présentés ici pourraient faire partie de la méthode exhaustive ELOHA (Ecological Limits of Hydrological Alteration ; Poff et al. 2010), proposant deux processus, scientifique et social, pour estimer les débits environnementaux. La méthode ELOHA vise à renforcer le processus de collaboration entre les experts, les gestionnaires et les usagers de l'eau, pour, par exemple, choisir un(des) seuil(s) de prélèvement d'eau protecteur(s) des écosystèmes lotiques tout en étant socialement accepté(s).

1.1.2 Gestion de l'eau en période d'étiage au Québec et incertitudes quant à la protection des écosystèmes lotiques

Actuellement, la gestion de l'eau pendant les périodes d'étiage mise en place au Québec, prévoit : (1) d'évaluer les débits afin d'estimer les volumes pouvant être prélevés dans les cours d'eau ; et (2) de maintenir un débit minimal pour diluer des contaminants déversés afin de protéger le milieu (MELCC 2015a). En reprenant l'exemple des prélèvements d'eau, la réglementation québécoise indique qu'il est possible, mais non obligatoire, d'imposer ces deux restrictions (Vol.1, MELCC 2015b): (1) le débit maximum prélevé en un point est de 15% du 7Q2 d'origine (débit minimum d'une moyenne mobile de sept jours et une période de retour de deux ans), duquel on soustrait les prélèvements en amont et (2) la possibilité d'utiliser la méthode hydraulique et la méthode des modèles d'habitat pour fournir une information plus complète afin de demander à prélever au-delà de 15% du 7Q2. Ce second point soulève la question de l'impact d'une diminution du débit sur le maintien des habitats des écosystèmes lotiques. D'après la littérature

scientifique, la métrique du 7Q2 utilisée en tant que débit plancher pourrait ne pas protéger les habitats du poisson en tout temps (Belzile et al. 1997, Caissie et al. 2007).

1.1.3 Problématique de la recherche

Les méthodes de détermination des débits environnementaux sont nombreuses (> 200 d'après Tharme 2003), et 30% sont des méthodes hydrologiques. La métrique du 7Q2 est une méthode hydrologique, une statistique probabiliste (i.e. estimée par analyse fréquentielle univariée) basée sur l'historique des chroniques de débits mesurés ou simulés. La présente étude pose la question de savoir : quelle(s) méthode(s) hydrologique(s) utiliser pour définir un débit minimum à maintenir dans les rivières du Québec méridional lors des périodes d'étiage, à l'aide de débits seuils ? Aussi, l'étude pose la question : quelle est la pertinence de combiner la ou les méthode(s) hydrologique(s) choisie(s) à une méthode hydraulique afin de protéger les milieux et écosystèmes lotiques ? Les résultats permettront entre autre de discuter la pertinence d'appliquer une seule métrique hydrologique issue de l'analyse fréquentielle, à un territoire d'environ 730 000 km².

1.1.4 Objectifs de la recherche

Cette thèse vise à promouvoir les dimensions à considérer pour l'estimation des débits environnementaux dans les rivières du Québec méridional: les débits seuils protégeant le milieu et les écosystèmes lotiques en période d'étiage, l'échelle spatiale, l'échelle temporelle, la disponibilité physique des habitats et l'impact du changement climatique. Les points abordés visent alors à enrichir les réflexions sur la gestion du partage de l'eau, la sensibilité des cours d'eau, la préservation et le maintien des écosystèmes lotiques pendant les périodes d'étiage. Tout au long de cette étude, des seuils de protection hypothétiques seront utilisés pour comparer les valeurs de débit des différentes méthodes de détermination des débits environnementaux testées. Ainsi, trois objectifs spécifiques ont été fixés :

- 1 – Comparer des métriques hydrologiques applicables aux rivières du Québec méridional ;
- 2 – Évaluer la pertinence de combiner une méthode hydrologique et une méthode hydraulique pour assurer la disponibilité physique des habitats et la protection des écosystèmes lotiques; et
- 3 – Examiner les effets des changements climatiques pour les métriques hydrologiques comparées et la disponibilité physique des habitats.

La méthode hydrologique consiste à établir et à appliquer un débit plancher (ou plusieurs) alors que les métriques hydrologiques correspondent aux différentes façons de le/les calculer. Ainsi,

pour chacun des objectifs, le choix a été fait de comparer les mêmes métriques hydrologiques. Aussi, les résultats seront discutés pour des rivières groupées d'après leurs caractéristiques hydrologiques d'étiage, pour comparaison avec les groupements par régions hydrographiques, qui sont définies d'après des limites administratives et/ou hydrologiques.

1.2 Revue de littérature

1.2.1 Les débits environnementaux et la protection des écosystèmes lotiques

Définition

Les débits environnementaux correspondent 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, définition initiale issue de la Déclaration de Brisbane 2007).

Les catégories de méthodes de détermination des débits environnementaux

Comme il le fut mentionné précédemment, quatre catégories de méthodes ont été répertoriées par Tharme (2003) pour calculer les débits environnementaux : hydrologiques (Tennant 1976, Tessmann 1980, Caissie et El-Jabi 1995, Olden et Poff 2003, Smakhtin et al. 2006, Richter et al. 2011), hydrauliques (Hamilton et Kosakoski 1982, Hersh et Maidment 2006, Ksiazek et al. 2019), modélisation d'habitats (Bovee 1982, Bovee et al. 1998, Milhous 1999, Capra et al. 2003, Monk et al. 2008), et exhaustives (Poff et al. 1997, King et al. 2000, Brizga et al. 2002, Acreman and Dunbar 2004, Poff et al. 2010, Arthington 2012, Pahl-Wostl et al. 2013, Opperman et al. 2018). Au Tableau 1.1, Linnansaari et al. (2013) comparent ces catégories de méthodes de détermination des débits environnementaux en fonction de leurs objectifs, échelles d'application, portées, durées de mise en œuvre, coûts et fréquences d'usage. Les méthodes hydrologiques sont moins coûteuses, rapides à faire et leur utilisation a fortement augmenté avec le temps. Elles sont conseillées pour les sites à moindre risque pour les écosystèmes lotiques. Les méthodes hydrauliques et les modèles d'habitat sont appliqués à des échelles locales. Les méthodes exhaustives sont longues à mettre en place, plus coûteuses, mais leur portée est flexible. L'intérêt pour les méthodes exhaustives a augmenté avec le temps (Poff et al. 2017, Horne et al. 2017), et l'échelle d'application peut varier du cours d'eau à l'échelle régionale.

Tableau 1.1 Catégories de méthodes de détermination des débits environnementaux

| Catégorie de méthodes | Objectif général | Échelle d'application | Portée | Durée de l'évaluation (mois) | Coût relatif | Fréquence d'utilisation |
|------------------------------|--|--|---|-------------------------------------|---------------------|--------------------------------|
| Hydrologique | Étude de données historiques pour trouver les débits d'occurrence naturelle d'un cours d'eau pouvant être considérés comme des seuils « sécuritaires » pour les prélèvements d'eau. | Pour un cours d'eau en entier, applicable aux évaluations régionales. | Reconnaissance, « situations à faible risque ». | 0,5 | \$ | +++ |
| Hydraulique | Étude de l'évolution d'une variable hydraulique, souvent le périmètre mouillé, en fonction du débit; cette étude permet d'approximer la quantité générale d'habitats dans un cours d'eau. | Applicable à l'échelle d'un site d'étude / segment de cours d'eau. Peut-être, reprise à une échelle plus grossière à partir de sites « représentatifs ». Pour des cours d'eau spécifiques. | Moyenne | 2-4 | \$\$ | + Décroissant |
| Modélisation d'habitat | Étude de la variation de la quantité d'habitats physiques pour une ou un ensemble d'espèces cibles sélectionnée(s) en fonction du débit. | | Détaillée | 6-18 | \$\$\$ | +++ |
| Exhaustive | Étude des débits dans le cadre d'un atelier d'experts menant à des recommandations sur les débits pour toutes les composantes de l'écosystème riverain, comprenant les usages sociétaux et récréatifs. | Pour un cours d'eau en entier, applicable à des échelles spécifique et régionale. | Flexible | 12-36 | \$-\$\$\$\$ | + Croissant |

Adapté de Linnansaari et al. (2013).

Tharme (2003) a recensé 207 méthodes provenant de 44 pays, classées dans quatre catégories : les études hydrologiques représentant près de 30% des méthodes utilisées, les études hydrauliques (11%), les modèles d'habitat (28%) et les méthodes exhaustives, combinées et autres (31%). D'après Poff et al. (2017), trois facteurs influencent le choix de la méthode ou des méthodes de **détermination des débits environnementaux** :

- Le temps (journalier, saisonnier, annuel/pluriannuel) ;
- L'espace (local, bassin versant, zone *biogéographique*) ;
- La nature des données requises (observées, expérimentales, modélisées).

Puis, la ou les méthodes choisies donnent une information différente quant au lien entre le débit et l'écosystème qui en dépend : (1) sur les *états écologiques* des espèces selon leur répartition géographique à moyen et long terme, (2) sur les réponses de l'écosystème à des variations de haute fréquence localement et à court terme (*taux écologiques*), et (3) sur les *traits écologiques* se référant à la performance des espèces dans leur ensemble, à grande échelle, et pour une temporalité courte ou longue (Poff et al. 2017).

Le régime d'écoulement naturel d'une rivière

Le *paradigme de l'écoulement naturel* théorisé par Poff et al. (1997), explique que les écosystèmes aquatiques ont évolué sous la contrainte du régime hydrologique naturel du cours d'eau et y sont adaptés. Autrement dit, le contrôle des cours d'eau et des débits pour produire de l'électricité, alimenter des villes, limiter l'impact des inondations (etc.), modifie les fonctions écologiques des rivières (Poff et al. 1997). Ces fonctions écologiques (température de l'eau, sources d'énergie, interactions biotiques et disponibilité des habitats) varient d'après l'évolution des cinq composantes du débit (Resh et al. 1988, Poff et al. 1997, Arthington 2012). La Figure 1.1 présente les cinq caractéristiques descriptives principales d'un hydrogramme : amplitude, fréquence, durée, temporalité et variabilité du débit (Poff et al. 1997). Des indices hydrologiques, associés aux cinq caractéristiques de l'hydrogramme, ont été définis pour caractériser et décrire un régime d'écoulement naturel (Hersh et Maidment 2006, Olden et Poff 2003), ou modifié (Richter et al. 1996, Zeiringer et al. 2018). Ces indices hydrologiques décrivent des rivières classées intermittentes ou pérennes, ayant des variations intra-annuelles plus ou moins brutales, des apports de la fonte des neiges, des précipitations, des eaux souterraines, et du ruissellement (Olden et Poff 2003). Chaque catégorie d'indices hydrologiques donne une réponse écologique en cas de modification du régime d'écoulement comme l'interruption du cycle de vie (amplitude),

la réduction des habitats pour les alevins (fréquence), la diminution du taux de croissance ou de la mortalité (durée), invasion d'espèces exogènes végétales (temporalité) ou lessivage (variabilité du débit ; Zeiringer et al. 2018). De fait, la végétation riveraine est aussi adaptée aux conditions hydrologiques extrêmes (Merritt et al. 2010). Bornette et Puijalon (2011) ont indiqué que les plantes aquatiques sont dépendantes du mouvement de l'eau. Un changement de fréquence des inondations peut affecter longévité des plantes, des modifications dans l'amplitude, la temporalité, la variabilité et la durée d'un évènement hydrologique peuvent changer les stratégies reproductives, la morphologie des plantes et aussi le bilan hydrologique des rivières (Merritt et al. 2010) Ce dernier point montre qu'il est aussi pertinent d'étudier les indices hydrologiques de façon combinée. Des indices hydrologiques spécifiques aux étiages sont présentés en annexe (2011 ; Tableau-A I).

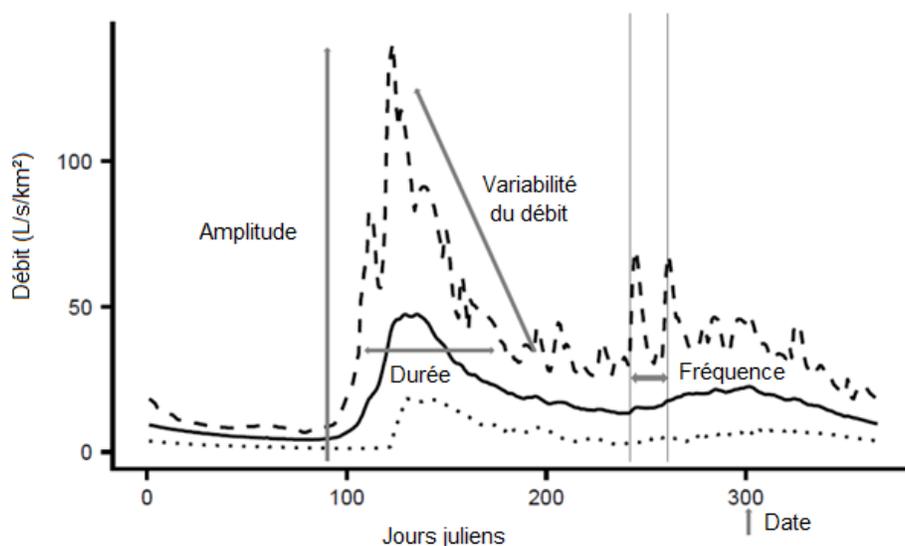


Figure 1.1 Cinq caractéristiques de l'hydrogramme d'une rivière

Modification du régime d'écoulement et protection des écosystèmes lotiques

Le régime d'écoulement des rivières varie en fonction de facteurs météorologiques, pouvant être modifiés par les changements climatiques, et aussi en fonction de facteurs biophysiques : superficie du bassin versant, topographie et élévation, urbanisation et canalisation, présences d'infrastructures hydrauliques, etc. (Zeiringer et al. 2018). Amendée en 2019, la loi sur les pêches du Canada (1985) souhaite consolider les moyens de protection des ressources marines et fluviales du Canada. En effet, sans mesures compensatoires ou directives, les activités et usages anthropiques (barrages, agriculture, prélèvements d'eau de surface et souterraine) portent atteinte à l'intégrité du milieu riverain et à son écosystème. Il s'agit par exemple, de prévenir la modification de la géomorphologie d'une rivière ou des interactions biotiques qui sont à la base

de la structure communautaire des écosystèmes (Resh et al. 1988). De nombreuses études sur les débits environnementaux prennent en considération les impacts des infrastructures hydrauliques et activités agricoles sur le régime hydrologique des cours d'eau (Tharme 2003, Richter et al. 2006, Renofalt 2010, Zhang et al. 2012, Yarnell et al. 2015, Zeiringer et al. 2018, Dehghanipour et al. 2020, Nikitina et al. 2020). Pour les périodes d'étiage, il faudrait tenir compte des impacts des activités anthropiques sur la température de l'eau, l'oxygène dissous, les autres variables chimiques définissant la qualité de l'eau, la disponibilité des habitats et l'accès à des zones d'alimentation et de frai (Resh et al. 1988, Poff et al. 1997, Arthington 2012).

Dans le contexte des débits environnementaux, il serait alors question de fixer des débits minimums à maintenir pour protéger les écosystèmes aquatiques. C'est ce que proposent Belzile et al. (1997), qui ont mené une étude hydrologique portant sur la préservation et le maintien de 17 espèces de poissons dans 15 écorégions pré-identifiées au Québec. Dans cette étude, Belzile et al. (1997) listent les moments clés dans le cycle de vie de ces poissons (ex. reproduction et incubation des œufs de l'éperlan d'avril à fin juillet, alimentation de toutes les espèces de juin à septembre ou encore l'incubation des œufs de salmonidés d'octobre à mai), pour ensuite proposer de maintenir des débits minimums pour des périodes temporelles et régions spécifiques. Il ressort de cette étude que les méthodes hydrologiques d'étiage utilisées au Québec pour limiter les prélèvements d'eau (7Q2) et répondre à des objectifs de qualité (7Q10 : débit moyen sept jours pour une période de retour de 10 ans), pourraient ne pas assurer la protection des habitats de poissons en tout temps. Ces constats ont aussi été faits dans les provinces de l'est du Canada par Caissie et al. (2007) et Caissie et al. (2014).

Protection de la *productivité des pêches*

Afin d'assurer la durabilité des pêches commerciales, récréatives et autochtones, des études expliquent l'importance d'assurer la disponibilité et la qualité d'habitats du poisson qui sont de bons indicateurs de la santé des écosystèmes aquatiques (Bradford et al. 2011, Bradford et al. 2014, Randall et al. 2013). La Loi sur les pêches du Canada (1985) décrit l'habitat du poisson comme étant « *les eaux fréquentées par les poissons et toute autre zone dont les poissons dépendent directement ou indirectement pour mener à bien leurs processus vitaux, notamment les frayères et les zones d'alevinage, d'élevage, d'alimentation et de migration* ». En période d'étiage, un apport en eau suffisant, une vitesse et un substrat adéquats maintiennent la

disponibilité et la qualité de ces habitats dans les écosystèmes fluviaux et par conséquent la présence/abondance de poissons (Bradford et al. 2011). Pour s'assurer de la santé des poissons, il est proposé de faire le suivi de cinq indicateurs : la croissance, la performance individuelle, la survie, la migration et la reproduction (Bradford et al. 2014). En lien avec les besoins en débits environnementaux, Anderson et al. (2006) ont proposé de répondre à une série de questions récurrentes pour mieux comprendre la dynamique écologique en période d'étiage :

- *Est-ce possible de trouver un individu dans un lieu particulier ?*
- *Comment la population est-elle répartie dans l'espace ?*
- *Est-ce que la population se maintiendra dans un milieu modifié ?*

Des concepts sont présentés (dynamiques des populations et de la chaîne alimentaire, tolérance, bioénergie, comportement des individus et sélection des habitats,) pour mieux comprendre la relation entre la biomasse et l'aire d'habitat utilisée (Anderson et al. 2006). Il ressort par exemple qu'un faible débit entraînant une diminution de l'habitat en deçà des conditions nécessaires au maintien d'une population incitera celle-ci à préférer d'autres espaces plutôt qu'à tolérer de nouvelles conditions hydrologiques (Anderson et al. 2006). Ceci est un exemple de la complexité de la relation entre le débit et les écosystèmes aquatiques à prendre en compte pour l'usage des débits environnementaux.

1.2.2 Les méthodes hydrologiques : entre méthodes et métriques

La méthode de Tennant

La méthode de Tennant (1976) est une référence parmi les méthodes hydrologiques. Elle relie des intervalles de débits minimums à des qualificatifs de protection des écosystèmes d'une rivière, pour une période de l'année donnée. Cette méthode consiste à recommander comme seuil minimum (débit de base), un pourcentage du débit moyen interannuel (Tennant 1976 ; Tableau 1.2), ou module de la rivière étudiée (ex. 10%MAF : 10% du débit moyen interannuel). Cette méthode a été développée à partir d'études physiques, chimiques et biologiques menées pendant dix ans, dans onze rivières du Montana, du Nebraska et du Wyoming, aux États-Unis (Tennant 1976). Testée et validée dans 21 autres États des États-Unis (Tennant 1976), son utilisation s'est généralisée et exportée. Les observations faites sont que les pourcentages du débit moyen interannuel appliqués pour maintenir l'intégrité des écosystèmes lotiques sont

sensiblement les mêmes pour différents types de rivières, tant en eau froide que chaude (Tennant 1976).

Tableau 1.2 Débits de base recommandés pour préserver les écosystèmes lotiques

| Qualificatif lié à l'application des débits de base recommandés sur la population des poissons, la faune, les ressources environnementales et les loisirs | Débits de base recommandés (% du module) | |
|---|--|-------------------|
| | Octobre à Mars | Avril à Septembre |
| Lessivage ou maximum | 200% | |
| Optimale | 60-100% | |
| Exceptionnel | 40% | 60% |
| Excellent | 30% | 50% |
| Bien | 20% | 40% |
| Passable ou dégradant | 10% | 30% |
| Faible ou minimum | 10% | 10% |
| Sévère dégradation | 10% à un débit nul | |

Adapté de Tennant (1976)

Exemple d'application de la méthode de Tennant

Au Tableau 1.2, les débits seuils sont proposés pour deux périodes temporelles : d'octobre à mars, ou d'avril à septembre. Ainsi, le 10%MAF est « *passable* » durant l'hiver mais il faut un minimum de 30%MAF durant l'été pour assurer l'intégrité des écosystèmes lotiques (Tennant 1976). Par contre, un débit de 10%MAF appliqué toute l'année donne un milieu de faible qualité à long terme (Tennant 1976). La Figure 1.2 montre ce que représente un débit minimal (ex. 30%MAF) sur l'hydrogramme d'une rivière donnée. Cette Figure est issue du cadre proposé par Pêches et Océans Canada pour évaluer les besoins en *débits écologiques* (MPO 2013). Descendre sous le débit seuil du 30%MAF est considéré risqué pour mener des activités de pêches, contrairement à une modification de $\pm 10\%$ du débit journalier, hors périodes d'étiage (MPO 2013).

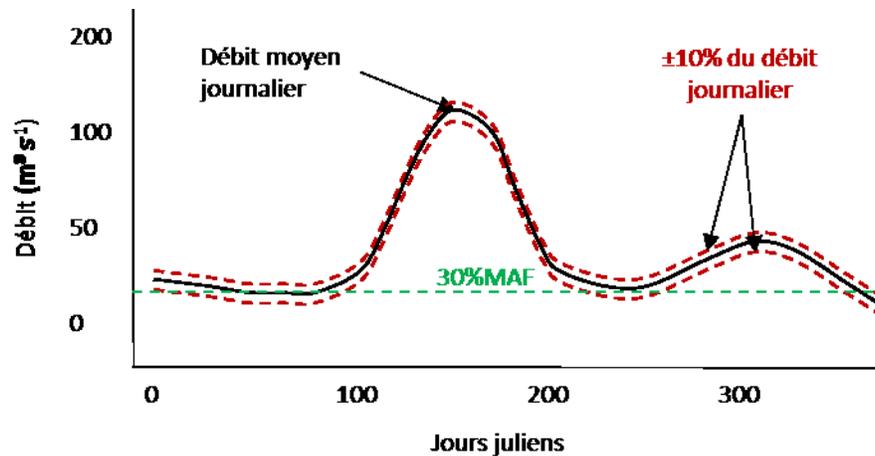


Figure 1.2 30%MAF sur l'hydrogramme d'une rivière donnée

Adaptée du rapport « *Framework for assessing the ecological flow requirements to support fisheries in Canada* » (MPO 2013).

Dans la Figure 1.2, il s'avère que les débits proches ou inférieurs au 30%MAF sont enregistrés en février (jours juliens 32-60) et en septembre (jours juliens 244-274), indiquant qu'un prélèvement d'eau (ou plusieurs) pour l'une ou l'autre période, représenterait un risque certain pour les écosystèmes lotiques. Il peut y avoir des variantes de la méthode de Tennant comme l'application d'un débit plancher de 25%MAF, testé par Caissie et El-Jabi (1995) dans les provinces de l'Atlantique au Canada. Le fait est que les caractéristiques d'étiage diffèrent dans les différentes provinces du Canada (Chouaib et Caissie 2021). En effet, la méthode de Tennant devrait être adaptée au contexte climatique de la zone d'étude d'après Acreman et Dunbar (2004). À partir des travaux de Belzile et al. (1997), le choix a été fait dans cette thèse de considérer le 10%MAF comme étant un débit seuil insuffisant pour protéger les écosystèmes des rivières du Québec méridional. Les débits seuils de 25%MAF et 30%MAF, sont quant à eux, considérés comme passables (cf. Article 1 en partie 2).

Range of Variability Approach, Sustainability Boundary Approach et Presumptive Standards

En 1997, Richter et al. proposent la méthode appelée *Range of Variability Approach* (RVA). Celle-ci consiste à évaluer l'impact d'une modification survenue sur une rivière, comme la construction d'un ouvrage hydraulique, en comparant des indices hydrologiques calculés à partir des débits historiques d'avant et après modification. Cette analyse reprend 32 métriques listées par Richter et al. (1996), regroupés en cinq catégories : l'amplitude, la fréquence, la durée, la temporalité et la variabilité d'un débit annuel d'une rivière. L'objectif étant de comparer les valeurs moyennes

de ces indices avant et après changement du régime d'écoulement, ainsi que leur coefficient de dispersion (Richter et al. 1996). Ces indices sont appelés Indicateurs Hydrologiques d'Altération (IHA ; Tableau-A II) et un logiciel nommé IHA est disponible en ligne pour les calculer (The Nature Conservancy 2018). Le Tableau-A II en annexe décrit aussi comment ces indicateurs ont une influence sur les écosystèmes lotiques.

Ensuite, Richter (2010) propose la méthode *Sustainability Boundary Approach* (SBA). Schématisée à la Figure 1.3, celle-ci émet l'hypothèse qu'une quantité d'eau peut être soustraite à une rivière tout en protégeant son écosystème à partir d'un pourcentage du débit moyen naturel, intra- ou interannuel (%MAF ; Linnansaari al. 2013). La Figure 1.3 montre le débit moyen d'un cours d'eau (trait plein) avec des bornes supérieure et inférieure (tirets) marquant les intervalles de débit favorisant la préservation des écosystèmes lotiques. D'après Richter (2010), la méthode est simple et l'usage de bornes réduit les incertitudes scientifiques.

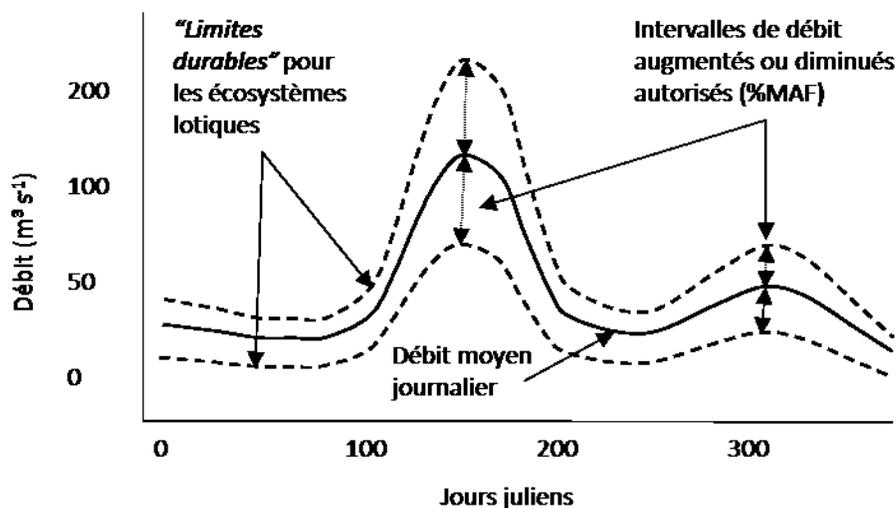


Figure 1.3 L'approche *Sustainability Boundary* sur l'hydrogramme d'une rivière donnée
Adaptée de Richter (2010)

Enfin, la méthode *Presumptive Standards* (PS) est proposée par Richter et al. (2011) pour adapter les limites de la méthode SBA selon les objectifs de protection des écosystèmes lotiques de rivières ciblées. La méthode PS propose de soumettre les intervalles de protection à l'avis d'experts pour une approche plus conservatrice et préventive (Richter et al. 2011) et l'exercice peut être fait pour le pas de temps voulu.

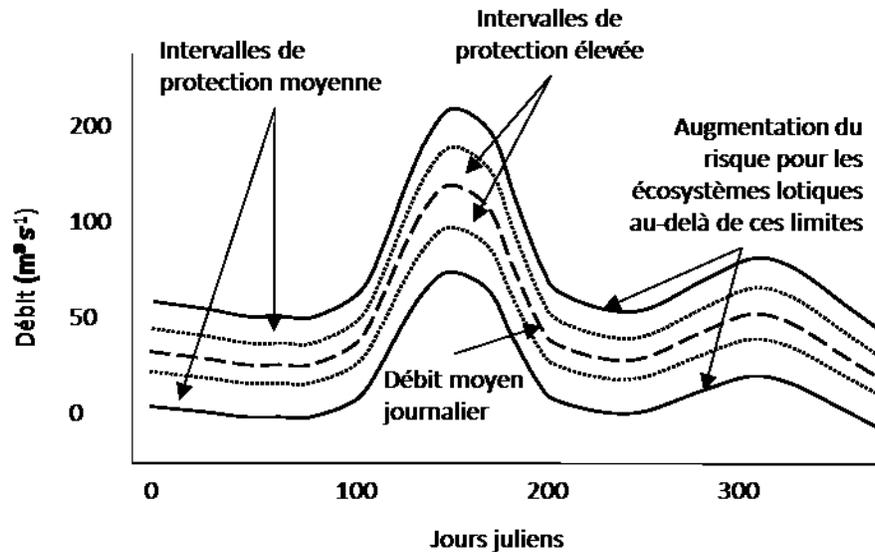


Figure 1.4 L'approche journalière des *Presumptive Standards* sur l'hydrogramme d'une rivière donnée
Adaptée de Richter et al. (2011)

Dans la Figure 1.4, quatre bornes sont définies afin de schématiser :

- Les seuils de protection élevée (exemple du $\pm 10\%$ du régime naturel) ;
- Les risques maximums (exemple du $\pm 11-20\%$ du régime naturel).

Dans le cas où il n'est pas possible d'appliquer cette approche, l'auteur propose de faire un modèle hydrologique, de réfléchir à plusieurs scénarios en fonction des usages et besoins et d'imposer des limites en fonction des objectifs voulus (Richter et al. 2011).

À travers le temps, ces trois méthodes semblent refléter quelques préoccupations liées à la gestion des débits d'étiage. Autrement dit : comparer des indicateurs avant et après une modification majeure pour préciser les conséquences liées aux ouvrages hydrauliques, considérer le régime hydrologique d'une rivière au complet (autant les débits élevés que faibles), et avoir recours à l'avis d'experts pour répondre aux objectifs de maintien et de protection des écosystèmes lotiques ciblés et localisés.

Les méthodes hydrologiques issues de l'analyse statistique descriptive

Dans les rivières du Québec, Belzile et al. (1997) ont proposé l'application de la méthode de Tennant (1976) et notamment du 25%MAF, 30%MAF et 50%MAF pour des régions et périodes données spécifiques, à l'issue de leur étude pour la protection des habitats du poisson. Aussi, Belzile et al. (1997) ont préconisé l'usage du débit médian du mois d'août (AQ50), de septembre

et/ou d'une période de courte durée donnée comme seuils de protection. La Figure 1.5 présente la différence entre la courbe linéaire de la méthode de Tennant (1976; Figure 1.5a) et la méthode des débits classés de laquelle découle la métrique AQ50 (Figure 1.5b).

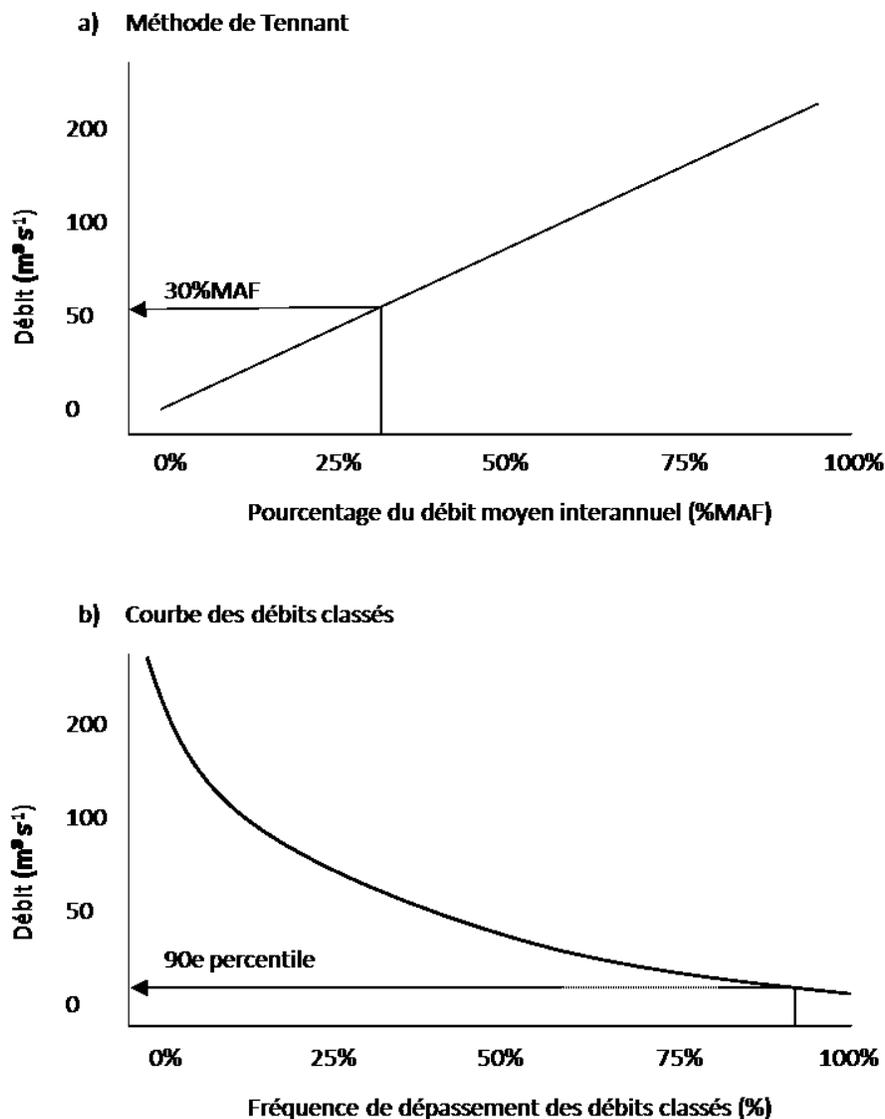


Figure 1.5 Méthode de Tennant (a) et méthode des débits classés, exemple du 90^e percentile (b)
Adaptée de Belzile et al. (1997)

La courbe des débits classés (*flow duration curve*) d'une rivière permet donc de définir des métriques hydrologiques pour les périodes d'étiage (Tableau 1.3). La courbe des débits classés donnent la fréquence relative empirique des débits, permettant d'estimer les percentiles des débits. Le Tableau 1.3 liste les métriques hydrologiques pouvant être potentiellement utilisées au Québec méridional, ayant des contextes hydroclimatiques d'application proches, d'après la revue

de littérature de Linnansaari et al. (2013). En effet, certaines sont utilisées ou ont été testées dans les provinces maritimes du Canada, aux États-Unis, et au Royaume-Uni. Les définitions ci-après sont appliquées pour des rivières ayant un régime d'écoulement naturel.

Tableau 1.3 Métriques hydrologiques applicables au Québec méridional

Adaptées de la revue de littérature de Linnansaari et al. (2013)

| Métrique hydrologique | Définition | Référence | Lieu associé et application |
|-----------------------|---|----------------------------|--|
| LQ50 | Débit médian du mois ayant le plus faible débit | Caissie et al. (2014) | Testée dans les Provinces de l'Atlantique au Canada |
| AQ50 | Débit médian du mois d'août | USFWS (1981) | Appliquée en Nouvelle-Angleterre, É.-U., <i>aquatic base flow</i> pour de petits bassins versants non instrumentés. |
| 70%Q50 | 70% du débit médian mensuel interannuel | Caissie et al. (2014) | Appliquée dans les Provinces de l'Atlantique au Canada, seuil en dessous duquel l'intégrité biotique n'est plus assurée. |
| Q90 | 90 ^e percentile des débits classés | Caissie et al. (2007) | Testée dans les Provinces de l'Atlantique du Canada, mieux pour plus de 20 ans de données (idem pour Q95). |
| Q95 | 95 ^e percentile des débits classés | Acreman et Ferguson (2010) | Appliquée au Royaume-Uni, débit aquatique de base. |

Les méthodes hydrologiques issues de l'analyse statistique fréquentielle univariée

Des métriques hydrologiques peuvent être calculées à partir d'analyse fréquentielle univariée. L'analyse fréquentielle univariée est une méthode de prédiction probabiliste, qui consiste à déterminer la période de retour associée à la probabilité qu'un certain débit soit égalé ou dépassé pour un cours d'eau donné, selon l'Equation (1.1) :

$$T(x) = \frac{1}{1 - p} \quad (1.1)$$

Avec :

$T(x)$: période de retour d'un débit lié à un évènement x donné (unité de temps);

p : probabilité d'égaliser ou de dépasser un débit donné tel que $p=1-F(x, \Theta)$, Θ vecteur des paramètres de la distribution de probabilité cumulative F .

Caissie et al. (2007) préconisent des séries temporelles au pas de temps journalier d'au moins vingt ans pour faire de l'analyse fréquentielle pour les périodes d'étiage. Les tests d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité servent à vérifier que les variables sont indépendantes et identiquement distribuées, sans présence de tendance monotone dans le

temps. Une augmentation de la non-stationnarité des extrêmes est attendue en vue des changements climatiques et interroge l'usage de l'analyse fréquentielle dans la détermination des débits environnementaux puisque la période de retour ne sera plus constante dans le temps (Poff 2017, St-Hilaire et al. 2021). La Figure 1.6 montre l'allure de quatre lois de distribution en prenant exemple d'un ajustement sur les débits minimums de la moyenne mobile sept jours : loi des extrêmes généralisés (GEV), loi de Gumbel, de Weibull et de Gamma (2 paramètres). La distribution des extrêmes généralisée (GEV ; trois paramètres) est peu utilisée pour les périodes d'étiage (Hewa et al. 2007), mais adéquate dans l'est canadien (Joshi et St-Hilaire 2013). Les trois autres lois de distribution sont communément utilisées dans les études sur les périodes d'étiage (Ouarda et al. 2008).

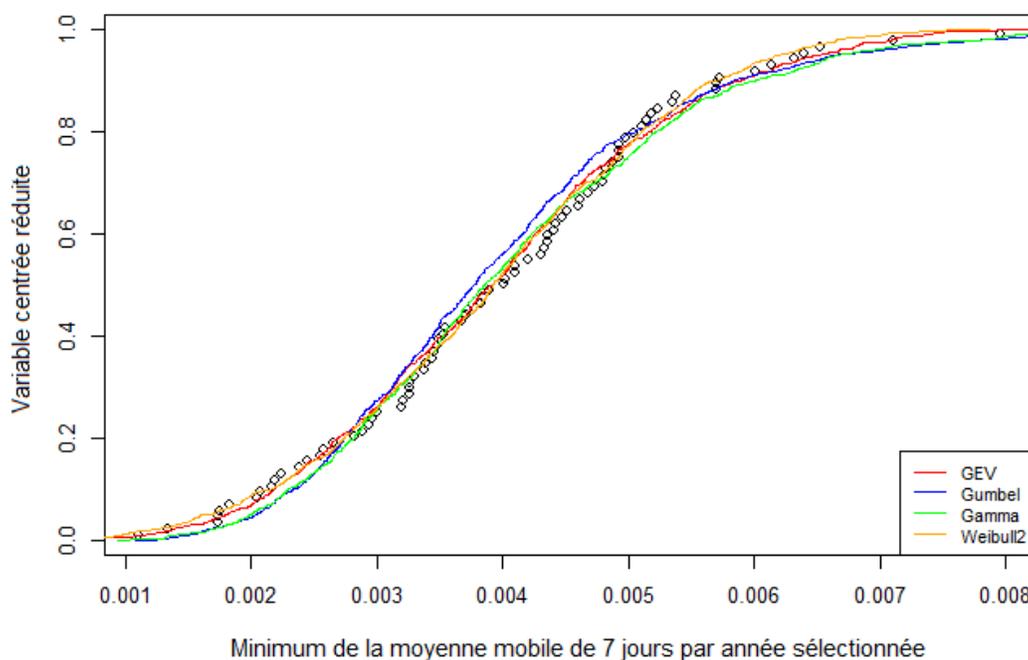


Figure 1.6 Lois de distribution testées sur les minimums de la moyenne mobile sept jours pour une rivière donnée

Les Équations (A III.1), (A III.2), (A III.3) et (A III.4) présentent les fonctions de densité de probabilité de ces lois (Annexe III). L'usage de ces lois de distribution sert à extrapoler les valeurs extrêmes (étiage à gauche ou crue à droite ; Figure 1.6). Il s'agit alors de sélectionner la loi qui représente le mieux ces valeurs (avec un intérêt particulier pour la queue gauche de la distribution). Pour cela, les critères d'information d'Akaike (AIC ; Akaike 1973) et bayésien (BIC ; Schwarz, G. 1978) qui prennent en compte le concept de parcimonie (nombre de paramètres) sont calculés et comparés (Équations (1.2) et (1.3)) pour chaque distribution statistique. Par définition, le critère d'information bayésien pénalise plus fortement le nombre de paramètre. Ce

sont les plus faibles valeurs d'AIC et de BIC qui permettent de sélectionner la distribution statistique la plus adéquate pour calculer, par exemple, la métrique 7Q2.

Critère d'information Akaike (AIC ; Akaike 1973):

$$AIC = 2 * \ln(L) + 2 * k \quad (1.2)$$

Critère d'information bayésien (BIC ; Schwarz, G. 1978) :

$$BIC = 2 * \ln(L) + k * \ln(n) \quad (1.3)$$

Avec :

L : maximum de vraisemblance, reprenant les paramètres de la loi de distribution

k : nombre de paramètres

n : taille de l'échantillon.

Autres méthodes hydrologiques et indicateurs hydrologiques

En plus de la méthode de Tennant (1976), d'autres méthodes dites « de bureau » ont été proposées : Tessman (1980), Smakhtin (2004), Pastor et al. (2014 ; Q90-Q50 et *Variable monthly flow*), prenant le débit moyen mensuel comme base pour définir les débits environnementaux. Les bases hydrologiques de la méthode de Smakhtin (2004) proviennent des travaux d'Hugues and Münster (2000) et Hugues et Hannart (2003) qui ont développé le « *Southern African Desktop Reserve Model* ». L'application de ces méthodes à échelle globale, est décrite au Tableau 1.4 (adapté de Pastor et al. 2014). Au Tableau 1.4, les méthodes sont déclinées selon si les débits mensuels concernés sont faibles, intermédiaires ou élevés. Récemment, l'usage de ces méthodes a servi à dénombrer la fréquence, la sévérité et les tendances du non-respect des débits environnementaux par rapport au lien avec les écosystèmes lotiques à une échelle mondiale (Virkki et al. 2021). Elles ont aussi servi à interroger la pertinence des méthodes hydrologiques en région tropicale, pour mettre de l'avant l'importance d'aussi tenir compte des apports en eau souterraine (Sharma et Dutta 2020). Dans leur revue de littérature, Sood et al. (2017) constatent qu'il n'y a pas de méthodes idéales pour définir les débits environnementaux à échelle mondiale et que dans la perspective de répondre aux objectifs de développement durable, il est nécessaire d'offrir une même ligne de référence (bases de données et outils) à tous les pays.

Le *base flow index* (BFI) et le *hydrological variability index* (HVI) sont deux indicateurs permettant de classer le régime hydrologique d'une rivière en plus du débit moyen interannuel (MAF ; Smakhtin 2001, Pastor et al. 2014, Sharma et Dutta 2020). Le BFI est à l'origine un indicateur de l'apport en eau souterraine aux rivières qui correspond au rapport entre le volume du débit de base et le volume total du débit (Kelly et al. 2019). Le HVI est le rapport de la différence entre les Q25 et Q75 (25^e et 75^e percentiles des débits classés) sur le Q50 (débit médian ; Pastor et al. 2014). Plus le HVI est élevé, plus la variabilité du régime hydrologique est grande (Sharma et Dutta 2020).

Tableau 1.4 Description des métriques hydrologiques sur une base mensuelle. MAF : débit moyen interannuel ; MMF : débit mensuel moyen ; Q90 : 90^e percentile des débits classés ; Q50 : débit médian. Les HFR, IFR et LFR distinguent les besoins en débits élevés, intermédiaires et faibles.

| Saison hydrologique | Smakhtin (2004) | Tennant (1976) | Q90-Q50 (Pastor et al. 2014) | Tessman (1980) | Variable monthly flow (Pastor et al. 2014) |
|---|-----------------|----------------|------------------------------|---------------------------------|--|
| Définition pour les mois à faibles débits | MMF ≤ MAF | MMF ≤ MAF | MMF ≤ MAF | MMF ≤ 40%MAF | MMF ≤ 40%MAF |
| <i>Débit environnemental associé au mois à faibles débits (LFR)</i> | Q90 | 20%MAF | Q90 | MMF | 60%MMF |
| Définition pour les mois à forts débits | MMF > MAF | MMF > MAF | MMF > MAF | MMF > 40%MAF et 40%MMF > 40%MAF | MMF > 80%MAF |
| <i>Débit environnemental associé au mois à forts débits (HFR)</i> | 0 à 20%MAF | 40%MAF | Q50 | 40%MMF | 30%MMF |
| Définition pour les mois à moyens débits | - | - | - | MMF > 40%MAF et 40%MMF ≤ 40%MAF | MMF > 40%MAF et 40%MMF ≤ 80%MAF |
| <i>Débit environnemental associé au mois à moyens débits (IFR)</i> | - | - | - | 40%MAF | 45%MMF |

*HFR=0 si Q90 > 30%MAF, HFR=0.07 si 20%MAF < Q90 ≤ 30%MAF, HFR=0.15 si 10%MAF < Q90 ≤ 20%MAF, HFR=0.2 si Q90 ≤ 10%MAF.

Adapté de Pastor et al. (2014).

1.2.3 Les méthodes de détermination des débits environnementaux hydrauliques et les modèles d'habitat

Les modèles d'habitat

Les méthodes de modèle d'habitat font le lien entre les paramètres hydrauliques et les écosystèmes lotiques. Elles sont plus détaillées et plus coûteuses à mettre en application que les méthodes hydrauliques (Tableau 1.1). L'une des plus utilisées est la méthode IFIM (*Instream Flow Incremental Methodology* ; Bovee et al. 1982, Bovee et al. 1998), pouvant être appliquée avec le modèle PHABSIM (*Physical Habitat Simulation* ; Milhous et al. 1989). La méthode IFIM propose de faire un modèle hydraulique qui simule la variation de variables d'habitat (par exemple, vitesse, profondeur et granulométrie du substrat) en fonction du débit (Bovee et al. 1998). Ce modèle vise à répondre à des problématiques identifiées avec différentes parties prenantes, pour des espèces ciblées, autant dans un contexte naturel qu'altéré.

Avant Ksiazek et al. (2019), d'autres études proposent de simplifier les modèles d'habitat. La méthode hydraulique R2Cross, par exemple (Armstrong et al. 1999), a pour objectif d'assurer un habitat physique aux écosystèmes lotiques en simplifiant la méthode IFIM. La méthode R2Cross pose le principe que pour différentes échelles de largeur au miroir d'une section de rivière, correspondent des intervalles de valeurs de profondeur, vitesse et de pourcentages du périmètre mouillé « total » suffisants pour protéger l'habitat physique (Armstrong et al. 1999). Les habitats diffèrent en fonction de la forme de la rivière (linéaire, tressée, avec des méandres et des bassins, proche d'un estuaire) et donc de l'écosystème fluvial (Welcomme et al. 2006). En 1976, Bartshi a évalué qu'en dessous de 80% de la valeur du périmètre mouillé « total » associé au débit annuel moyen, les conditions ne préservent pas les écosystèmes fluviaux.

Les méthodes hydrauliques

Les méthodes hydrauliques se basent sur la relation existant entre le débit et des paramètres hydrauliques d'un cours d'eau (Linnansaari et al. 2013) pouvant indiquer la disponibilité potentielle en habitat. Le lien entre le débit et trois variables hydrauliques d'une section (la largeur au miroir, la profondeur moyenne et la vitesse moyenne) a été décrit par Leopold et Maddock (1953) en utilisant des fonctions puissances (Équations 1.4, 1.5 et 1.6) :

$$w = aQ^b \quad (1.4)$$

$$d = cQ^f \quad (1.5)$$

$$v = kQ^m \quad (1.6)$$

Avec :

w : largeur au miroir de la section du cours d'eau (m) ;

d : profondeur moyenne de la section du cours d'eau (m) ;

v : vitesse moyenne au passage de la section du cours d'eau (m s^{-1}) ;

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

a, b, c, f, k, m : constantes numériques.

Aussi, le périmètre mouillé est un indicateur de la production potentielle de nourriture pour les poissons (Bradford et al. 2014, Randall et al. 2013), et de la disponibilité de l'habitat physique des poissons (Duncan et al. 2009). La méthode du périmètre mouillé fait partie des méthodes hydrauliques (Tharme 2003), et est la plus couramment utilisée (Gippel et Stewardson 1998). Pendant les périodes d'étiage, la productivité des poissons est liée à leurs conditions de croissance et de migration, affectées par les changements dans la quantité de nourriture, les obstacles à la migration qui peuvent isoler les habitats (Bradford et al. 2014). Les faibles périmètres mouillés sont associés à une faible production alimentaire et à un habitat de poissons faible/pauvre (Gippel et Stewardson, 1998). Caissie et al. (2014) admettent une corrélation linéaire proche de 1 entre la valeur du périmètre mouillé et la disponibilité de l'habitat du poisson. Par conséquent, la productivité biologique globale pour de faibles valeurs de périmètre mouillé peut être inférieure à celle pour des valeurs de débits et de périmètre mouillé plus élevées (Jowett 1997). Le périmètre mouillé et le débit sont aussi liés par une fonction de puissance (Mackey et al. 1998 ; Équations (1.7) et (1.8):

$$wp = w + 2 * d \quad (1.7)$$

$$wp = aQ^b \quad (1.8)$$

w : largeur au miroir de la section du cours d'eau (m) ;

d : profondeur moyenne de la section du cours d'eau (m) ;

wp : périmètre mouillé de la section du cours d'eau (m) ;

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

a, b : constantes numériques.

Dans l'équation (1.7), le périmètre mouillé est calculé pour une section de rivière approximée comme ayant une forme rectangulaire, en considérant la valeur de la largeur au miroir très élevée par rapport à celle de la profondeur moyenne, durant la période d'étiage. À partir de la relation débit-périmètre mouillé, l'objectif est de trouver le point de rupture entre les deux variables, autrement dit le débit en-dessous duquel les variables hydrauliques susmentionnées et, conséquemment, l'habitat physique disponible diminue fortement avec une diminution du débit (Figure 1.7). La Figure 1.7, montre les variables hydrauliques pouvant être étudiées en fonction du débit et l'emplacement des points de rupture. Parfois, ce point de rupture peut correspondre au débit plein bord, le débit à partir duquel l'eau déborde sur la plaine inondable. Aussi, hors périodes de sécheresse et dépendamment de la forme du lit de la rivière, le point de rupture peut ne pas être atteint (Jowett 1997). Des méthodes de calcul peuvent être utilisées pour trouver ce point comme la méthode de la rupture de pente ou la méthode de maximum de courbure (Gippel and Stewardson 1998). La première méthode est appuyée par Shang (2008) comme étant la plus conservatrice pour les écosystèmes lotiques. De plus, des méthodes hydrauliques peuvent être combinées à des méthodes hydrologiques (Ksiazek et al. 2019). Cela permet d'améliorer l'aide à la décision pour déterminer les débits environnementaux en créant un lien entre le régime d'écoulement d'une rivière et la disponibilité physique des habitats. L'un des points importants de l'étude de Ksiazek et al. (2019) est qu'il faut préalablement à une étude hydraulique, recenser tous les habitats, caractériser leur forme et décrire tout l'écosystème aquatique qui en dépend. Les seuils (rifles) sont mis de l'avant, la profondeur, la vitesse et la surface variant très sensiblement avec un changement de débit (Ksiazek et al. 2019). Le recensement des habitats et de leurs caractéristiques et le point central de la méthode des modèles d'habitat.

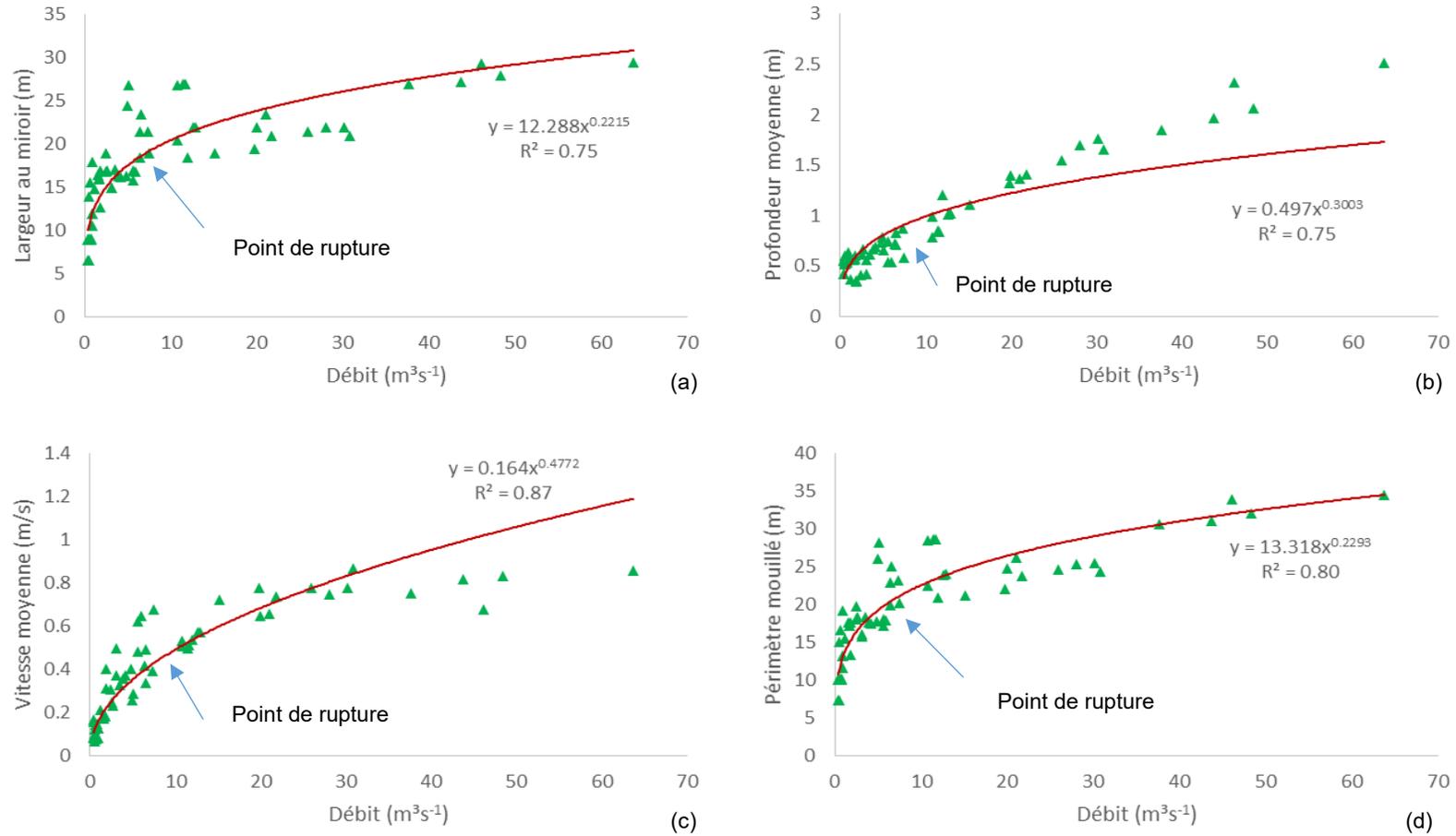


Figure 1.7 Largeur au miroir (a), profondeur moyenne (b), vitesse moyenne (c), et périmètre mouillé (d) en fonction du débit pour la rivière du Loup (Station 022507 – section 54, issue des données du CEHQ)¹

¹ Une campagne de mesure de jaugeage a été menée durant l'été 2018 avec des mesures ciblant les périodes d'étiage. Le Tableau-A IV en Annexe présente les instruments utilisés et le Tableau-B IV les mesures de jaugeage réalisées pour les sites sélectionnés.

1.2.4 Chronologie historique et méthodes exhaustives

Chronologie historique des débits environnementaux

L'origine des débits environnementaux puise sa source à la fin des années 1940 dans l'ouest des États-Unis (Tharme 2003, Poff et al. 2017). La chronologie historique qui suit (Poff et Matthews 2013 ; Figure 1.8), revient sur l'évolution du concept des débits environnementaux, répartie principalement sur quatre décennies :

- Fin 1980 à mi-1990 : Apparition de la problématique, état des lieux des savoirs sur le régime hydrologique naturel et la dégradation du régime hydrologique par l'homme ;
- Mi-1990 à mi-2000 : Augmentation des études de cas, intégration du principe d'altération du débit dans la gestion des ouvrages hydrauliques et ratification de la Déclaration de Brisbane (2007) sur les principes liés aux débits environnementaux ;
- Mi-2000 à aujourd'hui : Sensibilisation au niveau mondial à la problématique des débits environnementaux, développement de modèles liant climat, gestion de l'eau et impacts sur les écosystèmes lotiques, proposition de la méthode ELOHA (*Ecological Limits of Hydrologic Alteration*), une méthode exhaustive devenue relativement courante ;
- Quatre défis pour les années à venir : les changements climatiques, les modèles hydrologiques mondiaux et leurs échelles de précisions, l'inclusion des débits environnementaux dans la gouvernance et le développement de la dimension socio-écologique dans la détermination des débits environnementaux (Arthington et al. 2018, Poff et al. 2017, Poff 2017).

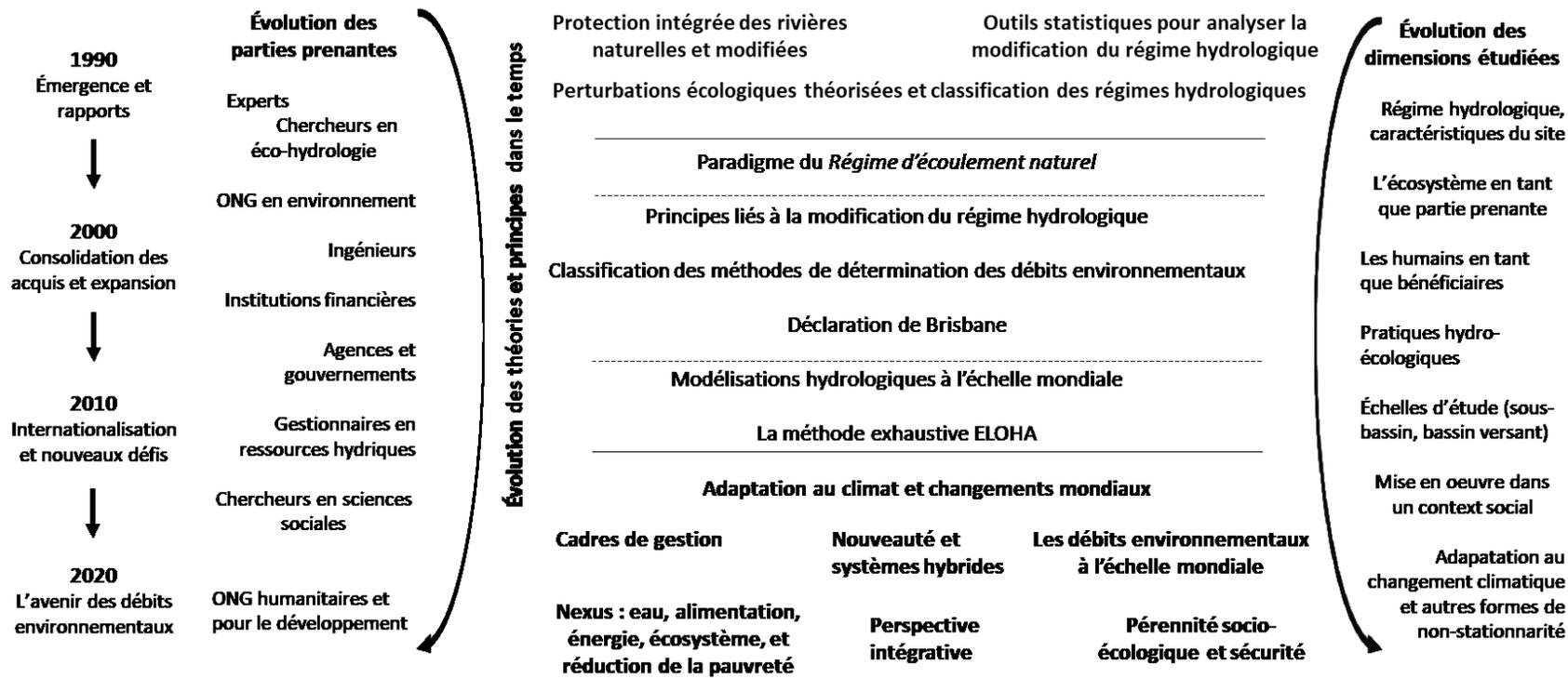


Figure 1.8 Chronologie historique des composantes des études sur les débits environnementaux

Adaptée de Poff et al. (2017)

À la Figure 1.8, il apparaît au cours du temps qu'en plus de la multiplication des modèles de détermination des débits environnementaux, il y a une évolution du nombre de dimensions pris en compte et du nombre d'acteurs impliqués. La Figure 1.8 est une réflexion approfondie d'une précédente chronologie initiée par Poff et Matthews (2013).

Les méthodes exhaustives de détermination des débits environnementaux

Quelques méthodes exhaustives ont précédé l'ELOHA (figure 1.9), notamment rappelées par Arthington (2012). La méthode *Benchmarking* est l'une des premières proposée (Brizga et al. 2002). Elle consiste à évaluer différents niveaux d'altérations du régime hydrologique à l'échelle d'un bassin versant, en lien avec des états de référence des écosystèmes lotiques (Arthington 2012). Cette méthode comprend quatre phases : (1) formation d'un groupe d'experts, (2) détermination des tendances et conditions écologiques du site d'étude, (3) détermination des risques liés à l'altération hydrologique et (4) évaluation de différents scénarios, les résultats étant sous la forme d'une échelle de risques (Brizga et al. 2002, Arthington 2012). La méthode DRIFT (*Downstream Response to Imposed Flow Transformation*) a été proposée par King et al. (2003), en mettant de l'avant un plus faible nombre d'information requis (Arthington 2012) et comporte quatre phases : (1) création d'un modèle biophysique indiquant les altérations associées à un changement du régime hydrologique avec son degré de sévérité; (2) description du profil des usagers et de leurs besoins en eau; (3) élaboration de scénarios d'altération en prenant en considération les étapes 1 et 2; (4) estimation des coûts pour compenser et atténuer les altérations identifiées pour différents scénarios. La méthode DRIFT est une évolution de la méthode BBM (*Building Block Methodology*; King et al. 2000). Enfin, la méthode ELOHA (*Ecological Limits of Hydrologic Alteration*) de Poff et al. (2010) propose de préciser les données en lien avec les différents types de rivières et d'ajouter une dimension sociale à la dimension scientifique pour définir les débits environnementaux à l'échelle d'un bassin versant (Figure 1.9). Il y a quatre étapes dans le processus scientifique d'ELOHA: (1) modéliser et décrire le profil hydrologique du bassin versant ciblé ; (2) classer les rivières d'après leurs caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques ; (3) analyser l'altération hydrologique du régime d'écoulement par rapport au régime naturel ; et (4) faire le lien entre l'évolution du débit et l'écologie des rivières du bassin versant ciblé (Poff et al. 2010).

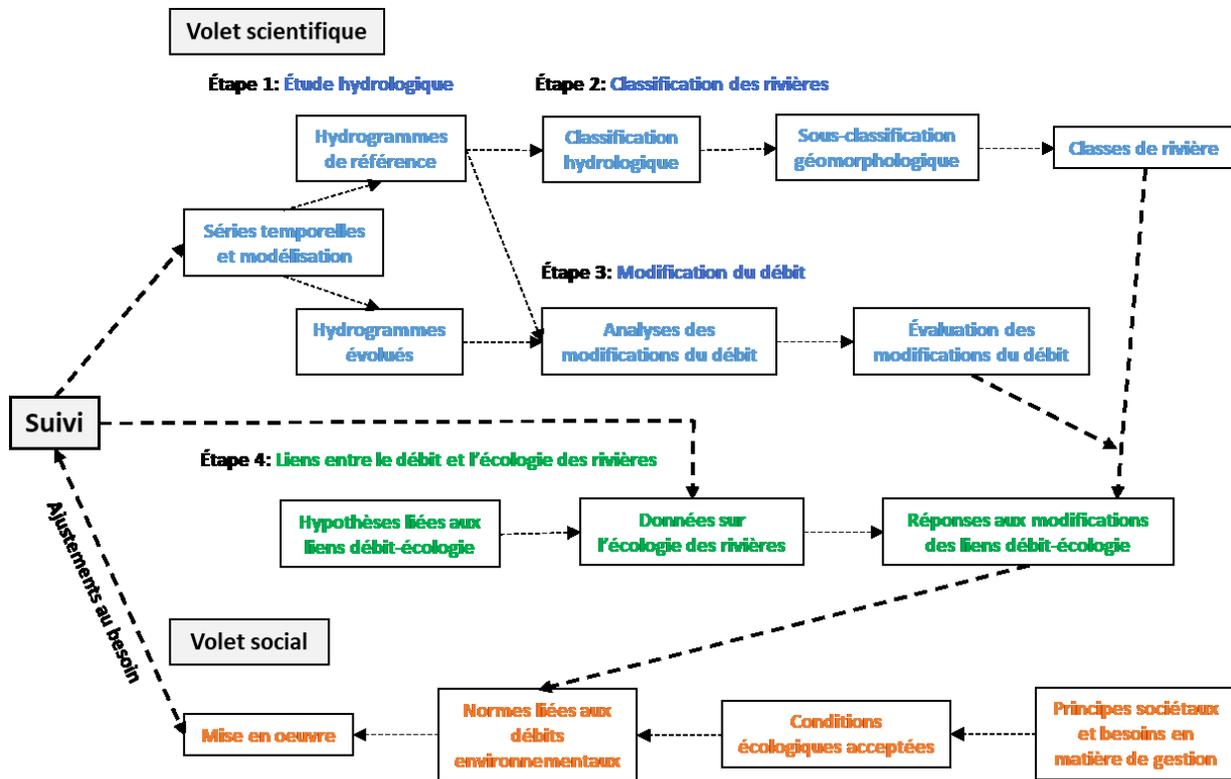


Figure 1.9 Processus scientifique et social de la méthode ELOHA

Adaptée de Poff et al. (2010)

La troisième étape du processus scientifique d'ELOHA (*flow alteration*) traduit toute la complexité de déterminer les débits environnementaux. Il s'agit de constater, d'anticiper, de formuler, et d'évaluer l'impact de chaque source d'altération possible et d'intégrer les réponses du milieu lotique, pour chaque site au sein d'un même type de système, et chaque usage pré-identifiés (ou *nœuds*, Poff et al. 2010). L'altération hydrologique se rapporte au pourcentage de déviation entre la référence établie pour chaque *nœud* et les observations plus récentes, post-altération. Enfin, la quatrième étape scientifique d'ELOHA (*flow-ecology linkages*) requiert des connaissances hydro-écologiques pour comprendre et décrire la variation des réponses écologiques en lien avec un débit altéré (Poff et al. 2010). La Figure 1.10, reprise dans les rapports d'étude ELOHA, schématise dans les grandes lignes, les réponses écologiques possibles en fonction du stress appliqué. Cela va de la perte de quelques espèces localement à l'altération des structures écosystémiques et des fonctions biologiques (Davies et Jackson 2006).

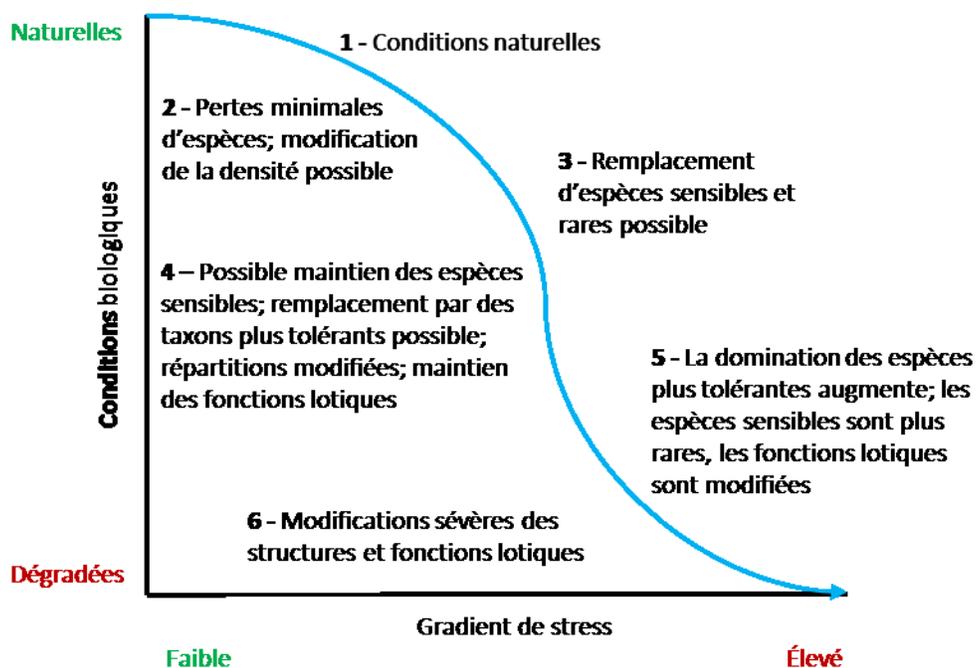


Figure 1.10 Conditions d'altération biologiques en fonction de l'augmentation des facteurs de stress
Adaptée de Davies et Jackson (2006)

Propositions d'amélioration d'ELOHA et de la mise en œuvre des méthodes exhaustives

La formule SUMHA (*Sustainable Management of Hydrological Alterations*), proposée par Pahl-Wostl et al. (2013), vise à approfondir et préciser les systèmes de gestion et de gouvernance décrit par la méthode ELOHA. D'après Pahl-Wostl et al. (2013), cinq points seraient à considérer et à intégrer dans le processus: (1) le contexte sociétal et environnemental ; (2) le système environnemental dans un bassin versant ; (3) le système gouvernemental ; (4) l'interface entre les systèmes humains et environnementaux ; et (5) les options et objectifs de gestion. A noter que pour ELOHA et SUMHA, il n'est pas attendu que le régime hydrologique naturel des rivières soit la référence de base (Pahl-Wostl et al. 2013). Sélectionner le régime hydrologique naturel comme étant une base de comparaison doit être un objectif défini et justifié par les parties prenantes du processus social, d'autant plus qu'il n'est pas toujours facile de définir le régime hydrologique naturel des rivières (Pahl-Wostl et al. 2013). En effet, pour Pahl-Wostl et al. (2013), une modification de 20% et plus du régime hydrologique naturel augmente le risque de modifier moyennement à fortement les services écosystémiques et la santé des rivières. Aussi, récemment, Anderson et al. (2019), ont proposé une revue d'expériences dans l'application de la formule SUMHA dans des contextes sociaux où sont identifiés des besoins en eau spirituels et culturels habituellement négligés quand il s'agit de choisir des débits environnementaux. À propos

de la méthode ELOHA, St-Hilaire et al. (2021) ont proposé de compléter deux dimensions du processus scientifique (Figure 1.9) : (1) l'ajout de la classification thermique des rivières à l'étape 2 (Daigle et al. 2019, 2021) ; (2) l'ajout d'une étude de scénarios écologiques et hydro-thermiques en lien avec les changements climatiques à l'étape 4.

Pour finir, Opperman et al. (2018) proposent un protocole pour gérer les difficultés et/ou manques d'information limitant l'étude des débits environnementaux et ralentissant leur implémentation. Ainsi, trois objectifs sont proposés : (1) cibler les financements pour réduire les incertitudes et combler l'information manquante pour l'étude des débits environnementaux ; (2) organiser un atelier composé d'usagers, d'experts et de gestionnaires afin de dialoguer et de faire des recommandations élaborées et (3) améliorer la mise en œuvre à long terme. Pour la seconde étape, chaque recommandation doit :

- Correspondre à une composante hydrologique et être en lien avec un besoin identifié ;
- Comporter des informations hydrologiques précises (débit, moment, durée...) ;
- Permettre d'identifier les manques afin de prioriser les actions pour les combler ; et
- Conçue pour savoir comment adapter à plus ou moins long terme la gestion des débits environnementaux, notamment au niveau de la faisabilité et de la modélisation.

1.2.5 Site d'étude et recherches au Québec

Site d'étude

Le Québec méridional regroupe les régions hydrographiques R01 à R08 (Figure 1.11). Cette superficie de 730 000 km² correspond à celle traitée par l'Atlas hydro-climatique du Québec (MELCC, 2018). Le Québec méridional compte les bassins versants des affluents du fleuve Saint-Laurent, de la rivière des Outaouais, de la rivière Saguenay, de la Gaspésie, de la Côte-Nord et d'une partie de l'Abitibi-Jamésie. La base de données de la Direction de l'Expertise Hydrique du Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatique du Québec (DEHQ) regroupe le suivi hydrométrique de 749 stations géo-référencées dans les 13 régions hydrographiques découpant le Québec (230 stations de mesures de niveau d'eau et 519 stations de mesures de débit). Le suivi différencie trois régimes d'écoulement : naturel, influencé quotidiennement et influencé mensuellement (par des ouvrages hydrauliques). Pour le Québec méridional, un total de 293 stations hydrométriques avec un régime d'écoulement naturel est dénombré, pour des périodes d'enregistrement allant de 4 à 95 ans et une moyenne d'environ 23 ans. Une présentation de la gestion des débits d'étiage au Québec est proposée en Annexe V.

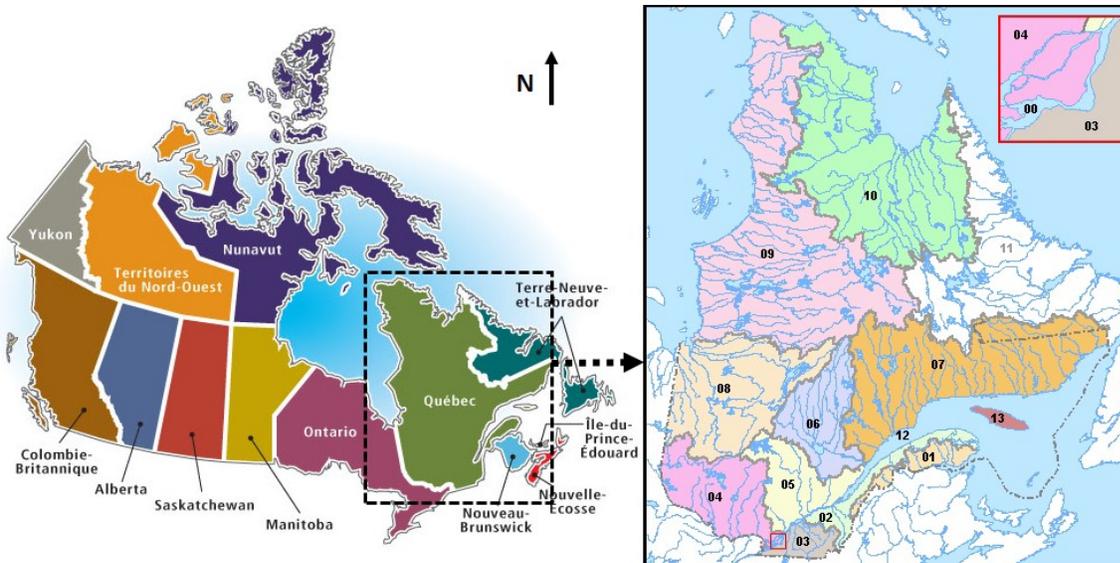


Figure 1.11 Canada (gauche) et Québec (droite)

Adapté de : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/legislation-gouvernance/provinces-territoires.html> ; gauche) et MELCC (2020 ; droite). R00 : Fleuve Saint-Laurent ; R01 : Baie-des-Chaleurs et Percé ; R02 : Saint-Laurent sud-est ; R03 : Saint-Laurent sud-ouest ; R04 : Outaouais et Montréal ; R05 : Saint-Laurent nord-ouest ; R06 : Saguenay et Lac-Saint-Jean ; R07 : Saint-Laurent nord-est ; R08 : Baies de Hannah et de Rupert ; R09 : Baie-James et d'Hudson ; R10 : Baie d'Ungava ; R11 : Mer du Labrador ; R12 : Îles du fleuve Saint-Laurent ; R13 – Îles du golfe du Saint-Laurent

Régions hydrologiques et changements climatiques au Québec

Le Québec méridional a déjà été divisé en régions hydrographiques définies géographiquement en huit zones contiguës. Toutefois, dans les études hydrologiques en lien avec les écosystèmes lotiques, il est courant de plutôt délimiter des *écozones* (Hulley et al. 2014), ou des *écorégions* dans le cas du Québec (Belzile et al. 1997), pour calculer les débits environnementaux. Plusieurs études de régionalisation hydrologiques ont été proposées pour le Québec sur base d'analyse multivariée avec des variables climatiques, physiographiques et hydrologiques (Anctil et al. 2000, Assani et Tardif 2005, Daigle et al. 2011, Ouellet-Dallaire et al. 2019). Assani et al. (2006a) ont aussi proposé une division du territoire à l'aide de paramètres éco-géographiques, puis à l'aide d'indices climatiques (Assani et al. 2011). Précédemment, les caractéristiques hydrologiques décrivant le " paradigme de l'écoulement naturel " de Poff et al. (1997) avaient été corrélées aux indices climatiques (Assani et al. 2010a) pour le contexte québécois. Aussi, une corrélation avait été observée entre la variabilité du débit des rivières du Québec méridional et les oscillations arctique, australe et/ou nord-atlantique (Assani et al. 2006b). La partie nord du Québec méridional (rive nord du fleuve Saint-Laurent) étant principalement influencée par l'oscillation multidécennale atlantique et la partie sud, par l'oscillation arctique (Assani et al. 2010b). De plus, plusieurs

modèles hydrologiques et climatiques ont été utilisés pour des bassins versants localisés dans le sud du Québec, pour évaluer la variabilité des débits (Quilbe et al. 2007, Dibike et Coulibaly 2007), les impacts potentiels du changement climatique sur l'agriculture (e.g. Gombault et al. 2015) ou les activités hydroélectriques (Minville et al. 2010) ou la variabilité des crues saisonnières (Roy et al. 2001), pour en nommer quelques-unes.

Concernant l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie des rivières du Québec méridional, le MELCC produit un Atlas hydro-climatique depuis 2013 et la plus récente édition date de 2018 (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/Hydraulicite/Qmoy.htm>). Les observations faites proviennent d'environ 50 stations hydrométriques ayant un régime d'écoulement naturel (MELCC 2018). Les débits ont été simulés à l'aide du modèle hydrologique HYDROTEL, présenté dans la partie 4 (Fortin et al. 1995), et sont basés sur les scénarios de changements climatiques RCP4.5 et RCP8.5 adoptés par le GIEC (2014). Le 5^{ème} rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), présente quatre scénarios de changements climatiques (issus du CMIP5²) nommés, du plus au moins optimiste : RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 et RCP8.5. Pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) et ainsi limiter l'augmentation des températures, le scénario le plus optimiste propose de limiter l'augmentation de la température à +2°C d'ici 2100. Ce qui revient à diminuer l'émission de GES anthropique de 10% chaque décennie (GIEC 2014).

Dans l'Atlas hydro-climatique du Québec méridional, les scénarios utilisés indiquent que les changements climatiques feront augmenter la fréquence des phénomènes et événements climatiques extrêmes, avec une augmentation de l'étiage hivernal et une diminution de l'étiage estival. Ainsi, la DEHQ a identifié cinq objectifs pour répondre aux besoins d'utilisateurs identifiés (villes, agriculteurs, industries ; MELCC 2018):

- Répondre aux préoccupations liées à l'eau : prélèvement, qualité et quantité ;
- Prévenir les épisodes de forts débits : inondations et érosion du lit des berges ;
- Faire évoluer la gestion des barrages ;
- Développer la conception d'ouvrages de drainage ;
- Prévenir l'impact des effets du changement climatique sur la santé des écosystèmes.

² CMIP5 : Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 du programme mondial de recherche sur le climat.

D'après Ouranos (2015), les changements climatiques peuvent entraîner des risques cumulatifs sur les régimes hydrologiques et les écosystèmes aquatiques, notamment sur :

- Les pêches et l'aquaculture : la modification des *propriétés physico-chimiques de l'eau et de la qualité de l'habitat du poisson* impacte la *physiologie, la phénologie et la répartition des espèces aquatiques*, se répercutant sur la *dynamique des populations et la composition ichtyologiques et la productivité des pêches* ;
- Les écosystèmes du fleuve St-Laurent : *l'augmentation des températures, les bas niveaux d'eau et l'expansion de certaines plantes envahissantes, en particulier le roseau envahisseur, vont causer la perte d'habitats riverains de qualité pour la faune et entraîneront des pertes significatives de frayères, notamment dans le Lac Saint-Pierre, ce qui pourrait se répercuter sur les populations de poissons et sur les activités de pêches.*

1.3 Structure de la thèse

La structure de la thèse est sous forme d'articles scientifiques, résumés ainsi :

Article 1 : Évaluation des débits environnementaux au Québec méridional: sensibilité des échelles spatiales et temporelles

Cette première étude de cas prend l'exemple de la politique de partage des eaux du Québec méridional appliquant une seule métrique hydrologique pour limiter les prélèvements en période d'étiage. Le choix de limiter les prélèvements sur la base de la métrique 7Q2 (débit minimum d'une moyenne mobile de sept jours et une période de retour de deux ans) est alors questionné. En effet, la littérature scientifique remet en cause le potentiel de cette métrique 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 métriques hydrologiques pour estimer les débits environnementaux selon l'échelle spatiale et/ou temporelle d'application. 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 métriques hydrologiques 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 du 7Q2, les méthodes utilisées sont le 7Q10 (débit minimum d'une moyenne mobile de sept jours et une période de retour de dix ans), 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 de l'année ayant le plus faible débit) ainsi que 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 d'en présélectionner six pour ensuite former six groupes de stations délimitant de nouvelles régions (PC-HC). Ceci, afin de comparer les résultats spatialement avec les actuelles régions hydrographiques (R0X). Les hypothèses testées sont :

- Une seule métrique hydrologique ne peut convenir à un territoire de 730 000km² ;
- Les métriques hydrologiques calculées pour une temporalité interannuelle étant influencées par la saison atteignant le plus faible débit, il faut affiner la temporalité à la saisonnalité des étiages ;
- Les rivières peuvent être regroupées régionalement d'après leurs caractéristiques hydrologiques en période d'étiage;
- L'utilisation de débits seuils théoriques, ici issus de la méthode de Tennant, aide à comparer et choisir un ou plusieurs débits environnementaux issus des métriques hydrologiques selon les restrictions voulues.

Article 2 : Le périmètre mouillé pour évaluer les débits environnementaux dans les rivières du Québec méridional (Canada)

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. Cette seconde étude poursuit la réflexion de la première recommandant l'usage de plusieurs métriques hydrologiques pour estimer les débits environnementaux dans des régions basées sur des caractéristiques d'étiage. La métrique hydrologique AQ50 (débit médian du mois d'août), donne les plus hautes valeurs de débit, sur la base de comparaison avec des débits seuils issus de la méthode de Tennant. Dans ce second article, les huit métriques hydrologiques pour déterminer les débits environnementaux (dont les 7Q2 et 7Q10 ; débits minimums d'une moyenne mobile de sept jours et une période de retour de deux et dix ans) sont à nouveau calculées, pour comparer, cette fois-ci, la valeur de leur périmètre mouillé associé, pour un même cours d'eau. La métrique 7Q10 a été conservée car elle est utilisée dans les rivières du Québec méridional pour répondre aux objectifs de rejets environnementaux.

Le périmètre mouillé est un potentiel 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 pente de la courbe de régression de puissance indique la valeur de débit à partir de laquelle le périmètre mouillé diminue fortement, ce qui indique

une plus forte diminution de l'habitat disponible et possiblement de 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 retenue et la valeur de son périmètre mouillé associé utilisée comme un seuil de protection des écosystèmes lotiques. Ce seuil est distinct des seuils de la méthode de Tennant considérés comme faibles (< 10% du débit moyen interannuel ; 10%MAF) et acceptables (25% et 30% du débit moyen interannuel ; 25%MAF et 30%MAF). La présente étude porte sur un échantillon de 43 sites issus de 35 rivières.

Les hypothèses testées sont :

- Le débit associé à la méthode du maximum de courbure n'est pas conservateur par rapport aux débits seuils théoriques de Tennant ;
- L'association d'un débit seuil théorique (méthode de Tennant) et d'un périmètre mouillé seuil théorique (maximum de courbure), permet une analyse plus complète et, de ce fait, augmente la probabilité de préserver l'habitat aquatique durant les étiages ;
- Les débits seuils théoriques de Tennant peuvent être pertinents pour les rivières du Québec méridional ;

Article 3 : Évaluation des débits environnementaux dans le contexte du changement climatique : une étude de cas dans le Québec méridional (Canada)

La métrique hydrologique 7Q2 (débit moyen sur sept jours avec une période de retour de deux ans) est toujours d'actualité dans la gestion des prélèvements d'eau dans tout le Québec méridional. Les deux précédentes études proposent l'utilisation du débit mensuel médian d'août (AQ50) en été, du LQ50 (débit médian du mois au plus faible débit) en hiver, ou d'un pourcentage du débit annuel moyen (25%MAF ou 30%MAF) comme débits environnementaux conservateurs, par rapport à des débits seuils théoriques (méthode de Tennant), dans les rivières du Québec méridional. Dans cette dernière étude de cas, six scénarios de changement climatique ont été pris en compte afin d'anticiper leurs effets sur la gestion de l'eau en période d'étiage. Les métriques hydrologiques calculées à partir des débits simulés par le modèle hydrologique HYDROTEL ont été comparées : (a) au sein de régions homogènes en terme d'étiages, définis en utilisant la classification hiérarchique ascendante ; (b) pour trois horizons temporels : 1990, 2020 et 2050 et trois périodes : annuelle, estivale ou hivernale ; et (c) avec un indicateur de la quantité d'habitat aquatique disponible, le périmètre mouillé. Les résultats pour la période hivernale seront intéressants, car il y a un intérêt pour la neige artificielle au Québec méridional.

Le premier constat issu de l'Atlas hydro-climatique du Québec méridional est que les débits estivaux diminueront et les débits hivernaux augmenteront. Ici, les hypothèses testées sont :

- Les métriques hydrologiques issues de l'analyse fréquentielle vont devenir difficiles à interpréter dans un cadre non-stationnaire ;
- La métrique hydrologique AQ50 demeure pertinente dans un contexte où les débits estivaux diminuent.

2 PREMIER ARTICLE

Southern Quebec environmental flow assessments: spatial and temporal scales's sensitivity

Évaluation des débits environnementaux au Québec méridional: sensibilité des échelles spatiales et temporelles

Auteurs :

¹Laureline Berthot, ¹André St-Hilaire, ²Daniel Caissie, ³Nassir El-Jabi, ⁴Judith Kirby et ⁴Sébastien Ouellet-Proulx

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

²Université de Moncton, Ingénierie civile, Moncton, Canada

³Pêches et Océans Canada, Section des habitats d'eau douce, Moncton, Nouveau Brunswick, Canada

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

Titre de la revue :

Revue canadienne des ressources hydriques

Publié le 20 octobre 2020

DOI : 10.1080/07011784.2020.1834881

Contribution des auteurs :

L. Berthot a contribué à la formulation de la problématique, a mené les analyses et la rédaction. A. St-Hilaire a contribué à la formulation de la problématique, de même qu'à l'aide de commentaires et de corrections notables en première lecture. D. Caissie, N. El-Jabi, J. Kirby et S. Ouellet-Proulx ont apporté des idées pour compléter l'analyse, de même que des commentaires et corrections notables en seconde relecture.

2.1 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 lotiques. Au Québec méridional, les prélèvements d'eau sont actuellement limités à un maximum de 15% du 7Q2 (débit minimum d'une moyenne mobile de sept 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 sept 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.

2.2 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 (low flow with a return period of two years and seven-day duration) 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 ones could be considered useful metrics to assess environmental flows 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 least conservative for rivers having the lowest flow regime. To conclude, assessing several regionally adapted environmental flow metrics is recommended rather than systematically using the 7Q2 for Southern Quebec.

2.3 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 livelihoods, sociocultural values 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. 2013). However, over two hundred methods 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 studies describe 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 (Acreman and Ferguson 2012; Poff et al. 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 Quebec 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 (DEFACC 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).

Currently, 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, El-Jabi, and Hébert 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 least 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 (DEFACC 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.

2.4 Methodology

2.4.1 Hydrological data

Historical daily flow data come from 98 hydrometric stations spread in 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). Four 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, El-Jabi, and Hébert (2007);
- (4) Independence, stationarity and homogeneity hypothesis needed to be validated (see 2.4.3).

The selected stations, with record lengths from 20 to 90 years (median of 36, mean of 37, and 64 stations > 30 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 is 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 12,600 mm (HCAN 2013). Ouellet Dallaire, Lehner, and Creed (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.

2.4.2 Low flow metrics

The chosen flow metrics were: the mean 7-day low flow with return periods 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 requirement to maintain water quality (for dilution purposes); however, it has been used in some cases to calculate environmental flows (Linnansaari et al. 2013). 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, El-Jabi, and Hébert (2007) and fish habitat protection (Tennant 1976). Nevertheless, the 7Q10 was included in this study for intercomparison 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, El-Jabi, and Hébert 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 latter 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 rivers (Linnansaari et al. 2013). Notably, the Q50 for August is also called the Aquatic Base Flow (Linnansaari et al. 2013). The AQ50 flow metric will also be calculated here, 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, Caissie, and El-Jabi (2015), the LQ50 was shown to be a relevant environmental flow metric in New Brunswick (generally occurring in August or 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, Caissie, and El-Jabi 2015). This flow metric was also calculated here, 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.

2.4.3 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 the latter 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. 2013) 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.

2.4.4 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, Favre, and Musy 2008) as shown in Equation (2.1) for low flows:

$$t(x) = \frac{1}{1-p} \quad (2.1)$$

$t(x)$: 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 (Smakhtin 2001; WMO 2008) 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 2019), 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, the GEV was thus selected, with cumulative probability density function defined in Equation (2.2):

$$F(x; \mu, \sigma, \varepsilon) = \exp \left\{ - \left[1 + \varepsilon \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\varepsilon} \right\} \quad (2.2)$$

With ε , μ and σ , that are the shape, location and scale parameters of the distribution, respectively, 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 and remove outliers data.

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 index 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 -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 -value > 0.05).

2.5 Results

2.5.1 Overview of low flow results

Figure 2.1 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 have the lowest flow values for 43, 24 and 29 stations, respectively (Figure 2.1 (a)). When comparing flow metrics to the same thresholds seasonally, August (Figure

2.1 (b)) and March (Figure 2.1 (c)) values of the 7Q10, Q95 and Q90 indicate that 20 to 27 stations do not exceed the 10%MAF. The AQ50 flow metric has the highest values for all the periods. Moreover, the differences in 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 reveals that: (1) winter low flow metrics are lower than summer low flow metrics; (2) the AQ50 has 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.

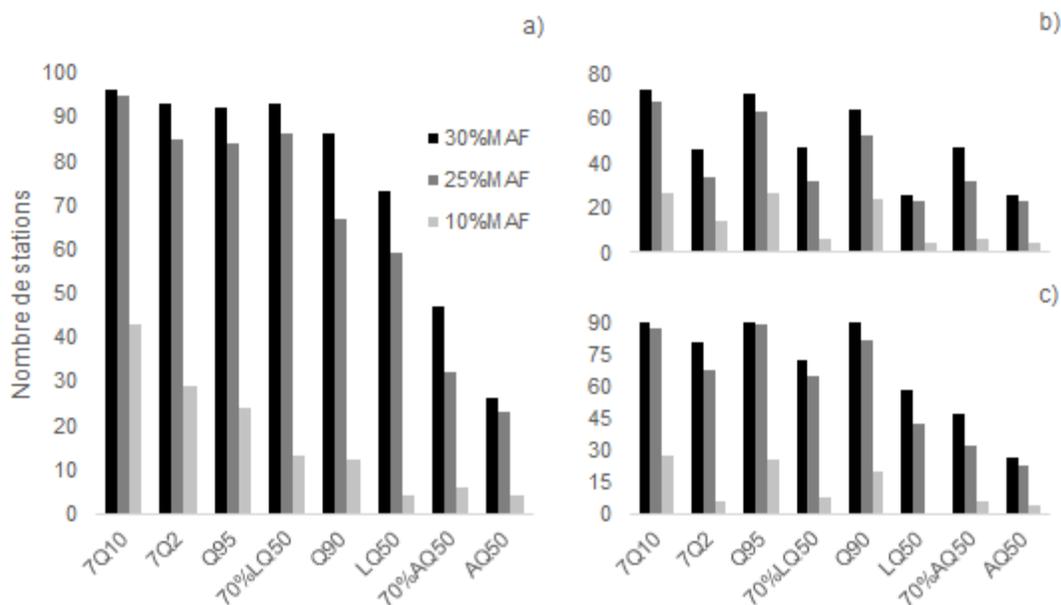


Figure 2.1 Number of stations with metrics under the 30%MAF, 25%MAF, and 10%MAF thresholds for inter-annual (a), March (b) and August (c) flow metrics.

2.5.2 New hydrological regions

PCA was used to select explanatory hydrological indices (HI), used to generate new regions, among 71 HIs 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 HIs that explained 79% of the variance. Table 2.1 lists the HIs retained to make the ascendant hierarchical clustering. The original abbreviation of each HI is also provided for cross-reference with Daigle et al. (2011).

Table 2.1 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 ($L.s^{-1}.km^{-2}$) |
| A27 | 5-year annual minimum daily discharge ($L.s^{-1}.km^{-2}$) |
| D16 | 3-day minimum divided by the median of the entire record (dimensionless) |
| F2 | Average number of flow events with flows below a threshold equal to 5% of the mean flow value for the entire flow record (dimensionless) |
| T3 | Average Julian date of the seven annual 1-day minimum discharges (Julian date) |
| V8 | Coefficient of variation of annual 7-day minimum flow (dimensionless) |

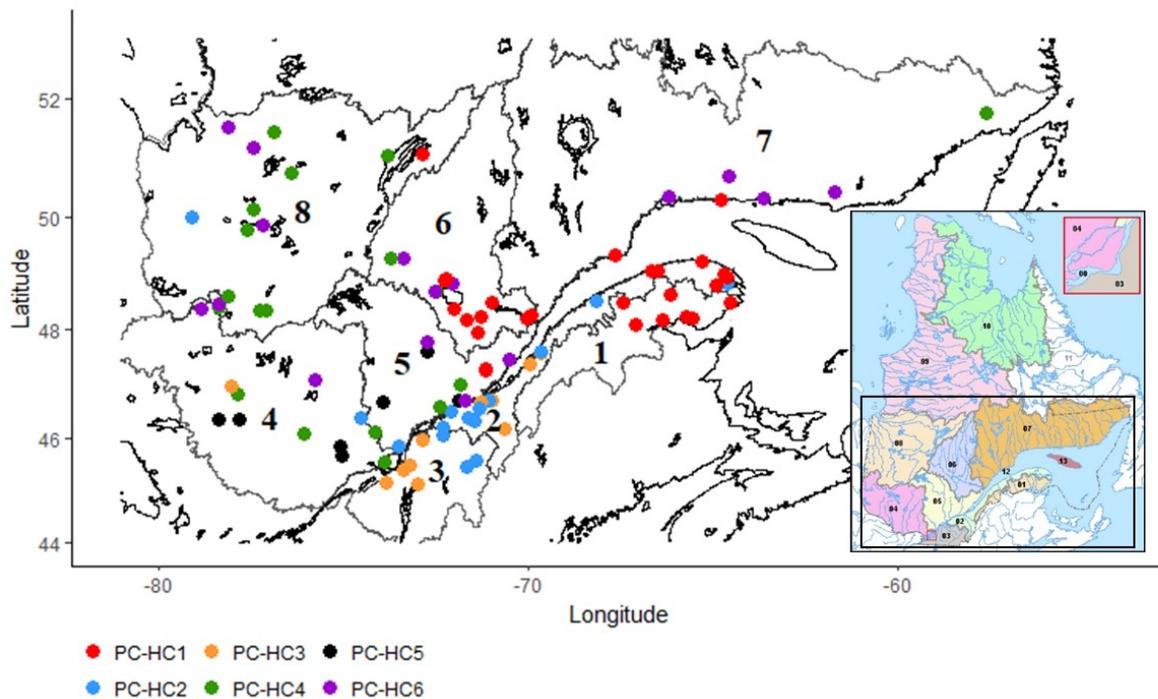


Figure 2.2 Hydrometric stations by PC-HC groups compared to original hydrological regions showed by numbers (Quebec map from DEFACC 2020)

Figure 2.2 presents the hydrometric stations grouped by PC-HC and the boundaries of the eight hydrological regions. 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 northwestern 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 2.3 shows the new PC-HC groups of stations. The groups PC-HC1, PC-HC2 and PC-HC5 have a mean catchment size of

approximately 1600 km², 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 larger mean catchment size (18,087; 8509 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). Nonparametric 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.

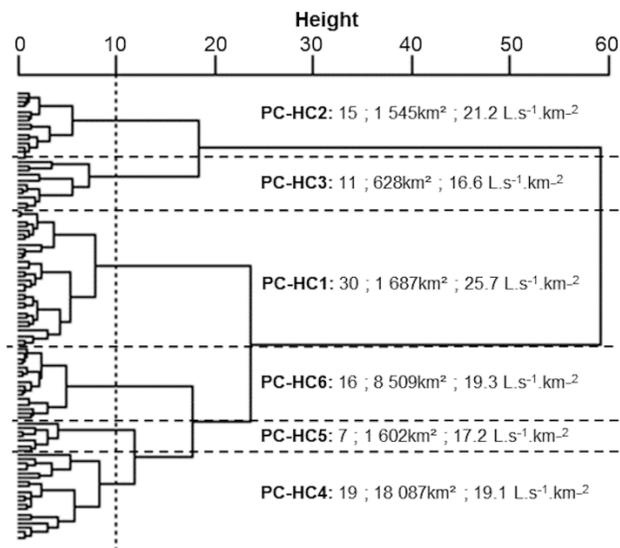


Figure 2.3 Ascendant hierarchical clustering of hydrometric stations by PC-HC groups: Number of hydrometric stations; Mean catchment sizes; Mean of the MAF in specific flows.

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

In Figures 2.4 and 2.5, 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 lowest to highest median values. 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 ($\geq 30\%$ MAF), in ascending order, the 70%AQ50, LQ50 and AQ50 flow metrics can be considered as adequate within hydrological regions (Figure

2.4), and the 70%AQ50 and Q90 flow metrics meet this criterion for PC-HCs (Figure 2.5). 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-HCs, according to Caissie and El-Jabi (1995) threshold ($\geq 25\%$ MAF). Metric orders seem to be independent from the mean catchment size 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-HCs. 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-HCs. For the PC-HC2 and PC-HC3 groups, none of the metrics could 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 2.4 and 2.5 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 are lower for the 7Q10, 7Q2, 70%LQ50, Q95, Q90 and LQ50 flow metrics of the PC-HCs when comparing to the R0s, whereas for the 70%AQ50 and the AQ50 flow metrics, IQRs are smaller for R0s compared to PC-HCs. This indicates that PC-HC groups are generally more homogeneous than the current hydrological regions in the context of environmental flow metrics selection.

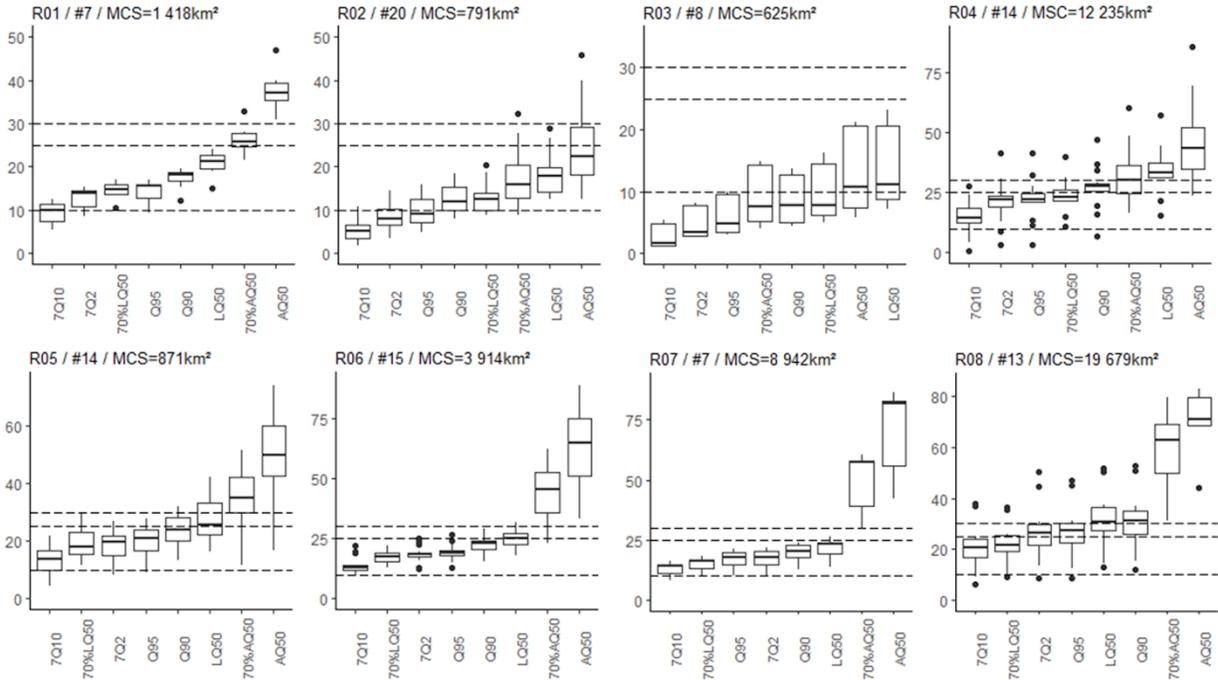


Figure 2.4 Inter-annual metrics results divided by MAF for hydrological regions.

#: number of stations, MCS: Mean Catchment Size, horizontal lines: 10%MAF, 25%MAF and 30%MAF

2.5.4 Monthly low flow metrics within PC-HC

Figure 2.6 presents radial plots of the eight metrics applied to monthly flows, normalized 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-HCs. 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-HCs 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 2.5), besides the fact 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 corresponded to pairs of very similar values for all PC-HCs, 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 2.5). 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 all above the 30%MAF threshold. At last, PC-HC4 and PC-HC6 presented all flow metrics above the 30%MAF.

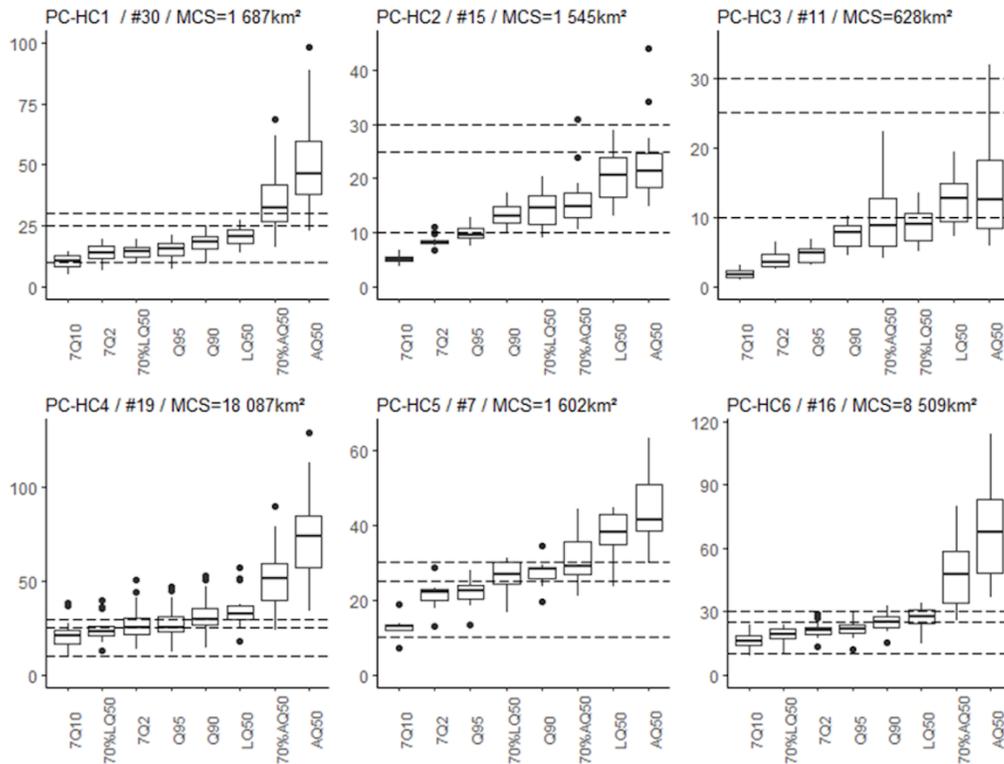


Figure 2.5 Inter-annual metrics results divided by MAF for PC-HC.

#: number of stations, **MCS:** Mean Catchment Size, horizontal lines: 10%MAF, 25%MAF and 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 (Figure 2.5), 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-HCs. 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-HCs;
- (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 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.

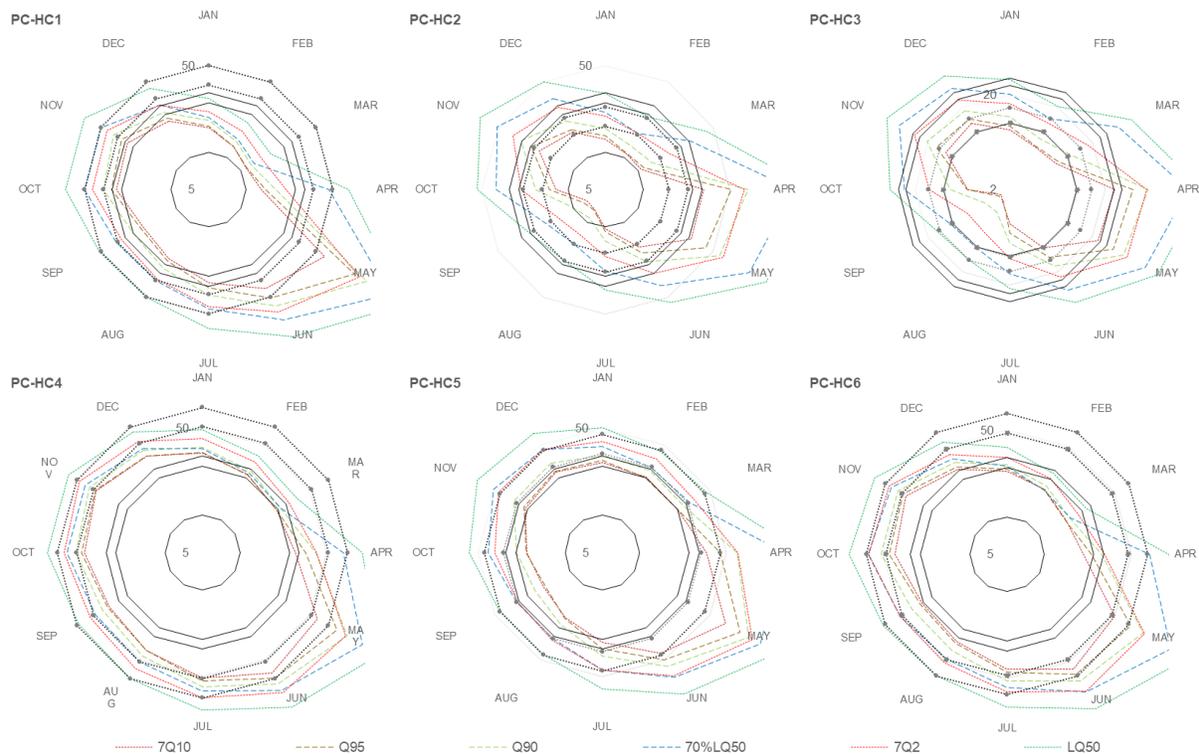


Figure 2.6 Mean of monthly metric results divided by MAF for PC-HC groups.

Solid black lines and dotted grey lines with round markers, from the inner to the outer delineations, are respectively the 10%MAF, 25%MAF, 30%MAF, 70%AQ50 and the AQ50 flow metrics.

2.5.5 Environmental flow values and catchment size

Figure 2.7 presents the more conservative and restrictive inter-annual flow metrics (in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) 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 2.1). As expected, Figure 2.7 shows that low flow metrics and catchment size are correlated (Daigle et al. 2011). The equation and the R^2 values of the linear functions of each environmental flow plotted were shown. The R^2 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 2.7, 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 (146,000 km²), 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-HCs, the results are the same as in Figure 2.5, 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, and the correlation with catchment size remains strong ($R^2 > 0.9$) in each case.

Table 2.2 provides a summary 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 2.2 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. For PC-HC2 and PC-HC3, flow metrics considered were \geq 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 depend 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, respectively. Frequency analyses flow metrics are of interest for extreme flow events related to the climate change.

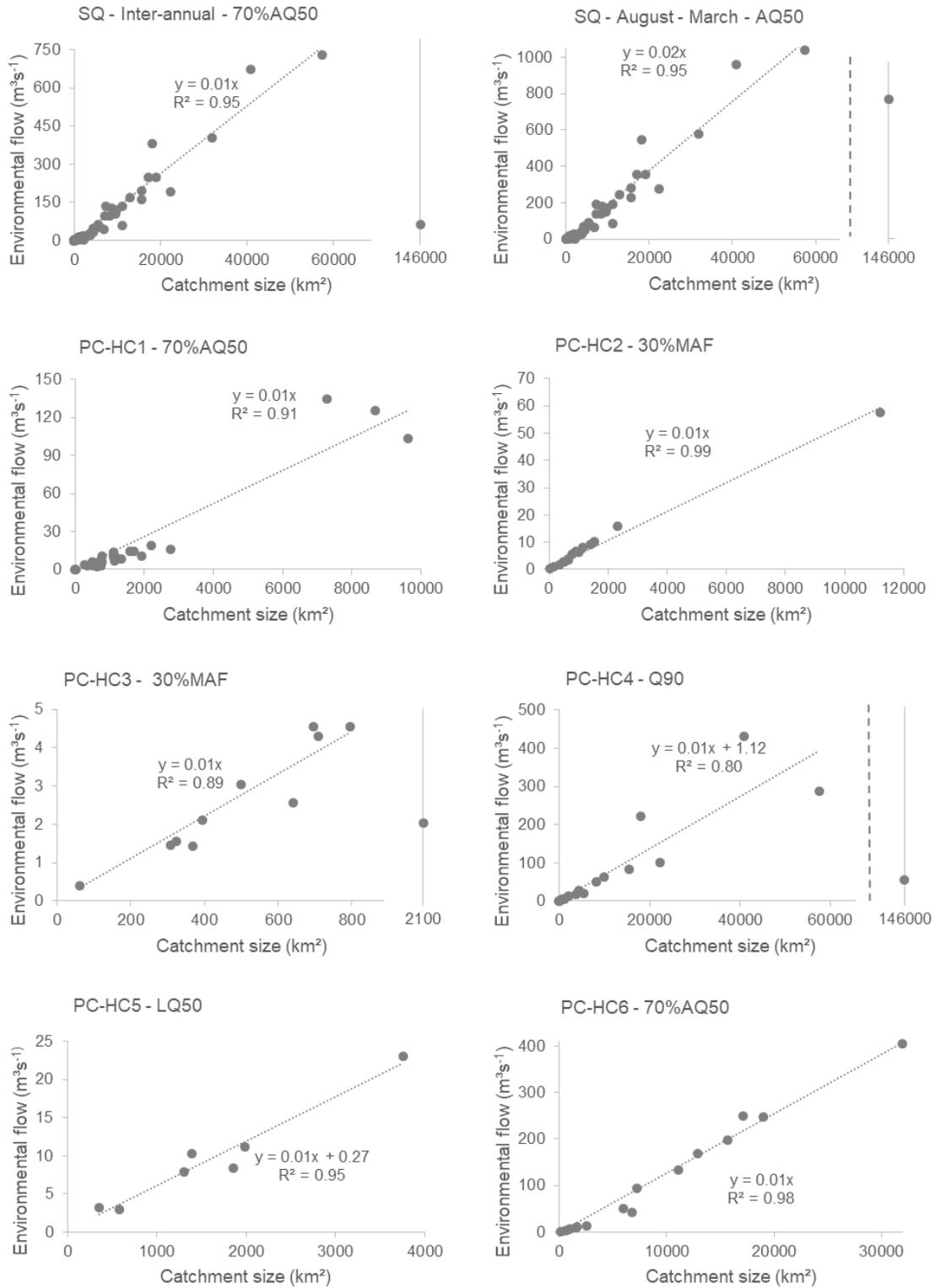


Figure 2.7 Most conservation and restrictive inter-annual flow metrics above the 30%MAF threshold, depending on catchment size for each PC-HC and Southern Quebec (SQ)

Table 2.2 Summary of the results and the more conservative and restrictive flow metrics.

| | | 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 | - | - | - |

For inter-annual, summer and winter periods, by PC-HC, for 25%MAF and 30%MAF thresholds, and depending of the MAF or catchment size.

*Quoting hydrological sub-classification from Ouellet Dallaire, Lehner, and Creed (2019).

2.6 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 question that triggered this hydrological study is: should environmental flow guidelines vary temporally and spatially to improve the management of water withdrawals in Southern Quebec rivers? More precisely: are the current 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 current 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 (PC-HC4 and PC-HC6);
- 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 (PC-HC2 and PC-HC3) 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.

2.7 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.

3 DEUXIÈME ARTICLE

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

Le périmètre mouillé pour évaluer les débits environnementaux dans les rivières du Québec méridional (Canada)

Auteurs :

¹Laureline Berthot, ¹André St-Hilaire, ²Daniel Caissie, ³Nassir El-Jabi, ⁴Judith Kirby et ⁴Sébastien Ouellet-Proulx

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

²Université de Moncton, Ingénierie civile, Moncton, Canada

³Pêches et Océans Canada, Section des habitats d'eau douce, Moncton, Nouveau Brunswick, Canada

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

Titre de la revue :

Ecological Indicators

Soumis le 02 juin 2021

DOI

Contribution des auteurs :

L. Berthot a contribué à structurer les analyses, mené les analyses et la rédaction. A. St-Hilaire a contribué à structurer les analyses et a fourni des commentaires et des corrections notables en première lecture. D. Caissie, N. El-Jabi, ont suggéré plusieurs idées pour les analyses et J. Kirby et S. Ouellet-Proulx ont apporté des commentaires et corrections notables en seconde relecture.

Lien entre l'article et le suivant :

Une seule métrique hydrologique ne peut être utilisée comme débit environnemental pour protéger les écosystèmes lotiques de toutes les rivières du Québec méridional. L'analyse multivariée a permis de définir des régions caractérisées par des indices hydrologiques d'étiage et d'identifier des zones à risque pour les écosystèmes lotiques. Les débits seuils de Tennant aident à choisir les débits environnementaux conservateurs les plus restrictifs. La prochaine étude questionne l'utilisation combinée de débits seuils, l'un issu de la méthode de Tennant (1976) et l'autre associé à un périmètre mouillé minimum.

3.1 Abstract

Environmental flows assessment in eastern Canada, and particularly in the province of Quebec, is mainly based on hydrological assessment of historical data during low flow periods. The mean 7-day low flow with return periods of two (7Q2) and ten years (7Q10) are two flow metrics 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. This study investigated the use of the wetted perimeter as an additional environmental flows assessment method. This tool can be used by water managers to maintain the availability of river habitats during low flow periods. Twenty flow metrics were computed for inter-annual, summer and winter periods, for 43 sites from 35 rivers, and analysed to study the changes in wetted perimeter with flow. In addition, the flow associated with maximum curvature (breakpoint in the curve) of the flow-wetted perimeter function (QMC) was analyzed. Results provided a better understanding of local changes of river hydraulics and possible aquatic habitat availability associated with different flow metrics. The relevance of using a wetted perimeter threshold (WPS_{QMC}) combine with flow thresholds (Tennant method) was also discussed. The two “fair” Tennant flow thresholds, apart from the twenty flow metrics, provided sufficient and inferred available habitat all year long with corresponding WPS_{QMC} thresholds of 88% and 95% of the 43 river sites. The median discharge for August flow metric for summer and the median discharge for the month with the lowest flow metric value for winter (usually February), provided the highest wetted perimeter in relative terms (72% and 79% respectively of the river sites) compared to the WPS_{QMC} threshold. Using the 7Q2 flow metric would mean maintaining sufficient available habitat for 50%, 60% and 72% of the river sites for respectively inter-annual, summer and winter periods. Considering the single WPS_{QMC} threshold, its associated flow provided the highest values for 16% of the river sites and the second highest one for 9% of the river sites with a single seasonal flow metric value high enough for summer or winter. This study showed that the wetted perimeter is a tool providing additional information on both river morphology and changes in potential aquatic habitat as a function of flow for river sites with small catchment size and low mean annual flow values. Indeed, the wetted perimeter can be very useful in the overall assessment of environmental flows.

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

3.2 Introduction

Environmental flows relate 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). Four categories of environmental flow methods have been described in the literature (Tharme 2003): hydrologic, hydraulic, habitat modelling and holistic approaches. Setting minimum environmental flow values such as the 7Q2 or 7Q10 flow metrics are part of the hydrological methods of assessment. The 7-day low flows with a return period of two and ten years (7Q2 and 7Q10) have been used in some jurisdictions such as the Ministry of the Environment of Quebec (MELCC 2014), also part of our study area, to provide guidelines for limiting water withdrawals and meeting water quality objectives, respectively (MELCC 2007). The above low flow metrics are calculated to mitigate potential cumulative impacts while managing water withdrawals, maintenance of flow release downstream of hydraulic structures and maintain acceptable water quality when dealing with wastewater or contaminant discharges (MELCC 2015a).

Environmental flows are prescribed during the water allocation process to mitigate against potential negative impacts of water withdrawals on river ecosystems all year long, with this study focusing on low flow periods. A comparison of minimum flow metrics for 98 Southern Quebec Rivers concluded that the 7Q2 flow metric should not be used systematically in water withdrawals guidelines (Berthot et al. 2020). It was deemed insufficient in some regions to sustain the riverine ecosystems, when compared to a percentage of mean annual flow. This study showed, that the 7Q10 flow metric should only be used as environmental flows for large rivers with high regime flows and variability. The Montana method (Tennant 1976) defined 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 this study, the use of the 30%MAF from April to September and the 10%MAF from October to March as upper and lower flow thresholds is equivalent to imposing conditions that are fair (30%MAF) and degrading (10%MAF) for sustaining the riverine ecosystems. A flow threshold below 10%MAF all year long is described as a life-threatening condition for aquatic biota in rivers (Tennant 1976). Although specific to particular rivers and hydraulic conditions, the Montana method (Tennant 1976) is nevertheless a worldwide reference (Arthington 2012).

According to Poff et al. (1997), riverine ecosystems are naturally adapted to their flow regime. This includes sustained fish habitat, biotic interactions and energy sources. 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 water quality (Resh et al. 1988, Poff et al. 1997). For Poff et al. (1997), the natural flow paradigm approach focuses on maintaining the basic attributes of the natural flow regime, which is characterized using flow metrics grouped into five categories: frequency of hydrological events, seasonal timing, magnitude, duration and variability. Each category is associated with maintaining specific ecological functions (Arthington 2012, Bunn and Arthington 2002). 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). During low flow periods, some ecological functions need to be maintained even 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, etc.

The Tennant method can be adapted to different eco-climatic contexts (Acreman and Dunbar 2004), as proposed by Belzile et al. (1997) who identified different flow thresholds based on mean annual flow for specific regions in Quebec. Since then, Belzile et al. (1997) flow thresholds have been used as recommendations by the Quebec Department of Forests, Wildlife and Parks (MFFP 1999). Belzile et al. (1997) calculated minimum flow thresholds 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 for August or September depending on the area and the 50% of the mean flow for a specific period. Albeit inspired by the needs of key fish species for each region, Belzile et al. (1997) did not directly or indirectly address specific habitat conditions preserved by their flow metrics. The flow thresholds of Tennant (1976) and Belzile et al. (1997), based on hydrological and biological studies, are used as hypothetical poorest and fairest limits by water managers. Most of the time, the preference of managers is the selection of the most widely used, conservative and restrictive flow metric(s), which is(are) simpler and easier to adapt over time, as environmental flow(s).

The wetted perimeter is a hydraulic environmental flow assessment method, usually used within other methods (Tharme 2003). The wetted perimeter method is based on the relationship between flow and changes in wetted perimeter as flow is reduced. For example, Tennant (1976) showed that a 10%MAF flow threshold typically covers 60% of the river bed and flows > 30%MAF generally cover more than 90% of the river bed substrate. The wetted perimeter has previously been used as an indicator of potential fish food production (Bradford et al. 2014, Randall et al. 2013), and physical fish habitat availability (Duncan et al. 2009). Riffles are emphasised when talking about wetted perimeter, because their depth, velocity and area vary very significantly with a change in flow (Ksiazek et al. 2019). In addition to the fact that available habitat does not guarantee the presence of aquatic species (fishes, invertebrates), it should be noted that a population seeking habitat will prefer to move to areas with sufficient habitat conditions, rather than tolerate insufficient hydrological conditions (Anderson et al. 2006). During low flow periods, fish productivity is related to growth and migration conditions, which are affected by changes in food quantity, degraded conditions and barriers to migration that can reduce wetted areas and isolate habitats (Bradford et al. 2014). A change in food supply results in ecosystem loss or conversion, changes in forage fish quantity, changes in body size over time, or changes in community structure (Bradford et al. 2014). 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). It should be noted that habitats also differ according to the river shape (linear, braided, with meanders and pools, close to an estuary) and hence, so does the river ecosystem (Welcomme et al. 2006). If the assumption is that the wetted perimeter is linked to fish habitat availability then a reduction in flow will ultimately result in poorer habitat conditions. For example, Bartshi (1976) showed that decreasing the wetted perimeter (WP) by more than 80% in rivers provided conditions that do not preserve the riverine ecosystems.

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 a potential criterion to assess environmental flows while accounting for the shape of the river cross-section or the channel morphology (Gippel and Stewardson 1998, Shang 2007). According to Stalnaker and Arnette (1976), the break in the slope of the WP-discharge function also corresponds to around 80% of the maximum available wetted perimeter (typically corresponding to bankfull discharge). Wetted perimeter values below the point of maximum curvature, corresponding to the most abrupt change in slope value, are associated with a rapid of not only discharge but also a

decline in food production and fish habitat (Gippel and Stewardson 1998). The present study examined the use of the wetted perimeter to better understand how the addition of this proxy for some habitat variables may influence environmental flows assessment for inter-annual, summer and winter low flow periods, in Southern Quebec rivers.

The objective of this study was to investigate the complementarity in the assessment of environmental flows using both a wetted perimeter threshold to ensure habitat availability and hydrologic (i.e. low flow) thresholds. To do so, the flow metrics examined by (Berthot et al. 2020) were computed, as well as flow thresholds based on the Tennant method (10%MAF, 25%MAF and 30%MAF; Tennant 1976). The comparison should provide more insight in determining which low flow metric(s) is (are) more appropriate compared to flow thresholds for environmental flow prescription. Thus, the relevance of using the 7Q2 and 7Q10 flow metrics in Southern Quebec rivers during low flow periods might be analysed in this context.

3.3 Methodology

3.3.1 Selection of the study sites

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

- (1) Site must be associated and in close proximity to a hydrometric station with a minimum of 20 years of daily flow time series to calculate flow metrics as suggested by Caissie et al. (2007);
- (2) Independence, stationarity and homogeneity hypothesis needed to be accepted (see 3.4).
- (3) Rivers with a natural flow regime;
- (4) Having a minimum of four discharge measurements that include river width and depth;
- (5) Having a statistically significant power function regression model for 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); that is approximating the stream section as rectangular with $W \gg D$ in Equation (3.1):

$$WP = W + 2 * D \quad (3.1)$$

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 (3.2):

$$WP = aQ^b \quad (3.2)$$

WP : wetted perimeter (m);

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

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 (3.3):

$$Q \approx WP * D * V \quad (3.3)$$

Each term on the right side of Equation 3.3 can be estimated as a function of Q :

$$Q = aQ^b * cQ^f * kQ^m = ackQ^{(b+f+m)} \quad (3.4)$$

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 from the Quebec Department of Environment and Fight against Climate Change was augmented with 16 discharge measurements made during fieldwork in 2018, focusing on four

ivers. Those measurements were carried out during the low flows, and provided a way to reinforce the statistical power function models of those rivers. A total of 43 sites from 35 rivers were selected. Figure 3.1 shows the location of hydrometric stations in the eight Southern Quebec hydro-geographical regions. It should be noted that R04 has only one gauging site. Eight rivers have two gauging sites. The sites are mainly located in tributaries of the St. Lawrence and Saguenay rivers and are located in the western portion of Southern Quebec. Notably, the proximity of two sites within the same river does not permit their delineation in Figure 3.1.

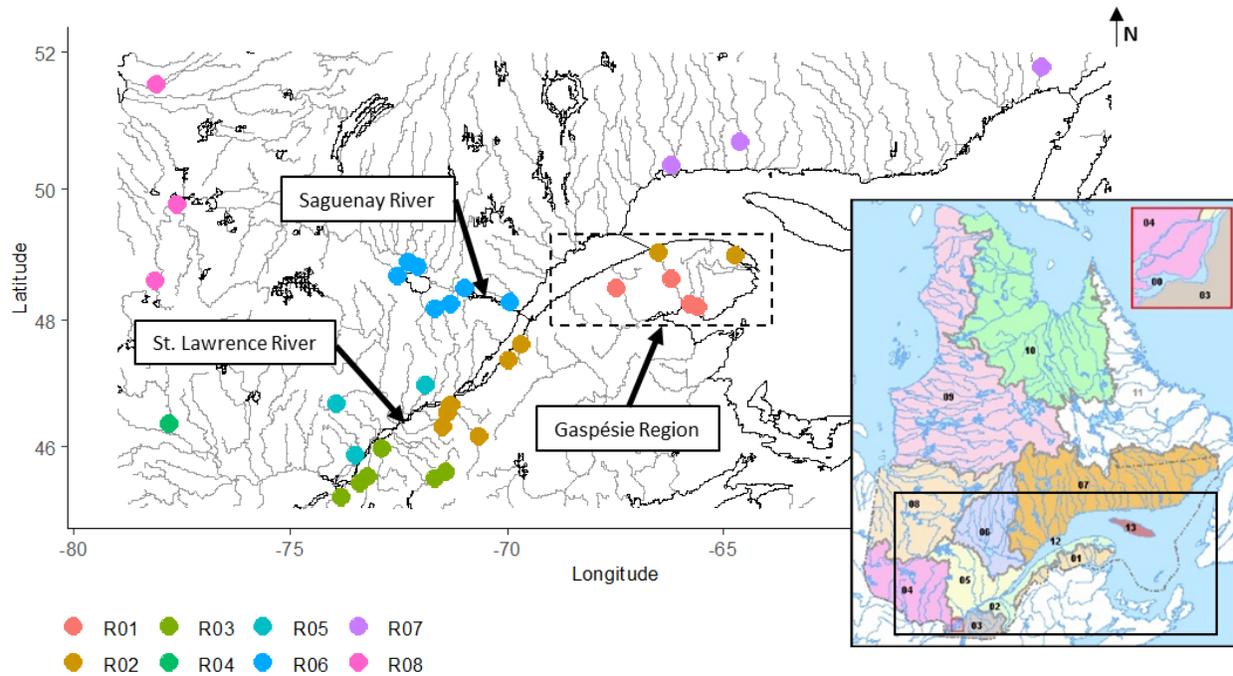


Figure 3.1 Study river sites in Southern Quebec (Quebec map from MELCC, 2020)

3.3.2 Study sites

Table 3.1 presents the mean value of hydraulic variables of the studied sites, grouped by hydrographical region. After testing significant differences with a non-parametric Kruskal-Wallis test, 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). R02, R03 and R05 showed mean annual flows (MAF) under $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, whereas R01, R04 and R06 showed MAF between 32 and $52 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. For R07 and R08 mean values were above $180 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. For the wetted perimeter, R02, R03 and R05 mean values were between 27 and 40 m, R01, R04 and R06 mean values were between 50 and 57 m and R07 and R08 mean values were above 155 m. The lowest monthly flow values were during winter for R01, R02, R05, R06, R07 and R08 and during summer for R03 and R04. 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 except for R05, which showed a value of 0.64 (with 3 sites). These results show that in most cases the wetted perimeter and the river width values are strongly correlated, as expected. There is one exception, a site having a R^2_{adj} close to 0 for WP/W due to outliers in gauging measurements, but having a R^2_{adj} from 0.78 to 0.96 between WP and all other hydraulic parameters. In Table 3.1, the results of a power function fitted between the wetted perimeter, the depth and the velocity with the discharge are summarized. It should be noted that functions with $R^2_{adj} < 0.75$ were validated 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 Equations 3.3 and 3.4).

Table 3.1 River characteristics and hydraulic parameters by hydrographic region. HS: Hydrometric station, GS: Gauging Site, NM: mean of the number of measurements, LMF: Lowest monthly flow, MAF: Mean annual flow ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), 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.

| Region | HS | GS | NM | Area (km^2) | LMF | MAF | 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 | | |
| R01 | 4 | 5 | 33 | 1373 | 2 | 31.6 | 0.64 | 0.84 | 49.8 | 0.99 | 35.04 | 0.14 | 0.82 | 0.19 | 0.46 | 0.94 | 0.21 | 0.42 | 0.82 | 0.99 | 1.01 |
| R02 | 8 | 10 | 19 | 562 | 2 | 14.7 | 0.67 | 1.07 | 37.7 | 0.99 | 24.21 | 0.16 | 0.83 | 0.48 | 0.30 | 0.77 | 0.13 | 0.54 | 0.92 | 1.07 | 1.00 |
| R03 | 6 | 9 | 14 | 508 | 9 | 9.2 | 0.57 | 0.67 | 26.8 | 0.99 | 19.48 | 0.16 | 0.84 | 0.37 | 0.32 | 0.89 | 0.21 | 0.53 | 0.92 | 1.05 | 1.01 |
| R04 | 1 | 1 | 6 | 3756 | 9 | 51.5 | 0.40 | 2.30 | 53.6 | 0.99 | 15.20 | 0.33 | 0.91 | 0.36 | 0.48 | 0.96 | 0.19 | 0.21 | 0.69 | 1.04 | 1.02 |
| R05 | 3 | 3 | 9 | 891 | 2 | 18.4 | 0.50 | 2.13 | 39.4 | 0.64 | 32.20 | 0.06 | 0.84 | 0.94 | 0.35 | 0.81 | 0.11 | 0.59 | 0.70 | 1.17 | 1.00 |
| R06 | 7 | 8 | 13 | 2082 | 2 | 45.6 | 0.51 | 1.98 | 56.7 | 0.97 | 32.23 | 0.15 | 0.81 | 2.87 | 0.23 | 0.82 | 0.06 | 0.63 | 0.92 | 1.10 | 1.00 |
| R07 | 3 | 3 | 8 | 10572 | 3 | 238.5 | 0.87 | 4.07 | 157.3 | 0.99 | 65.10 | 0.17 | 0.84 | 1.55 | 0.23 | 0.48 | 0.06 | 0.56 | 0.68 | 1.45 | 0.97 |
| R08 | 3 | 4 | 7 | 10656 | 2 | 182.8 | 0.40 | 4.88 | 158.7 | 1.00 | 74.70 | 0.15 | 0.94 | 1.44 | 0.22 | 0.85 | 0.02 | 0.64 | 0.98 | 1.04 | 1.00 |

3.4 Environmental flow methods

Eight hydrological/environmental flow metrics and their corresponding values for wetted perimeter were compared during low flow periods (Table 3.2). These low flow metrics were compared in previous studies (Berthot et al. 2020; Caissie et al. 2007). Except for a few rivers, the AQ50 flow metric was the most conservative for Quebec rivers, i.e. it had a value above a theoretical flow threshold (25%MAF or 30%MAF; Berthot et al. 2020).

Table 3.2 Definitions and uses of environmental flow metrics

| Low flow metrics | Definition | Uses | References |
|------------------|--|--|-----------------------------|
| Q95 | 95 th percentile on the flow duration curve | United-Kingdom during low flow periods | 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 | MELCC (2007) |
| | | Dilution capacity of rivers in the United States | Linnansaari et al. (2012) |
| 7Q2 | Mean 7-day low flow with a return period of two years | Southern Quebec during low flow periods | MELCC (2015a) |
| | | 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 during low flow periods | Caissie et al. (2014) |
| LQ50 | Median discharge value of the month with lowest flows | Tested in New Brunswick (Canada) | |
| 70%LQ50 | 70 percent of the of the month with lowest flows | | |

The calculation of the 7Q10 and the 7Q2 flow metrics were obtained through a frequency analysis, as 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 compare the level of flow protection of the wetted perimeter and the point of maximum curvature. Two MAF flow

thresholds were used in this comparison, i.e., the inadequate (< 10%MAF) and adequate (> 30%MAF) to sustain ecosystem functions and sufficient fish habitat. Notably, flows between 30%MAF and 10%MAF are considered between adequate to degrading habitat flow conditions. 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 (i.e. a total of twenty flow metrics). The summer season includes the months of July to September while the winter season includes flows from January to March. The flow value associated with the maximum curvature method was also included in the analysis, as presented in section 3.4.1.

3.4.1 Wetted perimeter linked to environmental flows

The wetted perimeter threshold was computed with the maximum curvature method (Gippel and Stewardson 1998). The maximum curvature method provides an alternative environmental flow metric as shown in Figure 3.2 from Mackey et al. (1998). Equation (3.5) defines the point of the maximum curvature of a function linking Q and WP :

$$\kappa(Q) = \frac{\left| \frac{d^2WP}{dQ^2} \right|}{\left[1 + \left(\frac{dWP}{dQ} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad (3.5)$$

Its power functions resolution with Equations (3.6) and (3.7) (Mackey 1998):

$$\frac{dWP}{dQ} = (ab)Q^{(b-1)} \quad (3.6)$$

$$\frac{d^2WP}{dQ^2} = (ab)(b-1)Q^{(b-2)} \quad (3.7)$$

κ : the maximum curvature;

WP : the wetted perimeter (m);

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

a and b : numerical coefficients to be adjusted.

A non-linear regression function model for the wetted perimeter was provided in Equation (3.2).

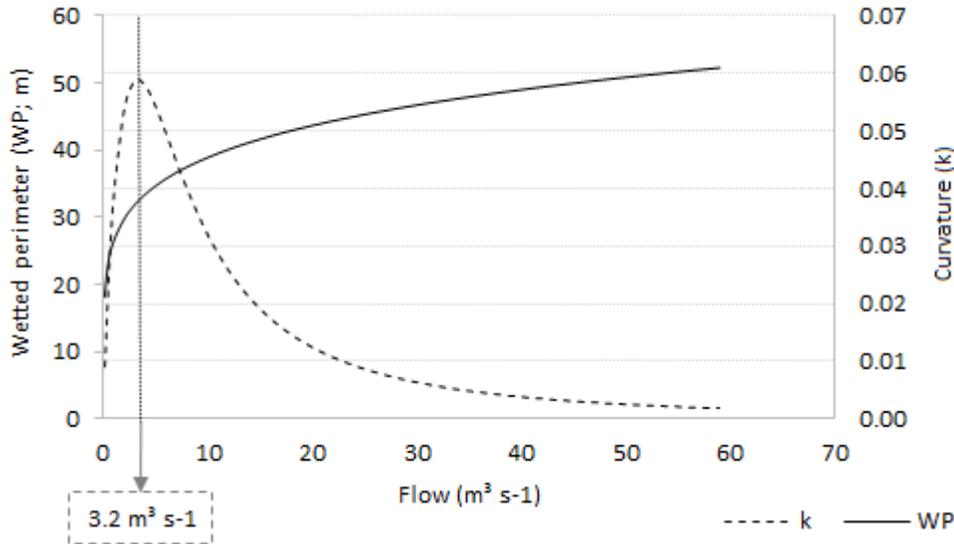


Figure 3.2 Example of the maximum curvature method to determine a river environmental flow with $a=26.54$ and $b=0.17$.

Figure 3.2 illustrates the changes in the wetted perimeter and curvature as a function of a reduction in flow. The point of maximum curvature method was calculated at $3.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, also called “QMC”, its associated wetted perimeter value. This QMC can be compared with different flow metrics. For ease of comparison among methods, flow and wetted perimeter values were standardized using the MAF and its corresponding hydraulic parameters as proposed by Caissie and El-Jabi (2003). Then, Equation (3.8) describes the standardization approach for the wetted perimeter (Caissie and El-Jabi 2003):

$$WPS_{metric} = \frac{WP}{\overline{WP}} = \left(\frac{Q_e}{\bar{Q}}\right)^b \quad (3.8)$$

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

WP: wetted perimeter (m);

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

Q_e : environmental flow metric ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$);

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

b : numerical coefficient.

3.5 Results

3.5.1 Wetted perimeter associated with low flow metrics

Figure 3.3 presents the flow metrics of the 35 rivers studied and the wetted perimeter values of the 43 river sections within them calculated for inter-annual, summer (S) and winter (W) periods. The flow results were divided by the MAF, for each flow metric (i.e. standardized flow of 1 = MAF). The wetted perimeter values were divided by the wetted perimeter corresponding to the MAF (WPS_{metric}), for each flow metric. The twenty flow metrics were ordered from the lowest to the highest median values. In Figure 3.3a, summer flow metrics gave higher values than winter and inter-annual flow metrics where 7Q2S, LQ50S and AQ50 all showed higher median value than the 30%MAF. 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 occurred in August for 33 of the 43 (77%) studied river sites (meaning 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). In Figure 3.3a, the median 7Q10 flow metric and the flow identified using the QMC method were similar to 10%MAF.

Figure 3.3b shows that the 7Q10 had the lowest value (median value of 70%) followed by QMC (median value of 77%) compared to the WPS and the mean annual flow, i.e., WPS_{MAF} . Many methods showed median values similar to the $WPS_{10\%MAF}$, i.e., reducing the wetted perimeter close to 77% of the value observed at the MAF (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 other words, there is a loss of 8% to 9% in the wetted perimeter, when going from the 25%MAF or 30%MAF to 10%MAF. In Figure 3.3b, $WPS_{10\%MAF}$, WPS_{7Q10} , WPS_{Q95} , WPS_{7Q2} , WPS_{7Q10S} , WPS_{Q95} , WPS_{7Q10W} and WPS_{Q95W} had median values < WPS_{QMC} . In Figure 3.3b, the associated wetted perimeter to the flow metrics values presented more variability within the different time periods. Eighteen river sites had their six inter-annual wetted perimeter metric values < WPS_{QMC} . 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 had wetted perimeter values associated with all hydrological metrics < WPS_{QMC} . Finally, the differences between the third and second quartile varied from 4% to 41% (median at 11%) for the flow metrics values (Figure 3.3a) and from 12% to 24% (median at 19%) for the associated wetted perimeter values (Figure 3.3b) indicating less relative variability in wetted perimeter than in flow metrics. The highest flow values variability was

observed among the more conservative flow metrics (AQ50, LQ50S, 7Q2S) whereas some less conservative flow metrics (7Q10, 7Q10S, Q95S, Q95, 7Q2) also showed some variability.

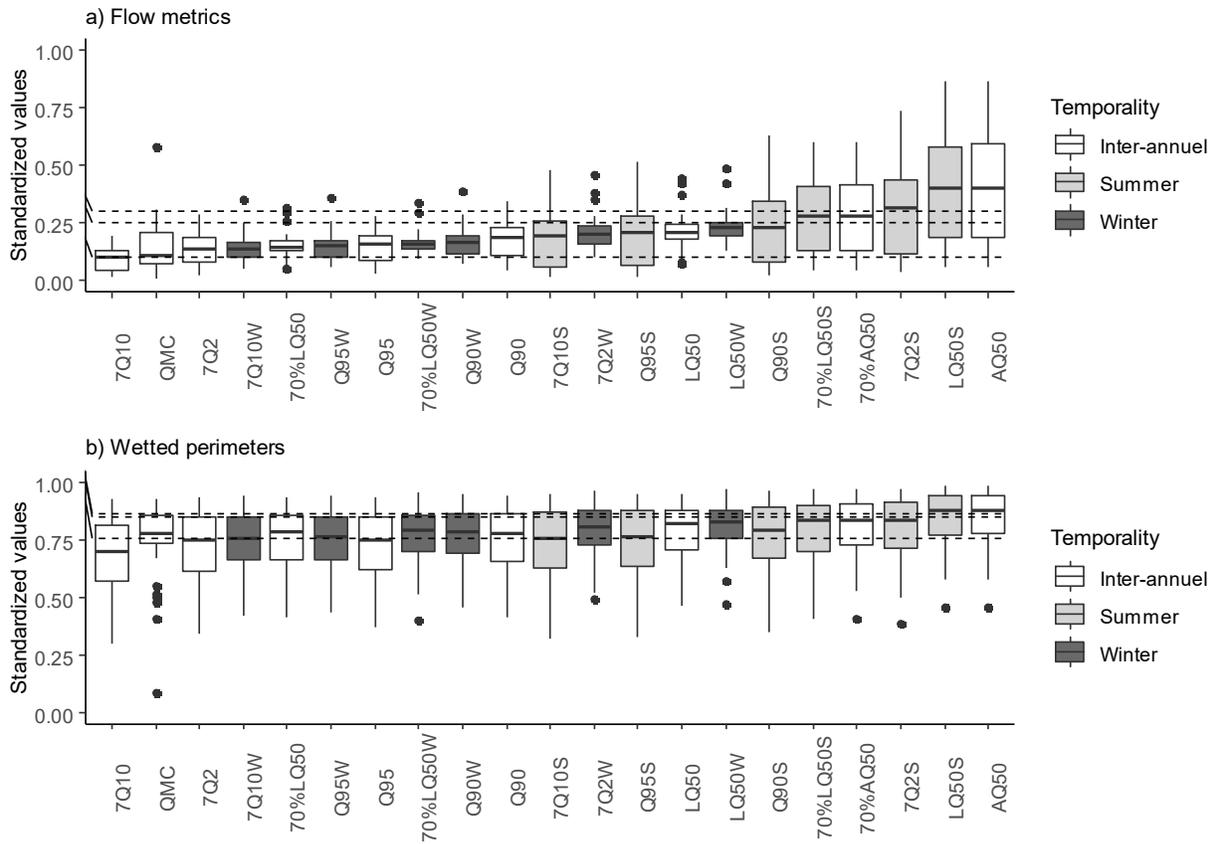


Figure 3.3 Standardized low flow metrics (a) and their associated wetted perimeters (b) grouped for the following periods: inter-annual, summer (S) and winter (W). Horizontal lines: 10%MAF, 25%MAF and 30%MAF flow thresholds (a) and their associated wetted perimeter median values (b).

3.5.2 Spatial distribution of the wetted perimeters

Figure 3.4 presents the spatial distribution of the lowest and highest WPS_{metric} mean values. The lowest wetted perimeter are systematically associated with 10%MAF, 7Q10 (7Q10S and 7Q10W) and QMC flow metrics. Figure 3.4a, 3.4c, and 3.4e show the spatial variability among sites. Sites with low wetted perimeter values associated with 10%MAF threshold are found along the 48th parallel, while those where QMC is the lowest flow metric are located on the northern side of the St. Lawrence River. Sites where 7Q10 (7Q10S and 7Q10W) is the lowest flow metric are mostly on the southern side of the St. Lawrence River. The highest wetted perimeters were associated with 30%MAF, AQ50 and in a few cases, with the QMC flow metric (Figure 3.4b). In Figure 3.4d, 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 (peninsula on the eastern tip of the St. Lawrence valley) and with 30%MAF threshold on the southern side of the St. Lawrence River (Figure 3.1). In Figure 3.4f, the highest wetted perimeter values (winter) were mainly associated with 30%MAF threshold in both southern to northern regions, and with LQ50 (and LQ50W) flow metric and the QMC flow method in south-western part of the study area. It should be noted that there was no clear spatial pattern in the Gaspésie (south-eastern) region. Although not shown in Figure 3.4, it should be noted that the R02, R03 and R04 river sites (south shore of St. Lawrence River) results presented the lowest flow and wetted perimeter values. Mostly lower than 10%MAF and its associated $WPS_{10\%MAF}$ for R02 and R03 river sites.

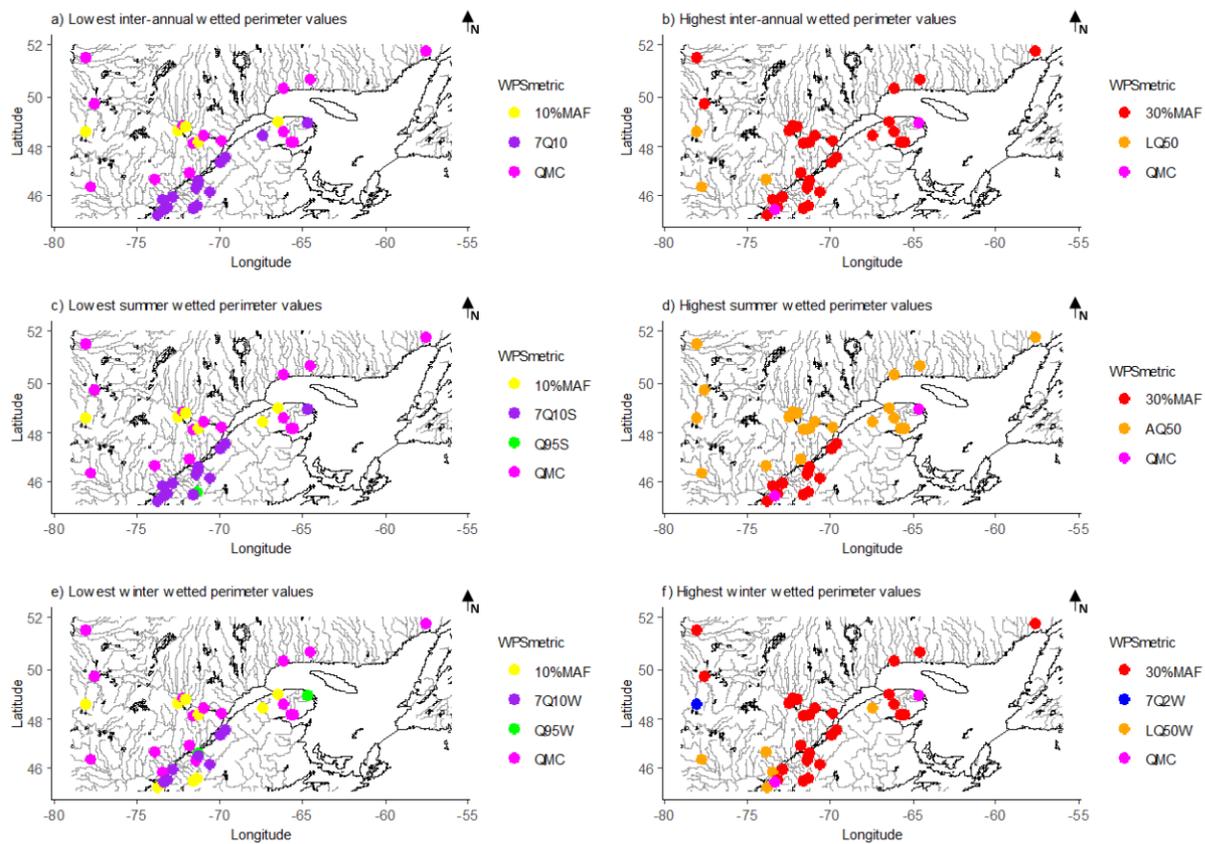


Figure 3.4 WPS_{metric} corresponding to the lowest (a, c, e) and highest (b, d, f) mean values for inter-annual (top two), summer (S; middle) and winter (W; bottom) periods

Figure 3.5 shows examples of ranked (from smallest to highest) flow metrics for two rivers (darker dotted line) and their associated wetted perimeters (WPS_{metric} ; solid line). Dotted vertical lines indicate the QMC and the three MAF thresholds (10%, 25% and 30%MAF). For each river, flow metrics values were ordered in ascending order of specific discharge, regardless of the period,

inter-annual, summer (S) or winter (W). It can be noted that the differences between flow values were sometimes very small. Figure 3.5a presents a first river, i.e., Aux Écorces River (Site 370; R06; north shore of St. Lawrence River). The evolution of the flow and wetted perimeter values shows two different trends. For this river, the wetted perimeter values varied very little from 88%WPS_{MAF} (QMC flow method) to 98%WPS_{MAF} (AQ50) for all flow metrics. This was not the case for flow which varied between 7%MAF (QMC) to a maximum of 69%MAF (AQ50), with a difference of about 62% among flow metrics. In Figure 3.5a, the flow metric order also showed highest flow values for the eight summer flow metrics (see all flow metric above 30%MAF vertical line). Figure 3.5b presents the second river which is the Ouelle River (Site 60; R02; south shore of St. Lawrence River). This river showed an evolution of flow and wetted perimeter values that were very similar (quasi-parallel and linear) from the lowest to the highest values. The 7Q10 flow metric provided the lowest value (3%MAF; 35%WPS_{MAF}) and the 30%MAF, the highest (70%WPS_{MAF}). The QMC values corresponded to 26%MAF and 67%WPS_{MAF}. In Figure 3.5b, the flow metric order did not show a systematic order depending on inter-annual, winter or summer period flow values. Moreover, many flow metrics for the Ouelle River showed values lower than the 10%MAF and none above the 30%MAF.

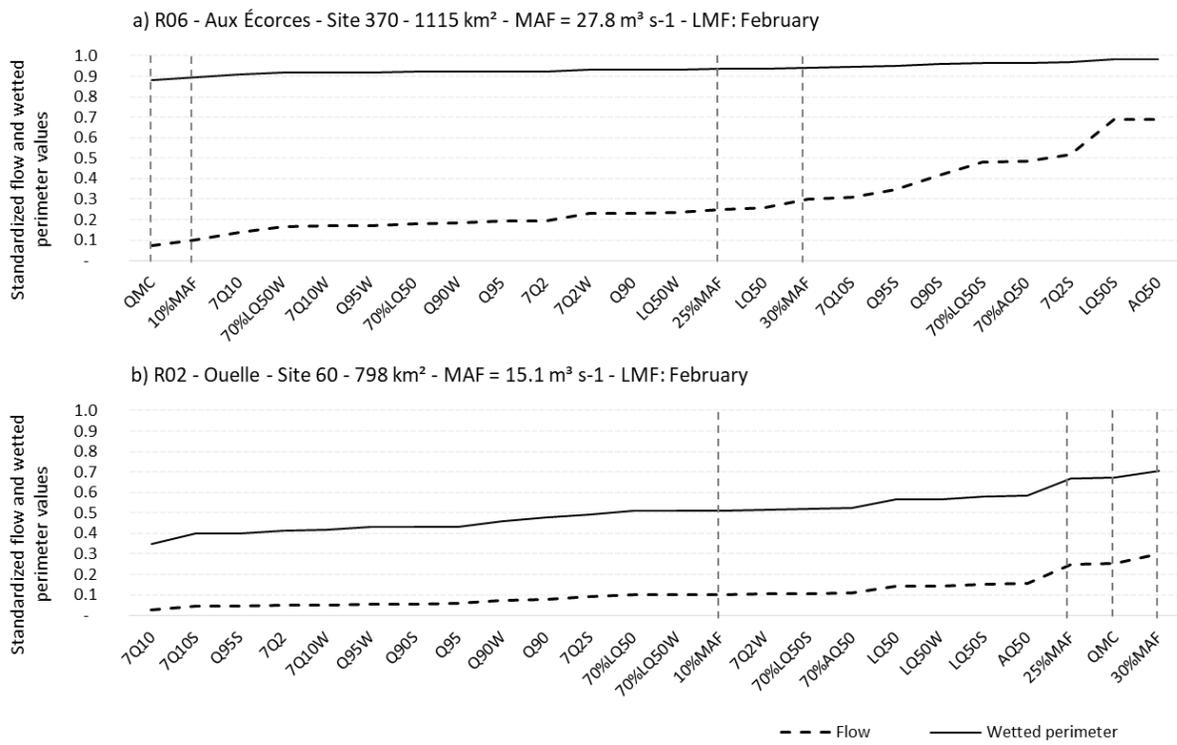


Figure 3.5 Flow metrics (dotted line) and WPSmetric (full line) variation for selected rivers. MAF: mean annual flow; LMF: lowest monthly flow

3.5.3 Wetted perimeter: hydrographic regions

Table 3.3 presents the least ($< WPS_{10\%MAF}$) and the most conservative ($> WPS_{25\%MAF}$ and $> \%WPS_{30\%MAF}$) flow thresholds associated with their equivalent in $\%WPS_{MAF}$ (mean values), by hydrographic regions. A fourth threshold ($> WPS_{QMC}$; region mean value) was added to compare the results from flow metrics and the QMC threshold. For R01 river sites, the least conservative flow metrics for the riverine ecosystems were the 7Q10, 10%MAF, Q95, 7Q2 and 70%LQ50 flow metrics (Table 3.3); however, these flow metrics were all higher than the $WPS_{10\%MAF}$. For R01, the $WPS_{10\%MAF}$ represented 74% of WPS_{MAF} compared to 83% ($WPS_{25\%MAF}$) and 82% ($WPS_{30\%MAF}$). For R02 and R03 respectively, eight and fifteen flow metrics had their associated wetted perimeter $< WPS_{10\%MAF}$. Notably, in R02 and R03 the $WPS_{10\%MAF}$ represented 70% of WPS_{MAF} , i.e., a reduction of 30% from the average. For R02, the 30%MAF threshold provided wetted perimeter values $> 80\%WPS_{MAF}$ and the 25%MAF, 30%MAF, AQ50 and LQ50S flow metrics were all associated with wetted perimeters $> WPS_{QMC}$ (77% WPS_{MAF}). For R03, the QMC and 30%MAF provided wetted perimeter values $> 80\%WPS_{MAF}$ and the 30%MAF was associated with wetted perimeters $> WPS_{QMC}$ (82% WPS_{MAF}). For R04 to R08, all WPS_{metric} values were $> WPS_{QMC}$ (Table 3.3), which ranged from 41% (R04) and 86% (R05). R04 (only one river site) shows the lowest equivalent in $\%WPS_{MAF}$ whereas R05 included sites with the highest $\%WPS_{MAF}$ values. For R05 to R08 regions, the $WPS_{25\%MAF}$ and $WPS_{30\%MAF}$ presented wetted perimeter values $\geq 80\%WPS_{MAF}$. In Table 3.3, the summer flow metrics typically provided the highest wetted perimeter values ($> WPS_{30\%MAF}$). Also, the WPS_{QMC} provided values $> WPS_{25\%MAF}$ just for R03. In Table 3.3, 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 inferred from wetted perimeter values). As expected from Figure 3.3a, results from 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 3.3 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% |
| Southern Quebec | 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% |

3.6 Discussion

In this study, the wetted perimeters associated with flow metrics and flow thresholds values were compared for inter-annual, summer and winter periods in Southern Quebec. Power functions relating flows and wetted perimeters 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, which is easily measured during field visits, especially in low flow periods and (2) using the mean annual flow (MAF) as a standardization value allowed a comparison of results and easily defined wetted perimeter critical values corresponding to cut-off flows. Studies using the wetted perimeter have focused on break points to determine potential environment flow values under which a reduction in flow would degrade habitat more rapidly (Tharme 2003). Break points in the flow-WP relationship were determined by calculations in some studies (e.g., Gippel and Stewardson 1998) or visually in others, but the selected threshold was not previously compared to other potential environmental flow values. In the present study, the maximum curvature method (QMC; Mackey et al. 1998) was chosen to calculate an environmental flow threshold from the wetted perimeter method and to compare this flow to other flow metrics. The QMC method identifies a point in the flow-wetted perimeter function where a rapid decline in wetted area of the stream occurs at lower flows. As such, lower flows than the QMC can be indicative of a critical loss of fish habitat availability and food production (Gippel and Stewardson 1998). Although the overall goodness of fit of the wetted perimeter-flow regression power function was adequate, the model best fitted the lower range of measured flow values (and often less so for the higher discharge). Implementation of such method is of course highly dependent on the goodness of fit of the model.

The maximum curvature method can be a good indicator to identify thresholds to protect aquatic ecosystems, especially for sites on the south shore of the St. Lawrence River (when the wetted perimeter decreases rapidly below the QMC). Indeed, results indicated that spatial discrepancies or regional specificities have to be taken into account to set flow thresholds that are representative of the variability to adequately protect aquatic habitats in Southern Quebec Rivers. Also, the results indicate that the maximum curvature method generally provided environmental flows that were too low during the low flow periods (<25%MAF threshold), which corroborates the conclusions of Gippel and Stewardson (1998). Considering the single WPS_{QMC} threshold, its associated flow provided the highest values for 16% of the river sites and the second highest value for 9% of the river sites with a single seasonal flow metric value high enough for summer or winter. Those sites generally have a small catchment size and a low mean annual flow value.

By definition, flows below this threshold will naturally occur. However, if water withdrawals are allowed during prolonged natural low flow periods, potential issues related to water quality, habitat connectivity, etc. will likely arise.

In this study, a wetted perimeter threshold, called QMC, was used as an indicator of potential changes in habitat when using different hydrological metrics and to identify the most conservative one for the riverine ecosystems. The wetted perimeter values associated with flow metrics are higher and hence, more conservative than the maximum curvature method mean and median wetted perimeter values except for the 7Q10, 7Q10W, 7Q10S, 7Q2, Q95, Q95W, Q90S and 10%MAF flow metrics. In fact, results of the present study showed that the wetted perimeter lost was generally in the range of 16% (30%MAF), 18% (25%MAF) and 27% (10%MAF) considering the southern Quebec mean values in Table 3.3. The variability among rivers showed that 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, mainly in R02, R03 and for the single R04 site. Using the WPS_{QMC} threshold as an indicator, the 25%MAF and 30%MAF flow thresholds likely provided sufficient available habitat all year for 88% and 95% of the 43 river sites respectively.

In R02, R03 and R04 regions, many flow metrics showed values less than the 10%MAF, and the wetted perimeter results showed loss of wetted area between 30% ($WSP_{MAF} = 70\%$) and 53% ($WSP_{MAF} = 47\%$; Table 3.3), which can be significant for some rivers. Combining both hydraulic and hydrological thresholds, the 70%LQ50S, 70%AQ50, 7Q2S, LQ50S and AQ50 flow metrics provide most conservative flow values (i.e. > 30%MAF) during summer periods and for winter periods, LQ50W has a mean value of around 23%MAF. In terms of relative wetted perimeter values, the AQ50 and the LQ50W (most of the time in February) flow metrics provided the highest values (72% and 79% respectively of the river sites), compared to the WPS_{QMC} threshold. 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. Using the 7Q2 flow metric would likely mean maintaining sufficient available habitat for 50%, 60% and 72% of the river sites for respectively inter-annual, summer and winter periods.

Results showed the relevance of Belzile et al. (1997)'s flow threshold recommendations for problematic rivers (i.e. where low flow metrics are not linked to adequate wetted perimeter values), located on the south shore of the St-Lawrence River. Some rivers can require the use of the 50%MAF for some critical periods associated with key ecological functions (e.g. fish spawning, migration, etc.) as a fair flow threshold, as suggested by Belzile et al. (1997). The use

of the wetted perimeter is then a relevant complementary tool to validate habitat potential availability in Southern Quebec Rivers, for small rivers with a low mean annual flow value while trying to reduce the cut-off flows to the minimum. In such cases, water managers can take advantage of the additional information provided by wetted perimeters. Figure 3.5a showed that for a range of hydrologically based metrics (for different seasons) that are quite different (between seven and 69%MAF), differences can be relatively small in terms of associated wetted perimeter values. Considering all the sites, the difference between 10%MAF and 30%MAF flow (20% MAF) can be compared to the difference between the $WPS_{10\%MAF}$ and $WPS_{30\%MAF}$ values, which varies from 3% to 23%, again, reiterating the fact that the relationship between flow and wetted perimeter is non-linear.

However, studies on riverine habitats are also about habitat quality (Bradford et al. 2014, Randall et al. 2013). Results from a river restoration study (Bradford et al. 2011) showed that water inputs and an increased velocity during low flow period improved riverine ecosystems environment with a higher presence of fish. In an abiotic factors review, Bornette and Puijalon (2011) explained that aquatic plants are dependent of water movement. In other words, riparian vegetation are adapted to extreme hydrological conditions (Merritt et al. 2010). 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. However, the field effort required to quantify these biological variables and factor them in the decision making process is often monumental. This study showed that the use of the wetted perimeter can be very informative in setting environmental flows, and this parameter is relatively simple to measure, as a proxy tool to choose one or several conservative hydrological metric(s) for environmental flow assessment. In addition, the changes in wetted perimeter with flow can also be modeled on rivers where data would be limited, to study the potential loss of wetted area as a function of reduced flows.

Another variable that is relatively simple to measure and that provides insight on ecosystem health is water temperature. It might be relevant to use water temperature as an additional proxy metric for habitat quality. Recent studies were published about water temperature river characterization (Daigle et al. 2019), modelling (Boudreault 2021) projection (Jeong et al. 2013) and climate change (Kwak et al. 2017) in Southern Quebec rivers, mainly based on <http://rivtemp.ca/> database and fieldwork. These studies show that there is increased interest in using water temperature in water resources management.

3.7 Conclusion

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. Given that holistic approaches and modelling fish habitats over large geographical area may be daunting endeavours, 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. It emerged that just looking at the environmental flow values alone may be insufficient to measure the potential impact on aquatic habitat. As such, the wetted perimeter provided a supplemental indication of risks to ecosystem health and habitat (actual and potential loss) under reduced flows. In fact, the wetted perimeter approach can bring another level of analysis which is complimentary to hydrological environmental flow metrics. The maximum curvature method can provide a minimum wetted perimeter threshold that can be defined for Southern Quebec Rivers with a small catchment size and a low mean annual flow, as a complement tool to assess environmental flows. This will also allow us to develop a river classification and adjust environmental flow metrics regionally. Temporal variability and river location remain important to consider in environmental flow assessments (Berthot et al. 2020).

3.8 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 well as the appreciated contribution of Rosie Morissette, Justin Moreault, Maxime Morel and Hermine Bétis to the summer fieldwork. Our final thanks go to Rebecca Tharme, Alain Rousseau and Ali Assani for their review and inputs.

4 TROISIEME ARTICLE

Environmental flow assessment in the context of climate change: A case study in Southern Quebec (Canada)

Évaluation des débits environnementaux dans le contexte du changement climatique : une étude de cas dans le Québec méridional (Canada)

Auteurs :

¹Laureline Berthot, ¹André St-Hilaire, ²Daniel Caissie, ³Nassir El-Jabi, ⁴Judith Kirby et ⁴Sébastien Ouellet-Proulx

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

²Université de Moncton, Ingénierie civile, Moncton, Canada

³Pêches et Océans Canada, Section des habitats d'eau douce, Moncton, Nouveau Brunswick, Canada

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

Titre de la revue :

Journal of Water and Climate Change

Soumis le 01 juillet 2021

DOI

Contribution des auteurs :

L. Berthot a mené les analyses et la rédaction. A. St-Hilaire a contribué à l'aide de commentaires et de corrections notables. D. Caissie, N. El-Jabi, J. Kirby et S. Ouellet-Proulx ont apporté des commentaires et corrections en dernière relecture.

Lien les articles précédents et le suivant :

Le premier article a montré que l'évaluation des débits environnementaux dépend des échelles spatiales et temporelles. Aussi, définir des régions à partir d'une analyse multivariée sur des indices de débits d'étiage a permis de cibler des zones à risque. Le second article a montré que le choix des débits environnementaux est pertinent à partir de la combinaison de seuils minimums hydrologiques type Tennant (1976) et d'un seuil de débit associé à un périmètre mouillé pour ces mêmes zones à risque, ayant les plus petites tailles de bassin versant et plus faibles débits moyens annuels. La prochaine étude reprend les méthodologies des deux premiers articles en utilisant cette fois-ci, des séries temporelles de débits journaliers simulés à l'aide de scénarios de changement climatique. La pertinence des méthodes de détermination des débits environnementaux sera alors discutée pour un contexte hydrologique impacté par les changements climatiques.

4.1 ABSTRACT

Through a case study in southern Quebec (Canada), the assessment of environmental flows in light of the effects of climate change is investigated. Currently, the 7Q2 flow metric (7-day average flow with a two-year return period) is used for water abstraction management. In this study, several flow metrics were calculated using flow time series simulated by a deterministic hydrological model (HYDROTEL) and climate change scenarios as inputs. The results were compared within homogenous low flow regions defined using ascendant hierarchical clustering, for the 1990, 2020 and 2050 horizons and annual, summer and winter periods. Then, the impact of each flow metric on physical habitat was analyzed using the wetted perimeter as a proxy. Scenarios indicated that: (1) the calculation of the 7Q2 flow metric is significantly limited by 2050, due to the increasing non-stationarity of simulated flow data sets over time; (2) summer low flow values are expected to be lower than winters; (3) the LQ50 flow metric (median flow of the month with the lowest flows) may become a relevant environmental flow metric by 2050. Lastly, the frequency analysis used to calculate the 7Q2 flow metric is not recommended in an environmental flows management context.

4.2 Introduction

Water and sanitation access, health and well-being, responsible consumption and production, sustainable cities and communities, terrestrial life sustainability, partnerships and climate change mitigation measures are parts of the seventeen sustainable development goals to reach before 2030 (UN-SDG 2016). In the context of low flow management, defining environmental flows can allow communities to take steps to reach some of these objectives. *Sustainable management of water implies that, as part of water resources management activities, sufficient water is left for ecosystems so that they can continue to provide services to society into the future* (Sood et al. 2017). Environmental flows correspond to the “quantity, timing, and quality of freshwater flows and levels necessary to sustain riverine ecosystems which, in return, support human cultures, economies, sustainable livelihoods, and well-being” (Arthington et al. 2018). Four categories of methods exist to calculate environmental flows: hydrological, hydraulic, habitat simulation and holistic (Tharme 2003, Linnansaari et al. 2013). Holistic environmental flows determination methods, such as the Ecological Limits of Hydrological Alterations (ELOHA) framework (Poff et al. 2010) can provide guidance by associating scientific and social processes and build consensus around environmental flows prescription rules. This study will focus on the hydrological and hydraulic aspects, which can be incorporated in some of the methodological steps of holistic approaches such as ELOHA to assess the impacts of climate change (St-Hilaire et al. 2021).

Environmental flows calculations based on hydrological methods are using historical discharge time series from impounded (Richter 1996) or unregulated (Daigle et al. 2011, Berthot et al. 2020) rivers as well as simulated flow data from hydrological models. In the context of climate change, historical flow analyses may prove to be inefficient to infer future environmental flow requirements, if the hydrological regime under study is evolving. According to some of the model scenarios, climate change can result in the presence of a trend (non-stationarity) in flow time series. Many climate change scenarios, including the most probable ones, indicate that low flows are becoming non stationary, i.e. trending down for at least 25% of global land surface area (Döll and Zhang, 2010). In this context, hydrological models allow to account for land use changes or climate change scenarios (e.g. Gombault et al. 2015) or hydropower activities (Minville et al. 2010). Some models are better suited to study large areas with multiple drainage basins (Mortsch et al. 2000, Guay et al. 2015). Others have been further developed to investigate riverine ecosystems sustainability (Palmer et al. 2009, Mawdsley et al. 2009), water surface quality (Whitehead et al. 2009) and allow for informed decisions about water management and mitigation policies (Vescovi et al. 2009, Carvalho et al. 2019). Uncertainties related to (1) the natural climate system itself;

(2) the processing of data from climate projections feeding the hydrological simulations and (3) the hydrological model and its calibration based on available observations have to be taken into account (Cyr 2012). For instance, numerous climate change scenarios can be compared to quantify some of the uncertainty associated with extreme flow scenarios (Gain et al. 2011). To simulate future flow trends to 2100, Gain et al. (2011) suggested that selecting few global climate models (GCMs) and feeding future scenarios of air temperature and precipitation as hydrological model inputs could be enough to develop a flow-weighted ensemble modeling.

These trends can be identified using different statistical tests and the non-parametric Mann-Kendall test (Burn et al. 2002, Ehsanzadeh and Adamowski 2007) is one of the most frequently used tool to achieve this. Using seven-day low flows, Ehsanzadeh and Adamowski (2007) observed a decreasing trend in flows over time in eastern Canada, with winter and summer low flows shifting to earlier dates. Chen et al. (2011) predicted an increase in winter flow and a decrease in summer flow in Southern Quebec rivers due to climate change. Similar scenarios were mapped in the Quebec hydro-climatic Atlas (DEFACC 2018). Chen et al. (2011) highlighted also the importance of accounting for uncertainty in downscaling methods. Several flow regionalization studies in Quebec have been proposed using multivariate analysis and taking into account flow variability (Assani and Tardif 2005, Daigle et al. 2011), eco-geographical parameters (Assani et al. 2006) and climate indices (Assani et al. 2011). More recently, six hydrological indices, representing the five hydrological characteristics listed as key components of the hydrograph by Poff et al. (2017), were selected to construct groups of spatially discontinuous, hydrologically homogenous hydrometric stations (Berthot et al. 2020). These groups are different from current spatially contiguous hydrographical regions used by the provincial water resources managers and also different from *ecozones* (Hulley et al. 2014) or *ecoregions* (Belzile et al. 1997). According to Poff et al. (1997), the flow regime impacts the riverine ecosystems integrity by influencing the water quality, energy sources, physical habitat and biotic interactions. Thus, the riverine ecosystems are adapted to their natural flow regime (Poff et al. 1997). Flow-habitat relationships can often be established through the hydraulic conditions associated with different flow values. In Berthot et al. (2021; *submitted*), the wetted perimeter associated with environmental flows was calculated, as a proxy to investigate the impact of the occurrence of low flows equal to environmental flow metrics, in terms of physical river habitat availability. In this study, the wetted perimeter associated with simulated environmental flow values associated with a few climate change scenarios was investigated to provide information on how climate change may impact aquatic habitat availability. Berthot et al. (2020) ranked potential environmental flows

metrics from most (highest flow) to least conservative considering three temporal scales (inter-annual, winter, summer) and two spatial distributions (spatially contiguous hydrographic regions and the aforementioned homogenous groups determined by low flow multivariate analysis). The candidate metrics were compared to percentages of mean annual flow (MAF) that are used as benchmarks for aquatic ecosystem protection (Tennant 1976). These metrics are used in the present study, with these objectives: (1) to investigate the possible evolution of low flows associated with climate change scenarios for the spatially discontinuous low flow regions defined in Berthot et al. (2020); (2) to analyse how possible changes in low flow metrics may impact river hydraulics and aquatic habitat using the wetted perimeter as defined in Berthot et al. (2021; *submitted*) as a proxy; and (3) to discuss the use of thresholds to understand environmental flow values. The relevance of using frequency analysis for the assessment of environmental flows will also be discussed.

4.3 Methodology

4.3.1 Hydrological methods

Two main hydrological methods are used during low flow periods in the Southern Quebec, Canada: the 7Q2 flow metric as a threshold to manage water withdrawals (DEFACC 2015) and the 7Q10 flow metric (7-day average flow with a ten-year return period) to meet environmental discharge objectives (e.g. dilute treated or accidental wastewater discharged in water courses; DEFACC 2007). In this study, eight environmental flow metrics were calculated, as in Berthot et al. (2020; Table 4.1).

Table 4.1 Environmental flow metrics, definitions and uses

| Low flow metrics | Definition | Uses | References |
|-------------------------|--|---|-----------------------------|
| Q95 | 95 th percentile on the flow duration curve | Environmental flow in United-Kingdom | Acreman and Ferguson (2010) |
| Q90 | 90 th percentile on the flow duration curve | Tested in New Brunswick | Caissie et al. (2007) |
| 7Q10 | Mean 7-day low flow with a return period of ten years | To meet environmental flow targets in Southern Quebec | DEFACC (2007) |
| | | Dilution capacity of rivers in the United States | Linnansaari et al. (2013) |

| | | | |
|---------|--|--|-----------------------|
| 7Q2 | Mean 7-day low flow with a return period of two years | Water withdrawals limit in Southern Quebec | DEFACC (2015) |
| | | Low flow indicator in the Hydroclimatic Atlas of Southern Quebec | DEFACC (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 | Environmental flow in Prince Edward Island | Caissie et al. (2014) |
| LQ50 | Median flow value of the month with lowest flows | Tested in New Brunswick | |
| 70%LQ50 | 70 percent of the median flow of the month with lowest flows | | |

The 7Q10, 7Q2, Q95, Q90, LQ50 and the 70%LQ50 flow metrics were calculated and considered for three temporal scales: summer, winter and annual periods. The summer period is from July to September and the winter period from January to March. The AQ50 and 70%AQ50 flow metrics results are summer period flow metrics. In this study, the 7Q2 and 7Q10 flow metrics were calculated using frequency analysis. The fitted distribution was the Generalized Extreme Value, as presented in Berthot et al. (2020). The Mean Annual Flow (MAF) metric was used as a standardization parameter (Caissie and El-Jabi 2003). The 10%MAF, 25%MAF and 30%MAF were used as one worst and two fair riverine ecosystems thresholds (Tennant 1976, Caissie and El-Jabi 1995).

4.3.2 HYDROTEL

The HYDROTEL model was used to provide the simulated flow dataset. HYDROTEL is a semi-distributed hydrological model (Fortin et al. 1995, Fortin et al. 2001a, Fortin et al. 2001b, Fortin et al. 2004) used along with a physiographic and meteorological database provided by its dedicated geographic information system (PHYSITEL; Rousseau et al. 2011). HYDROTEL simulates for two types of computational units for various hydrological processes; that is at the relatively homogeneous unit (RHHU) level, snow cover build up and melting; potential evapotranspiration; vertical water balance; and overland flow routing using a geomorphological unit hydrograph; and at the river segment level, stream discharge routing (Fortin et al. 2001a). Daily flows were simulated by HYDROTEL using air temperature and precipitation outputs from regional climate models under two Representative Concentration Pathways (RCP4.5 and RCP8.5; GIEC 2014). A total of three global climate models (GCM) were used with RCP4.5 and three GCMs from

RCP8.5 were selected (Table 2). For two of the climate scenarios from RCP8.5, two GCMs were considered as boundary conditions for Regional Canadian Model (CRCM5). The IPSL-CM5A-LR is the *Institute Pierre Simon Laplace Model* (Glisacclimate 2021a). The IPSL-CM5A includes the *Nucleus for European Modelling of the Ocean model* (NEMO 2021) with low resolution (-LR). The INMCM4 is the *Russian Institute for Numerical Mathematics Climate Model Version 4* (Glisacclimate 2021b). It is composed of an atmospheric model and an oceanic general circulation model (Volodin et al. 2010). The CanESM2 is the *Canadian Earth System Model version 2* which consists of the physical coupled atmosphere-ocean model CanCM4 coupled to a terrestrial carbon model (CTEM) and an ocean carbon model (CMOC; Canada 2021). The CMCC-CESM is the *Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamento Climatici Model* (Glisacclimate 2021c). The CESM acronym is for *Carbon Earth System Model*. This model includes an atmosphere, ocean, land surface and vegetation modules (CMCC 2021). Those models were selected based on the variability of the median of the 7Q2 flow metric estimated from hydrological scenarios generated by HYDROTEL, fed by the climate model outputs. The aim was to have one optimistic, one intermediate and one pessimistic climate scenario per climate model (Table 4.2). Environmental flow metrics listed in Table 4.1 were calculated and compared to the same flow thresholds, for both historical time series and future synthetic time series from GCMs. It should be noted that the simulated flows were not post-processed. In spite of the fact that those simulations are likely biased, relative changes can be investigated under the hypothesis that model biases remain constant.

Table 4.2 Selected global climate models and number of hydrometric stations available to calculate the 7Q2 and 7Q10 flow metrics

| | | RCP4.5 | | | | RCP8.5 | | |
|------------------------|------|---------------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------------|--------------------|-----|
| Global Climate Model | | IPSL-CM5A-LR | INMCM4 | CanESM2 | CanESM2 | CMCC-CESM | CanESM2 | |
| Regional Climate Model | | - | - | - | CRCM5 | - | CRCM5 | |
| Qualifier | | <i>Optimistic</i> | <i>Intermediate</i> | <i>Pessimistic</i> | <i>Optimistic</i> | <i>Intermediate</i> | <i>Pessimistic</i> | |
| Letter | | A | B | C | D | E | F | |
| 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 |

4.3.3 Selection of the study sites and hydrological indices for low flow regions

The Quebec Department of Environment and Fight Against Climate Change (DEFACC) provided the simulations for 284 identified hydrometric stations. All sites were selected, mainly to compare the AQ50, 70%AQ50, LQ50, 70%LQ50, Q90 and Q95 flow metrics results. Because long (i.e. > 20 years) time series are required to perform frequency analysis and estimate the 7Q2 and 7Q10 flow metrics, the number of hydrometric stations for which this analysis could be completed varied, as shown in Table 4.2. It should be noted that the 7Q2 and 7Q10 flow variabilities have been previously presented in the hydro-climatic Atlas of Quebec (DEFACC 2018).

Table 4.2 shows the number of hydrometric stations selected to calculate the 7Q10 and 7Q2 flow metrics when the hypothesis of independence, homogeneity and stationarity were all validated. In Table 4.2, the pre-selected global climate models are presented as well as their associate qualifier and their reference letter for the next Figures. The qualifiers are linked to the emissions forecasts. The pessimistic scenario is the one where greenhouse gas emissions would continue to increase at the same rate as in recent years. Simulated flow values, were compared to the HYDROTEL calibration period of 1981 to 2010. The simulated flow values were calculated for two time slices 2020 (2011-2040) and 2050 (2041-2070). Hereafter, these time slices will be referred to as the horizons 1990, 2020, and 2050. Except for the 7Q10 and 7Q2 flow metrics, 284 hydrometric stations were selected to calculate the Q95, Q90, LQ50 and the 70%LQ50 flow metrics for the three time slices. Those hydrometric stations are distributed over the eight hydrographical regions of Southern Quebec (Figure 4.1).

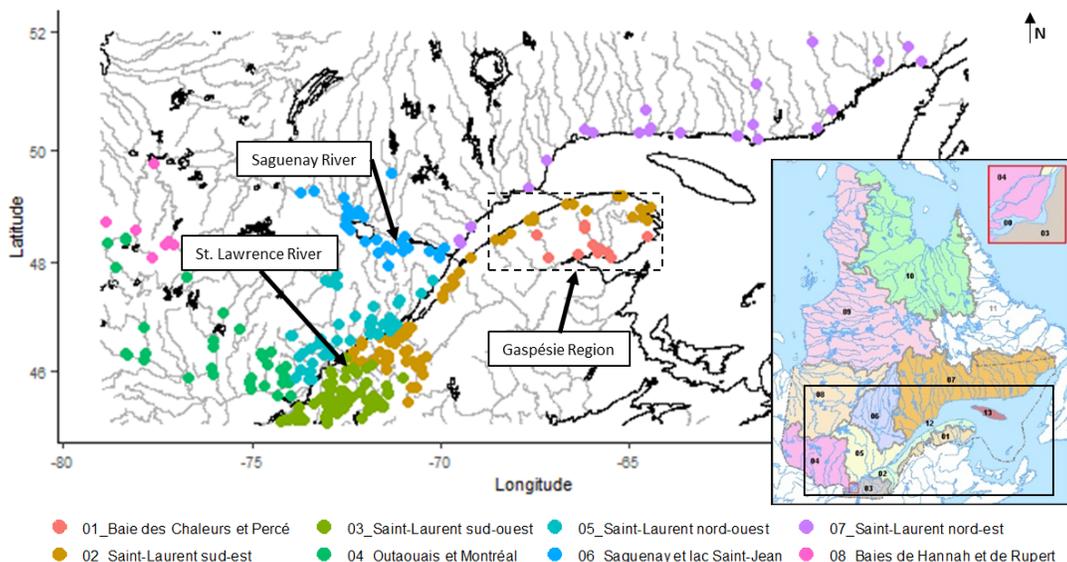


Figure 4.1 Selected sites of the study (Quebec map from DEFACC 2020)

The evolution of the river sites was questioned through three time slices. Also, it was proposed to reconfigure the hydrological regions and discuss the results within newly defined “low flow regions”, using two multivariate analyses. A Principal Component Analysis was used to select the six hydrological indices listed in Table 4.3, to explain low flow differences within the selected river sites. Then, an Ascendant Hierarchical Clustering (Sokal and Sneath, 1963) was used to define homogenous groups of stations (HC; refer to Berthot et al. 2020).

Table 4.3 Hydrological indices used to define low flow regions (definitions from Daigle et al. 2011)

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

The exercise consisted of tracking the evolution of each HC from 1990 to the 2050 with the help of a spatial marker: the Gaspésie region (HC1), the Saguenay River (HC2), the southernmost coast area of the St. Lawrence River (HC3), the same region plus along the St. Lawrence River and/or the western part area (HC4), with the western rivers (HC5), the northeastern most river (HC6), and along the 48th parallel (HC7). Results below will also be for a HC8 group for horizons 2020 and 2050, including two rivers in the southern part area.

4.3.4 The wetted perimeter

Given that hydraulic simulations were not available, wetted perimeter values associated with environmental flow metrics were extracted from the MELCC database of historical gauging at the 43 selected sites (Berthot 2021). For comparison, a wetted perimeter value was calculated at each site using the maximum curvature method as proposed by Mackey et al. (1998; refer to Berthot et al. 2021; *submitted*). It should be noted that for this part, the historical flow series (and not the simulated flow data) were used to provide values for the “horizon 2020”, as in Berthot et al. (2021; *submitted*) study. The point of the maximum curvature in the curve representing the Q-WP relationship was used to identify the associated flow value called “QMC”. Its associated wetted perimeter value was considered as a conservative threshold for potential fish habitat

availability (Gippel and Stewardson 1998). Flow and wetted perimeter values were standardized as proposed by Caissie and El-Jabi (2003), with the mean annual flow and its associated wetted perimeter (Equation 4.1):

$$\frac{WP}{\overline{WP}} = \left(\frac{Q_e}{\bar{Q}} \right)^b \quad (4.1)$$

WP : wetted perimeter (m);

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

Q_e : environmental flow metric ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

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

b, c : numerical coefficients.

4.4 Results

4.4.1 Low flow metrics from 1990 to horizons 2020 and 2050

Figure 4.2 introduces box plots depicting environmental flow metrics variability for inter-annual (a), summer (b) and winter (c) periods, the horizons 1990, 2020 and 2050, and the six Models (A to F, where A, B, C and E are GCMs and D and F, two Regional Climate Models). Flow values were standardized (divided by MAF) for comparison with MAF thresholds. The flow metrics were ordered from the lowest to the highest for the horizon 1990. First, the minimum and maximum values presented more variability in extreme flows than for median flow values. Minimum flow metric values decreased from 1990 to 2050 for summer (-S) and annual flow metrics and maximum flow values increased from 1990 to 2050 for winter (-W) and annual periods. The winter and the LQ50 low flow metrics increased from 1990 to 2050. The variance of most flow metrics is expected to increase by 2050 with more extreme (especially low extremes) metric values. The increase in variance appeared higher between the horizons 2020 and 2050 than between the 1990 and 2020. Also, the variance of flow metrics seemed higher for intermediate (B and E) and pessimistic (C and F) climate change scenarios than optimistic (A and D).

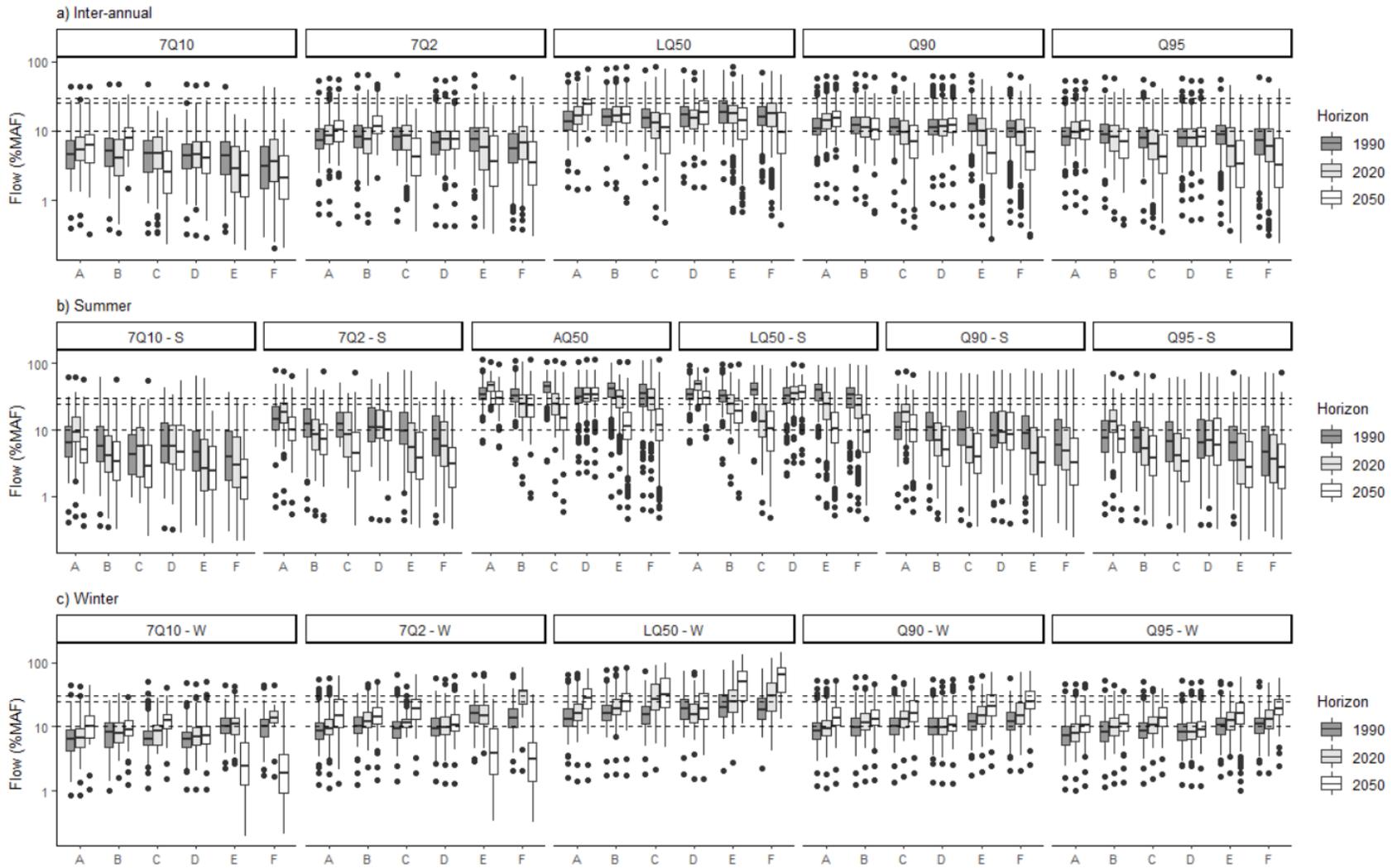


Figure 4.2 Standardized metric flow values for horizons 1990, 2020 and 2050. “-S” for summer and “-W” for winter flow metrics (dotted lines are 10%MAF, 25%MAF and 30%MAF flow thresholds)

In general, inter-annual flow metrics median values (Figure 4.2a) were more or less the same for the three horizons and remain < 25%MAF. Summer flow metrics median values (Figure 4.2b) are expected to decrease, while winter flow metrics median values (Figure 4.2c) are expected to increase, considering all the selected scenarios, excepted for the winter 7Q10 and 7Q2 flow metrics E and F scenarios. The AQ50 flow metric still provided highest values during summer periods (\approx 25%MAF) and the LQ50-W flow metric median value increased from < 25%MAF in 1990 to > 30%MAF in 2050.

Figure 4.3 displays the spatial distribution of the flow values differences (%) for the 7Q2, Q90, LQ50 and AQ50 flow metrics, from horizons 2020 to 2050. Note that the spatial patterns are similar for 7Q2 and 7Q10, Q90 and Q95, LQ50 and 70%LQ50 and of course, between AQ50 and 70%AQ50. It was therefore decided to average the simulated flows of the six scenarios for ease of conveying a general result. Two main groups emerged from the 7Q2 flow metric map (Figure 4.3a). Differences of +5 to +15% between 2020 and 2050 (green) are expected along the St. Lawrence River from the northernmost coast in the east to the southernmost coast in the west. The second group includes stations for which -5 to +5% differences (yellow) are expected, mainly in the Gaspésie region (east) and in the Saguenay region on the north shore of the St. Lawrence River, as well as numerous stations located in the southwestern portion of the study area. However, in the sub-region identified in the zoomed square, a very wide range of differences was observed ranging from < -35% to > 35%. In Figures 4.3b, and 4.3c, the Q90 and LQ50 flow metrics maps show that three groups of rivers can be delineated in the southern part of the area: -15% to -5% (orange), -25% to -15% (red) and -35% to -25% (purple). The latter two ranges of differences are predominant in Figure 4.3d for the AQ50 flow metric map.

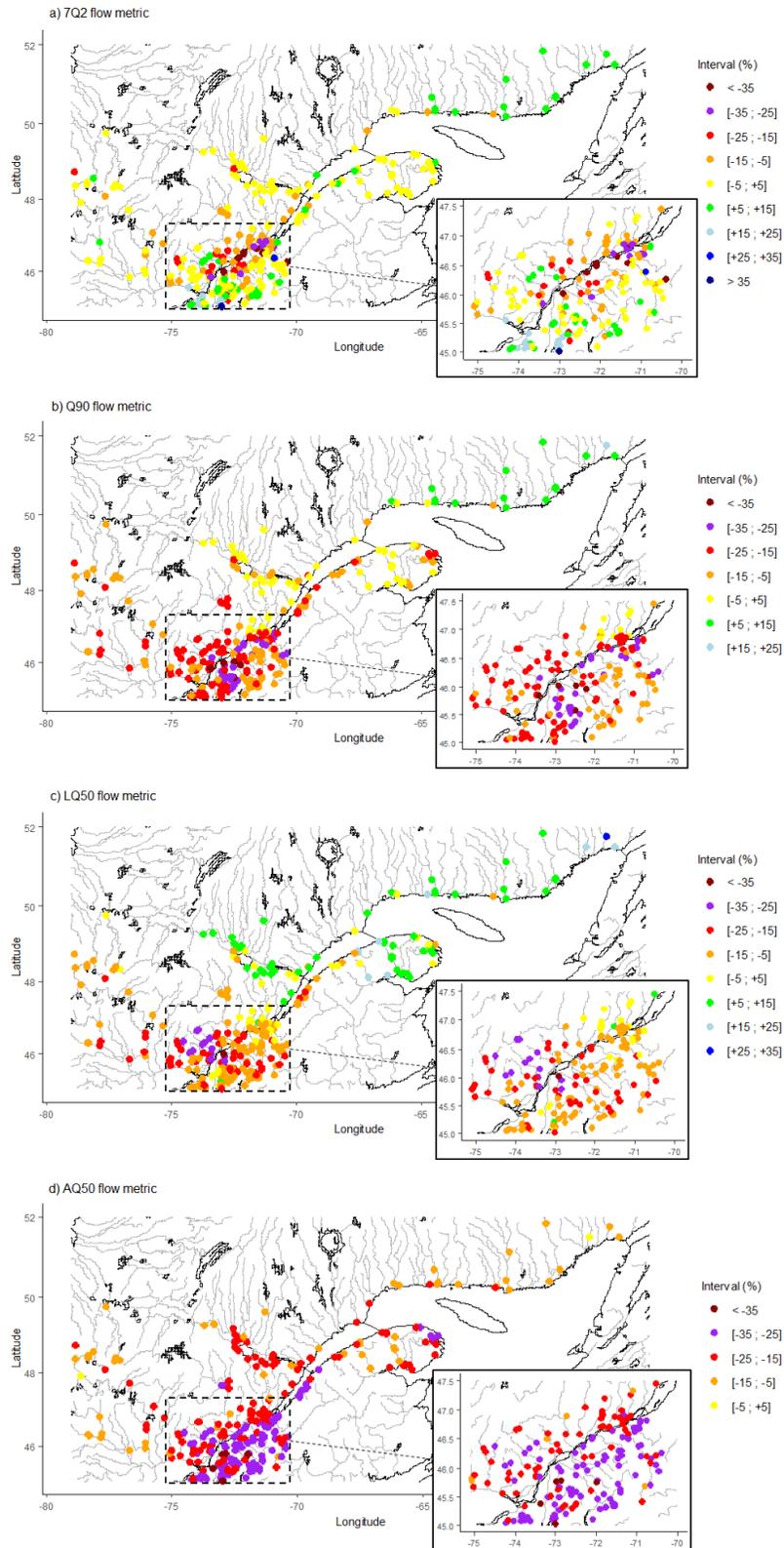


Figure 4.3 Differences (%) in environmental flow metric values between horizons 2020 and 2050 for the 7Q2 (a), Q90 (b), LQ50 (c), and AQ50 (d) flow metrics.

In addition to the spatial distributions observed in the 7Q2 flow metric map (Figure 4.3a), a clear divide was observed on both sides of the 48th parallel in the Q90 and LQ50 flow metric maps (Figure 4.3b and 4.3c) and on both sides of the St. Lawrence River (AQ50 flow metric map; Figure 4.3d). Results displayed in Figure 4.3 suggest that the flow metric calculated for the shortest period (AQ50) showed less variability between rivers than the inter-annual flow metrics (7Q2, Q90 and LQ50), and allowed a somewhat clear spatial grouping of rivers.

4.4.2 Low flow regions for horizons 1990, 2020 and 2050

Figure 4.4 shows the results of the multivariate (ACC and HCA) grouping of stations for horizons 1990 (a), 2020 (b) and 2050 (c).

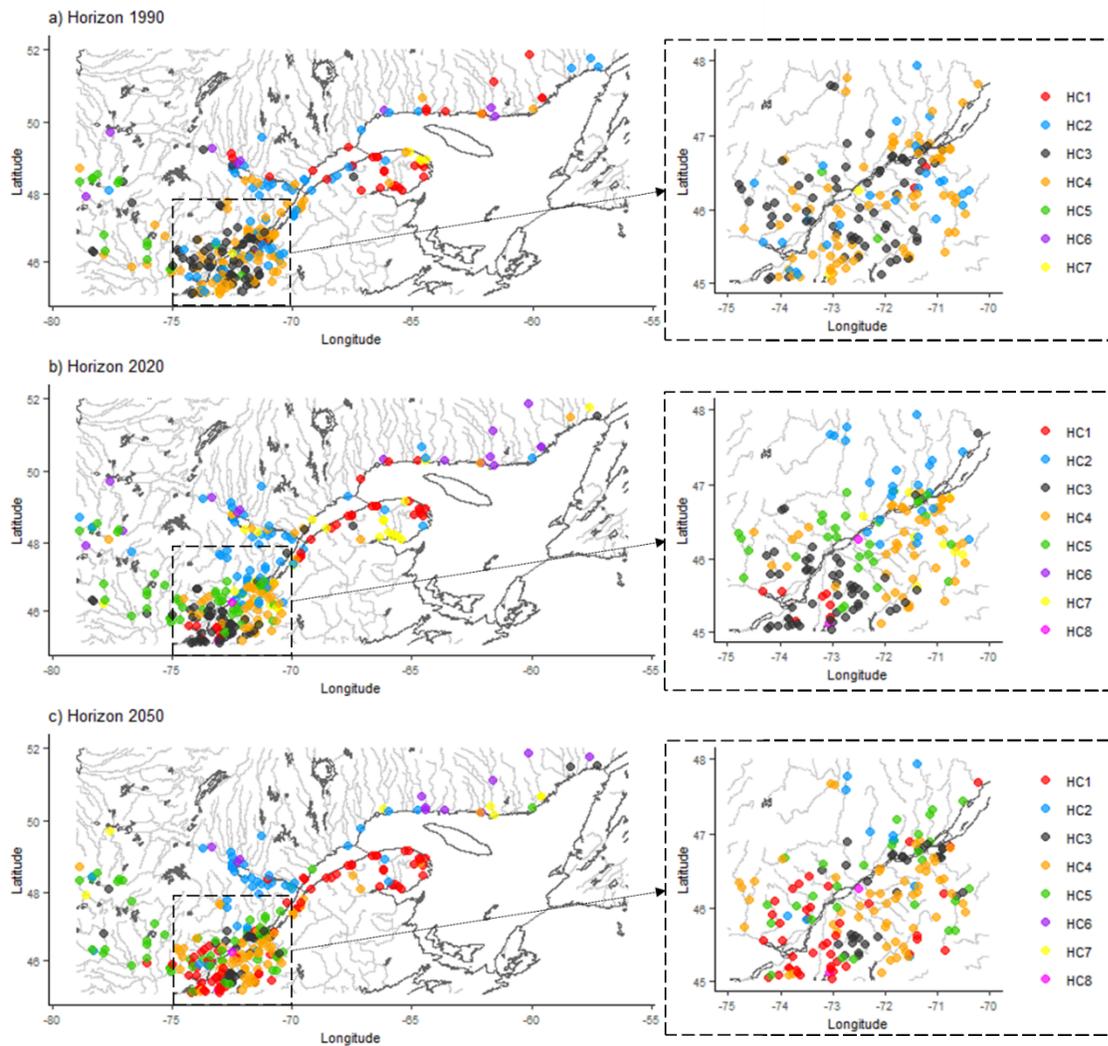


Figure 4.4 Low flow regions from the Hierarchical Ascendant Classification (HC1 to HC8) for horizons 1990 (a), 2020 (b) and 2050 (c)

Again, the average of the simulated flows of the six scenarios is presented for ease of reading. There were seven low flow regions (HC1 to HC7) for horizon 1990 and eight for horizons 2020 and 2050. Non-parametric ANOVA (Kruskall Wallis) and posthoc tests (Wilcoxon-Mann-Whitney test) were used and confirmed that each HC group was significantly different from the others (p-value < 0.05). According to the selected scenarios, HCs will likely change (i.e. stations will be grouped differently) because the flow characteristics used to compute the principal components are expected to change (Table 4.4). Part of these changes is associated with changes of the month during which the lowest flows occur (Figure 4.5).

Table 4.4 Hydrological indices mean values by HC for horizons 1990, 2020 and 2050

| | Horizon | HC1 | HC2 | HC3 | HC4 | HC5 | HC6 | HC7 | HC8 |
|--|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Number of stations | 1990 | 34 | 55 | 73 | 91 | 15 | 9 | 6 | |
| | 2020 | 26 | 49 | 58 | 57 | 44 | 17 | 30 | 2 |
| | 2050 | 74 | 40 | 35 | 63 | 50 | 12 | 7 | 2 |
| Catchment size (km²) | 1990 | 4505 | 575 | 706 | 1173 | 1771 | 14663 | 265 | |
| | 2020 | 2170 | 1409 | 440 | 379 | 1813 | 13646 | 627 | 15 |
| | 2050 | 709 | 1495 | 336 | 867 | 1679 | 9584 | 17910 | 15 |
| A7 (m³s⁻¹) | 1990 | 87.9 | 14.2 | 15.9 | 27.1 | 44.5 | 359.7 | 15.5 | |
| | 2020 | 58.6 | 35.3 | 6.5 | 6.8 | 37.3 | 386.1 | 20.2 | 0.03 |
| | 2050 | 11.4 | 33.8 | 6.4 | 12.7 | 34.7 | 324.2 | 663.9 | 0.03 |
| A27 (m³s⁻¹) | 1990 | 2.4 | 0.36 | 0.68 | 1.05 | 2.31 | 12.8 | 0.08 | |
| | 2020 | 1.83 | 1.24 | 0.38 | 0.35 | 2.12 | 12.1 | 0.32 | 0.001 |
| | 2050 | 0.49 | 1.21 | 0.38 | 0.76 | 1.84 | 9.55 | 21.7 | 0.001 |
| D16 (dimensionless) | 1990 | 0.11 | 0.11 | 0.15 | 0.12 | 0.29 | 0.12 | 0.04 | |
| | 2020 | 0.14 | 0.18 | 0.13 | 0.15 | 0.23 | 0.14 | 0.08 | 0.01 |
| | 2050 | 0.08 | 0.16 | 0.12 | 0.10 | 0.19 | 0.17 | 0.17 | 0.01 |
| F2 (dimensionless) | 1990 | 0.09 | 0.14 | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 11.3 | |
| | 2020 | 0 | 0 | 0.01 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 16.8 |
| | 2050 | 0.6 | 0 | 0.03 | 0.03 | 0.001 | 0 | 0 | 20.6 |
| T3 (Julian date) | 1990 | 176 | 161 | 175 | 202 | 183 | 181 | 183 | |
| | 2020 | 204 | 159 | 191 | 171 | 199 | 181 | 170 | 175 |
| | 2050 | 204 | 170 | 190 | 189 | 211 | 178 | 174 | 197 |
| V8 (dimensionless) | 1990 | 1.9 | 3.4 | 5.4 | 4.3 | 6.4 | 2.8 | 2.2 | |
| | 2020 | 2.9 | 3.5 | 6.4 | 5.1 | 6.0 | 3.4 | 3.3 | 3.8 |
| | 2050 | 4.1 | 3.8 | 8.3 | 6.1 | 5.5 | 3.9 | 4.6 | 3.0 |

Figure 4.5 shows the spatial distribution of the month with the lowest flows. Results were calculated for the inter-annual (Figure 4.5a), summer (Figure 4.5b) and winter (Figure 4.5c) periods of horizon 2050.

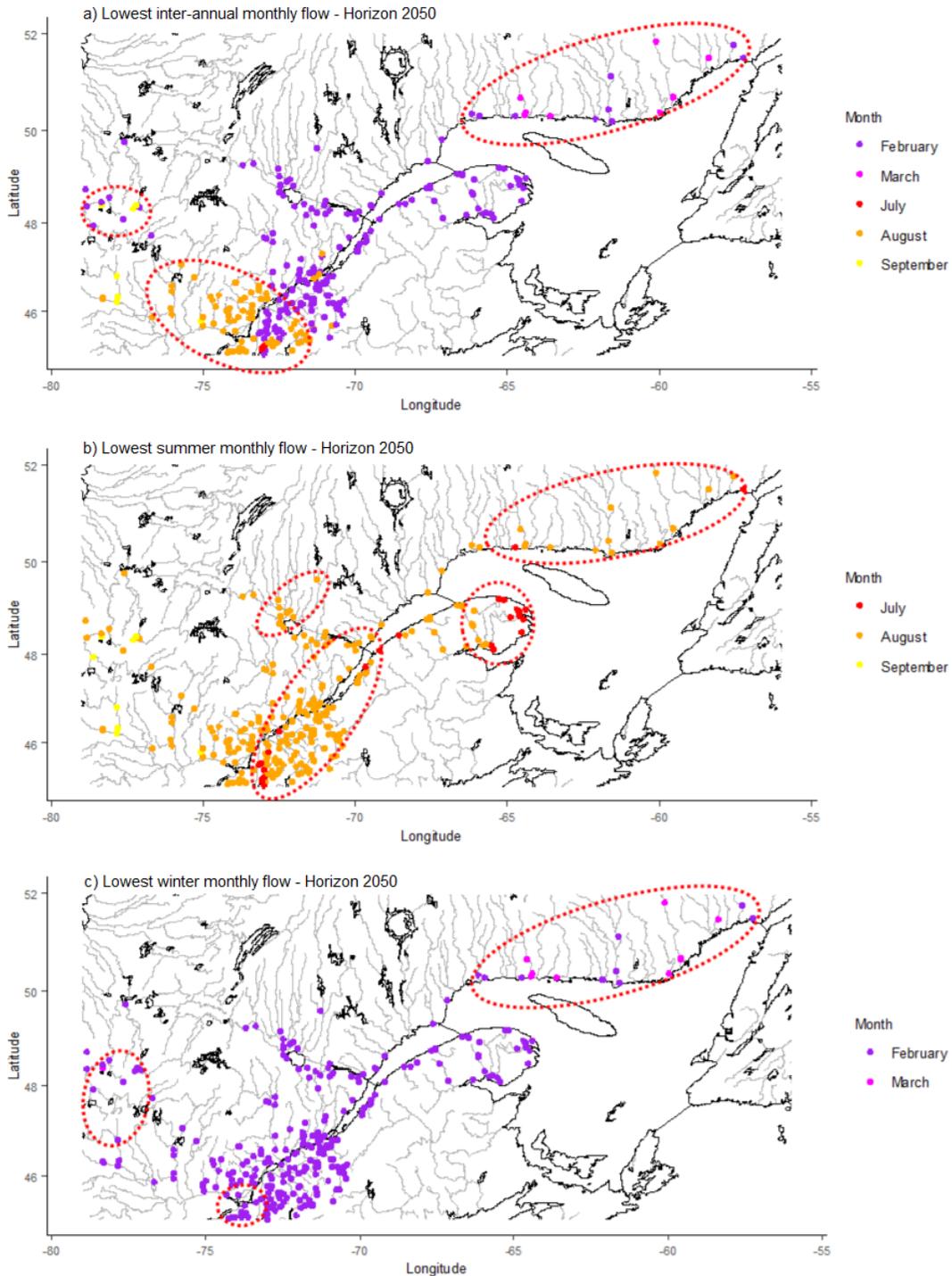


Figure 4.5 Map of the month with the lowest flows for the inter-annual (a), summer (b) and winter (c) periods of the horizon 2050. The dashed red circles show the regions where there has been a change of the month with the lowest flow between horizons 2020 and 2050.

In Figure 4.5a, 90% of river sites had their lowest flow month during winter for the horizon 1990, 75% by 2020 and 54% by 2050. These percentages are higher than for the one month forward or backward shift, varying for 3 to 9% of the river sites studied here, depending on the time horizon and looking to an inter-annual period. There were three main sub-regions of change for the inter-annual period (Figure 4.5a). The two northern groups included the rivers with the lowest monthly flow during the winter periods. According to the scenarios selected for the present study, the month with the lowest flows would change from March to February for eight rivers on the eastern part of the study area and four river sites from March to February in the western portion. A third group of stations on the western side would be subjected to a shift from winter to summer, i.e. from February to August in most cases.

Figures 4.5b and 4.5c focused on intra-seasonal changes. For the summer period, 23% of the river sites are characterized by a shift forward by one month in 2020 and 35% in 2050, while 16% have shifted backward by one month in 2020 and 10% in 2050. For the 2050 horizon, the lowest monthly flow values advanced from July to August in the southern circled area and near the Saguenay River. The lowest monthly flow values shifted earlier by one month from September to August in the north-eastern area and from August to July in the Gaspésie region. For the winter period, 1% of the river sites have moved forward by one month in 2020 and 1% in 2050, while 9% have moved back by one month in 2020 and 15% in 2050. For horizon 2050, the lowest monthly flow values shifted forward from January to February in the southern circled area. The lowest monthly flow values drop by one month from March to February in the north-eastern and in the western areas.

4.4.3 The wetted perimeter

Figure 4.6 shows environmental flow metrics and their associated wetted perimeter values for two selected sites that are representative of two different homogenous hydrological groups, and their evolution for the six climate change scenarios. The metrics were ranked from the lowest to the highest flow metric values for the 2020 horizon. The dashed horizontal lines indicate the so-called Tennant thresholds (10%MAF, poor; 25%MAF and 30%MAF, fair) and the QMC wetted perimeter threshold as a value that may be indicative of fair physical habitat. The metrics are distinguished between the summer ("- S") and winter ("- W") periods and the inter-annual period (no letter). Figure 6 allows to compare how wetted perimeter (solid lines) evolve as a function of ranked environmental flow metrics (dashed lines). Differences occur mostly for the more conservative environmental flow metrics (right end of graphs) and are greater for summer environmental flow

metrics than for inter-annual metrics. The 7Q10 and 7Q2 flow metrics missing values are due to the non-validated hypothesis of independence, homogeneity and stationarity (Table 4.2).

Figures 4.6a shows how summer environmental flow metrics values may decrease significantly in the future (down by -15% for the AQ50 flow metric; Figure 4.6a). For Figure 4.6b, the LQ50W flow metric will remain the most conservative in winter by 2050, while the 30%MAF should be applied instead of the AQ50 and LQ50S environmental flow metrics in summer. According to the selected scenarios, the wetted perimeter values will decrease during the summer period or increase during winter period as seen in Figure 4.6b but not in Figure 4.6a (Aux Écorces River). The Ouelle River (Figure 4.6b), a particularly shallow and warm river (Daigle et al. 2015), is characterized by relative wetted perimeter values much lower than the other two examples. In this river, a decrease of 10% in the wetted perimeter value could be expected for the AQ50 metric by 2050. In such cases, looking at both flow and wetted perimeter thresholds may impact the choice of the more conservative environmental flow metric. As expected, RCP8.5 climate change scenarios (D, E, and F) provided lower flow values than RCP4.5 (A, B, and C). The D and C climate change scenarios values seemed close.

scenarios is limited and no hydraulic modelling was done. Hydrological methods, spatial and temporal scales and conservative thresholds that may provide insight in habitat quantity were investigated. According to the selected climate change scenarios, results showed that:

- Summer low flows, as characterized by a number of environmental flow metrics, will become lower than winter low flows by 2050, for the six climate change scenarios;
- The AQ50 flow metric, which has been deemed as a fairly conservative environmental flow for decades, will decrease considerably by 2050 during summer (from -15% to -35% mainly along the St. Lawrence and Saguenay rivers);
- The LQ50 flow metric, either applied for a summer, winter or annual period, will mainly provide the highest values under the six climate change scenarios;
- The inter-annual flow metrics are influenced by the season with the lowest flows, which is expected to change for many stations;
- The frequency of occurrence of extreme flow values will increase by 2050;
- The southern part of the study area will be more affected than the northern part;
- The percentage differences for most flow metrics between horizons will be increasing mostly between 2020 and 2050.

Flow metrics can be separated into two groups: those estimated from ranked discharge time series or the so-called flow duration curve (Q90, Q95, AQ50, LQ50, 70%AQ50 and 70%LQ50 flow metrics) and those estimated using frequency analysis (7Q2 and 7Q10 flow metrics). Frequency analysis requires that the hypothesis of independence, homogeneity and stationarity be validated. Stationarity is defined as the absence of trends in the observed time series. When using climate change scenarios to generate future hydrological scenarios, the likelihood of non-stationarity in synthetic time series is high. One way to circumvent this challenge is to compute the metrics for sub-periods within which stationarity is verified. This strategy was implemented in the present study with three periods being investigated at the 1990, 2020 and 2050 horizons. Despite this caution, these three hypotheses, mainly the stationarity, were not validated for the 284 sites considered in this study, which explains the varying sample size described in Table 4.2. St-Hilaire et al. (2021) reiterated the fact that environmental flow assessment usually required stationary condition to fit statistical distribution with constant parameter values to the empirical distribution of extremes. When this is done, the return period does not account for any trend in the timeline. Although there is a strong corpus of literature that describes how to perform non-stationary frequency analysis, its implementation is not without challenge. It is possible that the greatest challenge, as highlighted by St-Hilaire et al. (2021), is the interpretation by managers of

a return period in a non-stationary context, although reflections are being carried out (Poff 2017). For Poff (2017), the non-stationarity of the hydrological regime needs to be anticipated in the management of environmental flows, and he proposes in particular to look at non-flow based parameters to assess the functions, processes and structures of lotic ecosystems. In the present study, the evolution of the 7Q2 and 7Q10 flow metrics vary in the same direction as the other flow metrics, across horizons and for inter-annual and seasonal periods, except for the climate change scenarios E and F (Figure 4.2) for the 2050 winter period (Figure 4.2). Spatially, Figure 4.3b shows a wide range of variability in values for sites in the southern part of the study area. Thus, environmental flow metrics based on frequency analysis are not recommended for environmental flow assessment in the context of climate change.

The results made it possible to understand the evolution of environmental flows in terms of spatial and temporal scales. Observing the evolution of the spatial distribution of the flow values by HC (Figure 4.3, Table 4.4) further our understanding on how climate change will impact rivers both locally and within regions. This is more explicit when we consider the evolution of the month with the lowest values (Figure 4.4), and observe that the period of lowest flow can change seasonally. The temporal scale was analysed in Figure 4.2, comparing boxplots of inter-annual flow metrics versus seasonal flow metrics (-S and -W) for the six climate change scenarios. The spatial information showed that the values of the inter-annual flow metrics are more varied than the values of the summer or winter flow metrics. The combination of spatial and temporal results showed that it is preferable to assess environmental flows by low flow regions and seasons, in order to have a better understanding of the impact of environmental flow management on river ecosystems. Low flow regions can be used to classify groups of rivers according to the potential risk of negative impacts on the river ecosystems during low flow periods.

Throughout this study, Tennant's (1976) flow thresholds were used to discuss the results in relation to poor (10%MAF) flow values to protect river ecosystems and two fair values (25%MAF, Caissie and El-Jabi 1995; 30%MAF). The Tennant's flow thresholds were chosen because they are known internationally. For instance, results showed that the LQ50 flow metric values will get closer to the 30%MAF flow threshold during winter by 2050 and will be under the 25%MAF or close to the 10%MAF flow thresholds during summer by 2050. This is the opposite of today's trend and it raises the question of the short-term adaptation of river ecosystems to new flow regimes. These conservative thresholds clarify managers' interest of carrying out comprehensive hydrological, geographical and biological studies to estimate them. In addition, minimum and maximum flow thresholds can be used to provide a range of possible environmental flows as the

sustainability boundaries proposed by Richter (2010) or the *presumptive standards* method (Richter et al. 2011). However, the assessment of flow thresholds is a huge task rendered more difficult because of the paucity of ecological information to match with the definition of environmental flow. Flow thresholds need to take into account a more complete biological context, in addition to fisheries interests, and have to be adapted to climate change, to manage the impacts on aquatic ecosystems (Meyer et al. 1999). To partially fill this information gap, the wetted perimeter threshold was proposed in a previous study (Berthot et al. 2021, *submitted*). This tool permits to estimate the potential availability of physical habitat for river ecosystems. In this study, the six climate change scenarios (four GCMs: IPSL-CM5A-LR, INMCM4, CanESM2, CMCC-CESM and two RCM from CanESM2-CRCM5) provide a first insight into the potential changes in habitat availability associated with selecting environmental flow metrics in the context of climate change in the southern Quebec Rivers.

Finally, recent studies on the impact of climate change on low flow periods used global warming temperature predictions (Marx et al. 2018) or eco-hydrological assessment models (Shrestha et al. 2019). Because it could be very expensive to acquire relevant ecological data for the whole territory ($\approx 730\,000\text{km}^2$ in the present study area), we suggest that water temperature could be a tool of interest (Daigle et al. 2019). Temperature is one of the so-called “master variables” in aquatic ecosystems that can be used in habitat simulation methods to calculate environmental flows. It is linked to air temperature and is therefore impacted by the effects of climate change. Hence joint modelling of future environmental flow and temperature scenarios would provide a better understanding of the choice of an appropriate environmental flow metric. However, a thorough hydro-thermal analysis of low flows will require a better distribution of monitoring stations to adequately cover large territories such as southern Quebec.

4.6 Conclusions

Climate change models uncertainties aside, the results of this study are relevant for forward thinking about adapting the management of environmental flows, according to the evolution of the hydrological context with climate change effects. Although many jurisdictions such as Québec still rely solely on hydrological metrics, hydro-climate change scenarios can be an additional hydrological tools and enable the implementation of holistic methods such as ELOHA (St-Hilaire et al. 2021). This study showed that: (a) relatively homogenous low flow regions are not matching with current hydrological regions and will shift in the future; (b) there is a need to calculate the flow metrics for the season(s) concerned by the management of water abstraction; (c) using tools

such as the wetted perimeter provides insight to the repercussion of flow changes in the physical habitat, mainly during summer period. Assessing environmental flows for different climate change scenarios mainly presented the limit of hydrological methods based on frequency analysis, which becomes more complex to use in the context of non-stationarity. Also, important changes are to be expected about the flow-ecological relationships due to the upward trend in winter and the downward trend in summer by 2050.

4.7 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. Our final thanks go to Rebecca Tharme, Alain Rousseau and Ali Assani for their review and inputs.

5 DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

5.1 Bilan et résumé des conclusions

Cette thèse porte sur la comparaison des méthodes d'estimation des débits environnementaux, appliquées à des rivières du Québec méridional. En général, il s'agissait de comprendre :

- Ce que signifie d'utiliser une ou plusieurs métriques hydrologiques pour des rivières réparties sur une superficie d'environ 730 000 km² ;
- Si les débits environnementaux pouvaient être définis en y associant une méthode hydraulique, le périmètre mouillé, à une ou plusieurs métriques hydrologiques ;
- Comment cette méthode hydrauliques et les métriques hydrologiques évolueront dans un contexte de changement climatique.

Des trois études menées pour les rivières du Québec méridional, il ressort que :

- Les débits environnementaux doivent être définis pour des échelles spatiales réduites (région, bassin versant, section) et pour une temporalité limitée à la période d'étiage ;
- Il serait plus approprié d'établir des régions (possiblement non-contiguës) basées sur l'analyse multivariée des indices hydrologiques d'étiage. Cela aide à catégoriser les rivières, cibler des zones à risque et à mieux comprendre les enjeux liés aux périodes d'étiage ;
- Les métriques hydrologiques seules ne suffisent pas à maintenir et protéger les écosystèmes environnementaux à moins d'utiliser des débits seuils de protection prédéfinis conservateurs (méthode de Tennant) ;
- Le périmètre mouillé s'est révélé être un outil complémentaire pour les rivières ayant les plus petits bassins versants et/ou faibles débit moyen interannuel parmi celles présélectionnées, majoritairement situées dans les zones à risque;
- À l'inverse, le débit associé à la méthode du périmètre mouillé suffit rarement à lui seul, en comparant avec les débits seuils de Tennant, pour répondre aux besoins des écosystèmes lotiques d'après la définition des débits environnementaux;
- L'étude des débits environnementaux dans un contexte de changement climatique est pertinente pour observer les limites des méthodes de détermination actuelles et réfléchir à les adapter pour suivre la variabilité hydrologique future et prévenir les futurs impacts sur les écosystèmes lotiques ;

- Les scénarios de changement climatique ont permis d'identifier les zones où la variabilité hydrologique future sera préoccupante au regard de la définition des débits environnementaux ;
- L'analyse fréquentielle utilisée pour calculer le 7Q2 n'est pas pertinente pour le calcul des débits environnementaux actuellement et aussi dans un contexte de changement climatique, contrairement aux courbes de débits classés (partie 5.1);
- La métrique hydrologique AQ50 est la plus adaptée et conservatrice aujourd'hui, sur la base de comparaison avec les seuils de Tennant (1976). Dans un contexte de changement climatique, la métrique LQ50 se révèle l'être aussi, autant en été qu'en hiver.

Les débits seuils de Tennant (1976) ont des limites d'application au Québec (zone d'application, espèces ciblées non exhaustives, interprétation limitée pour des projections futures) et il serait approprié de les adapter comme ce fut proposé pour les rivières du Nouveau-Brunswick (Caissie et El-Jabi, 1995). Aussi, à des fins de simplification, la revue de littérature s'est concentrée sur l'habitat des poissons.

5.2 L'analyse fréquentielle : non conseillée pour les débits environnementaux

Pour rappel, l'analyse fréquentielle appartient à la famille des méthodes probabilistes stationnaires, appliquée pour calculer les métriques 7Q10 et 7Q2. Elle diffère des métriques associés à la statistique descriptive : AQ50, 30%MAF ou Q90, qui se basent sur l'étude des débits historiques d'une rivière sans ajuster un modèle théorique associé aux probabilités au dépassement. Les analyses réalisées dans ce projet ont porté sur 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. Le respect des critères IID (indépendant et identiquement distribué) a déterminé la taille de l'échantillon et les stations étudiées pour les articles 1 et 2. C'est principalement l'hypothèse de stationnarité qui n'était pas vérifiée (H_0 rejetée pour une p -value ≥ 0.05), signalant la présence d'une tendance. Pour diminuer la probabilité de la présence d'une tendance monotone dans les séries temporelles du troisième article, elles ont été scindées en trois périodes de trente ans. Ces sous-ensembles étant plus courts, l'hypothèse de stationnarité était plus souvent respectée que si les sous-ensembles avaient été joints. Cette approche pourrait être sujette à la critique, pour un possible manque de circonspection.

Quand la fréquence d'évènements hydrologiques extrêmes (étiage et inondation) augmente au cours du temps, la question des changements climatiques se pose. C'est l'étude des longues séries temporelles historiques ou simulées qui permet de définir si ces évènements rares font partie d'un cycle hydrologique naturel ou d'un cycle modifié par les changements climatiques (tendance). Si l'on souhaite tenir compte de la présence d'une tendance de manière explicite, il faut faire de l'analyse fréquentielle non stationnaire, dont les résultats devront être post-traités avant d'être interprétés. D'après Xiong et al. (2018), la non-stationnarité des séries temporelles à des causes liées au climat (précipitation, température...) et aux activités humaines (aires d'irrigation, population...) qui peuvent être évaluées. Pour Poff (2017), la non-stationnarité du régime hydrologique doit être anticipée dans la gestion des débits environnementaux, et il propose notamment, de s'intéresser à des paramètres non basés sur le débit pour évaluer les fonctions, processus et structures des écosystèmes lotiques. Pour Du et al. (2015), l'analyse fréquentielle non stationnaire peut-être réalisée pour l'aide à la décision des gestionnaires, mais pour St-Hilaire et al. (2021), l'interprétation et la compréhension des résultats pourraient être un défi important. En effet, dans un cadre non-stationnaire, la récurrence (ou période de retour) est en constante évolution.

L'analyse fréquentielle, nécessitant des bases de données de qualité (≥ 20 à 30 ans), n'est pas le premier choix de Belzile et al. (1997) pour le calcul des débits environnementaux, la protection et le maintien des écosystèmes lotiques au Québec méridional. Aussi, les résultats du troisième article montrent qu'il n'est pas objectif d'utiliser les métriques du 7Q2 et du 7Q10 comme des débits environnementaux, quand il est attendu d'avoir des évènements extrêmes plus intenses et fréquents à l'horizon 2050. Aussi, sachant que les débits d'étiage hivernaux seront plus élevés que les débits d'étiage estivaux à l'horizon 2050, il pourrait être intéressant de suivre la réflexion de (Poff 2017) et d'accroître les connaissances sur les écosystèmes lotiques de manières variées et pas uniquement sur la base du débit.

5.3 Perspectives pour le Québec méridional

La température de l'eau

Une proposition est de faire le lien entre la température de l'eau et les périodes d'étiage pour obtenir une première indication de la qualité des habitats (autrement dit d'extraire ce lien de la méthode des modèles d'habitat). Faute de temps et de pouvoir inclure un volet biologique, cet

aspect apparaît seulement sous la forme de résultats préliminaires dans le rapport final rendu au Ministère de l'Environnement (Berthot et al. 2021) et un article incluant des rivières des provinces de l'Atlantique du Canada est en cours de rédaction. Une comparaison des températures de l'eau pour différents débits environnementaux a été faite. La température de l'eau est une façon concrète et localisée de mieux comprendre l'impact des métriques hydrologiques sur les écosystèmes lotiques. Pour rappel, l'étiage estival correspond à la phase d'alimentation des juvéniles de certaines espèces de poissons (par ex. omble fontaine et saumon atlantique). La température de l'eau est un paramètre physico-chimique intrinsèquement lié à la qualité du milieu (chimie de l'eau, présence de nutriments), et il est de fait, un facteur incontournable de sa préservation.

Comme pour le périmètre mouillé, tenir compte de la température de l'eau semblerait à première vue pertinent pour des cas spécifiques. De multiples études sur la thermie des rivières du Québec méridional sont disponibles : caractérisation de la température de l'eau dans les rivières (Daigle et al. 2019), modélisation (Boudreault et al. 2021), projection (Jeong et al. 2013) et changement climatique (Kwak et al. 2017), principalement basée sur les données de suivi thermique du réseau Rivtemp (www.rivtemp.ca) et du travail de terrain. Les températures de l'eau élevées sont fréquemment associés aux périodes d'étiage (Gu et al. 1998; St-Hilaire et al. 2021). Ces études montrent qu'il y a un intérêt accru pour l'utilisation de la température de l'eau dans la gestion des ressources en eau (Caissie 2006, Ouellet et al. 2020, Daigle et al. 2019, Daigle et al. 2021). Étudier la température de l'eau est d'autant plus pertinent qu'elle est habituellement fortement corrélée à la température de l'air, et donc sujette aux effets des changements climatiques. Enfin, le lien entre l'apport en eau souterraine et les débits environnementaux pourrait aussi être étudié pour les rivières du Québec méridional. Les écosystèmes lotiques étant aussi dépendants des eaux souterraines pendant les périodes d'étiage Arthington (2012).

Perspectives futures

Les effets du changement climatique sur les périodes d'étiage devraient être analysés selon cinq axes pour Arthington (2012) :

- Gérer les aires protégées d'eau douce ;
- Protéger et restaurer les régimes d'écoulement ;
- Modifier le fonctionnement des barrages et de la gestion de la plaine inondable ;
- Développer une législation, une politique, une gouvernance et une gestion adaptative ;

- S'appuyer sur l'engagement autochtone, la science et l'éducation.

Ces objectifs tournés vers les faibles débits à appréhender à l'avenir diffèrent de ceux du MELCC en deux points : la protection et la restauration des régimes d'écoulement et l'engagement autochtone. Dans le premier cas, la notion de sensibilité des cours d'eau est importante à prendre en compte. Celle-ci se rapporte à la *capacité d'un système (rivière, tronçons de rivière, écosystèmes) à s'ajuster à différents types de pressions naturelles et/ou anthropiques sans perdre ses attributs et ses fonctions, sans modification notable de ses caractéristiques biotiques et abiotiques* (St-Hilaire et al. 2017). En hydrologie, la sensibilité peut être assimilée au ratio volume d'eau disponible – volume d'eau prélevé (St-Hilaire et al. 2017). Il est alors conseillé de considérer à mettre en retrait l'ingénierie civile pour un retour au fonctionnement « naturel » des cours d'eau. Dans le second cas, outre la volonté principale de revenir aux principes fondamentaux (cycle de l'eau, parcours naturel de l'eau, usages de l'eau, l'eau comme source de vie), l'engagement autochtone fait quant à lui appel au besoin de se concerter avec les peuples fondateurs des territoires colonisés de manière inclusive sur l'usage et le transfert des connaissances sur l'eau (Arthington 2012). Ces objectifs sont aussi préconisés par d'autres chercheurs reconnus pour leurs travaux sur les méthodes exhaustives de détermination des débits environnementaux dans un contexte de changement climatique (partie 4). Ainsi, la détermination des débits environnementaux impliquerait aussi de:

- Développer des modèles de gestion et de réglementations écosystémiques à différentes échelles d'application notamment à l'aide des organismes de bassins versants. Vigeant (2013) propose notamment d'inclure les débits environnementaux dans la *Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats* du Québec;
- Définir les seuils de protection des écosystèmes lotiques des rivières du Québec notamment à l'aide de panels d'experts (Poff et al. 2010, Opperman et al. 2018) ;
- Rendre accessible et à large échelle, 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 ;
- Étudier la relation débit-écologie dans un contexte non stationnaire (Horne et al. 2019) ;
- Continuer 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.

Déterminer les débits environnementaux pour la préservation des écosystèmes est une grande tâche marquée par le manque d'information (Opperman et al. 2018), qu'il faudrait combler par des travaux sur le terrain, de l'affinement des modèles hydrologiques et climatiques, de la télédétection, et de connaissances alternatives (autochtones). En effet, dans cette thèse, seules les rivières instrumentées à écoulement naturel ont été choisies, ce qui exclut les rivières non instrumentées et/ou à écoulement influencé par les activités humaines. Enfin, le contexte biologique des rivières du Québec méridional devrait être maîtrisé, intégré et suivi dans la détermination des débits environnementaux, avec l'usage d'indices hydrologiques et biologiques tenant compte de leur maintien et préservation, ce qui irait dans le sens de l'application de méthodes exhaustives.

6 BIBLIOGRAPHIE

- 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](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02181.x).
- Akaike, H. 1973. "Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle." Pp. 267–281 in *Second International Symposium on Information Theory*, edited by B. N. Petrov and F. Csaki. Budapest: Akademiai Kiado. (Reprinted, with an introduction by J. deLeeuw, in *Breakthroughs in Statistics, Volume I*, edited by Samuel Kotz and Norman L. Johnson. New York: Springer, 1992, pp. 599–624.)
- Anderson, E. P., Jackson, S., Tharme, R. E., Douglas, M., Flotemersch, J. E., Zwarteveen, M., ... Arthington, A. H. (2019). Understanding rivers and their social relations: A critical step to advance environmental water management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 6(6), e1381.
- Anctil, F., W. Larouche, and 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.
- Assani, A. A., and S. Tardif. 2005. "Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche éco-géographique." *Journal of Water Science* 18(2): 133-266. doi: <https://doi.org/10.7202/705559ar>
- Assani, A. A., S. Tardif, S. Benseghir, A. Chalifour, and M. Mhamed. 2006a. "Développement d'une nouvelle méthode de régionalisation basée sur le concept de « régime des débits naturels »: la méthode éco-géographique." *Journal of Water Science* 19(4): 259-407. [10.7202/014421ar](https://doi.org/10.7202/014421ar)
- Assani, A. A., F. Lajoie, M. E. Vadnais, S. Benseghir, and C. Bureau. 2006b. "Modes de variabilité temporelle des débits moyens annuels et leurs liens avec les indices climatiques au Québec (Canada)." *Géographie physique et Quaternaire* 60(3): 215-224. <https://doi.org/10.7202/017996ar>
- Assani A. A., J. F. Quessy, M. Mesfioui, and M. Matteau. 2010a. "An example of application: The ecological "natural flow regime" paradigm in hydroclimatology." *Advances in Water Resources* 33(5): 537-545. doi: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.02.005>
- Assani A. A., D. Landais, M. Mesfioui, and M. Matteau. 2010b. "Relationship between the Atlantic Multidecadal Oscillation index and variability of mean annual flows for catchments in the St. Lawrence watershed (Quebec, Canada) during the past century." *Hydrology Research* 41(2): 115-125. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2010.055>
- Assani A. A., A. Chalifour, G. Légaré, C-S. Manouane and D. Leroux. 2011. "Temporal Regionalization of 7-Day Low Flows in the St. Lawrence Watershed in Quebec (Canada)." *Water Resources Management* 25: 3559-3574. doi: [10.1007/s11269-011-9870-6](https://doi.org/10.1007/s11269-011-9870-6)
- Armstrong D. S., Todd A., and G. W. Parker. 1999. *Assessment of habitat, fish communities, and streamflow requirements for habitat protection, Ipswich river, Massachusetts, 1998–99*, Issue 1, Dept. of the Interior, US Geological Survey, 2001.
- 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](https://doi.org/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.

- 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.
- 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.
- Berthot, L. Comparaison des méthodes d'estimation des débits environnementaux au Québec, dans un Contexte Hydrologique et Climatique Actuel et Futur; Rapport soumis au Ministère de l'Environnement et de la lutte contre le changement climatique # 2032; INRS: Québec, QC, Canada, 2021; 37p.
- 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* 45(4): 358-371. doi: <https://doi.org/10.1080/07011784.2020.1834881>
- Berthot L., A. St-Hilaire, D. Caissie, N. El-Jabi, J. Kirby, and S. Ouellet-Proulx. 2021. "The wetted perimeter to assess environmental flows in Southern Quebec rivers (Canada)." *Submitted to the Ecological Indicators on the 02/06/2021*.
- Bornette, G., and S. Puijalon. 2011. "Response of aquatic plants to abiotic factors: a review." *Aquatic Sciences* 73 (1): 1-14. doi: 10.1007/s00027-010-0162-7.
- Boudreault, J., A. St-Hilaire, F. Chebana and, N. E. Bergeron. 2021. "Modelling fish physico-thermal habitat selection using functional regression." *Journal of Ecohydraulics*, doi: [10.1080/24705357.2020.1840313](https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1840313)
- Bovee, KD. 1982. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. Flow Information Paper No. 12. Washington, DC: U.S. Fish and Wildlife Service (FWS/OBS-82/26).
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B., and J. Taylor. 1998. "Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology." *US Geological Survey-BDR*, Fort Collins, CO, USA, p. 130.
- Bradford, M. J., Higgins, P. S., Korman, J., and J. Snee. 2011. "Test of an environmental flow release in a British Columbia river: does more water mean more fish?" *Freshwater Biology* 52(10): 2119-2134. doi: 10.1111/j.1365-2427.2011.02633.x.
- Bradford, M.J., R.G. Randall, K.S. Smokorowski, B.E. Keatley and K.D. Clarke. 2014. A framework for assessing fisheries productivity for the Fisheries Protection Program. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2013/067. v + 25 p.
- 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.
- Brizga, S.O., Arthington, A.H., Choy, S.C., Kennard, M.J., Mackay, S.J., Pusey, B.J. Werren, G.L. 2002. "Benchmarking, a 'top-down' methodology for assessing environmental flows in Australian rivers." Proceedings of the International Conference on Environmental Flows for River Systems, Southern Waters, University of Cape Town, South Africa.
- Bunn S.E., and A.H. Arthington. 2002. "Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity." *Environmental Management* 30(4): 492-507. doi: 10.1007/s00267-002-2737-0
- Burn, D. H., and M. A. H. Elnur. 2002. "Detection of hydrologic trends and variability." *Journal of Hydrology* 225(1-4): 107-122. doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00514-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00514-5)

- 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: 10.1139/195-033.
- Caissie, D., and N. El-Jabi. 2003. "Instream Flow Assessment: From Holistic Approaches to Habitat Modelling." *Canadian Water Resources Journal* 28(2): 173-183. doi: <https://doi.org/10.4296/cwri2802173>
- Caissie, D. 2006. "The thermal regime of rivers: a review." *Freshwater Biology* 51(8): 1389-1406. Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- 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).
- Canada. 2021. "CanESM2 Model." <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/climate-change/science-research-data/modeling-projections-analysis/centre-modelling-analysis/models/second-generation-earth-system-model.html> [consulté le 14 juin 2021]
- 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.
- Capra, H., Sabaton, C., Gouraud, V., Souchon, Y., and P. Lim. 2003. "A population dynamics model and habitat simulation as a tool to predict brown trout demography in natural and bypassed stream reaches." *River and Research Application* 19: 551–568, doi:10.1002/Rra.729
- Carlin, B. P. and T. A. Louis. 1996. *Bayes and Empirical Bayes Methods for Data Analysis*. London: Chapman & Hall.
- Carvalho L., E. B. Mackay, A. C. Cardoso, A. Baattrup-Pedersen, S. Birk, K. L. Blackstock, G. Borics, A. Borja, C. K. Feld, M. T. Ferreira, L. Globevnik, B. Grizzetti, S. Hendry, D. Hering, M. Kelly, S. Langaas, K. Meissner, Y. Panagopoulos, E. Penning, J. Rouillard, S. Sabater, U. Schmedtje, B. M. Spears, M. Venohr, W. van de Bund, and A. L. Solheim. 2019. "Protecting and restoring Europe's waters: An analysis of the future development needs of the Water Framework Directive." *Science of the Total Environment* 658 1228-1238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.255>
- Chen J., F. P. Brissette, and R. Leconte. 2011. "Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology" *Journal of Hydrology* 401(3-4) 190-202. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.020>
- Chouaib, W., and D. Caissie. 2021. "Regional disparities in water availability and low flow conditions in rivers across Canada." *Journal of Hydrology* 598: 126195. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126195>
- CMCC. 2021. "CMCC Model." <https://www.cmcc.it/models/cmcc-esm-earth-system-model> [consulté le 14 juin 2021]
- Cyr J-F. 2012. *Impacts potentiels des changements climatiques sur les événements hydrologiques extrêmes : sévérité des étiages et risques de crues*. Colloque en agro-climatologie 2012 du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 24 p. https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Cyr_Jean_Fr.pdf
- 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.
- Daigle A. D. I. Jeong, and M. F. Lapointe. 2015. "Climate change and resilience of tributary thermal refugia for salmonids in eastern Canadian rivers." *Hydrological Sciences Journal* 60(6): 1044-1063. Doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.898121>

- Daigle A., C. Boyer, and A. St-Hilaire. 2019. "A standardized characterization of river thermal regimes in Québec (Canada)." *Journal of hydrology* 577: 123963. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.123963>
- Davies, S. P., and S. K. Jackson. 2006. "The biological condition gradient: a descriptive model for interpreting change in aquatic ecosystems." *Ecological Applications* 16(4): 1251-1266. Doi: [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2006\)016\[1251:TBCGAD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2006)016[1251:TBCGAD]2.0.CO;2)
- Déclaration de Brisbane 2007 (cf. Brisbane Declaration 2007)
- DEFACC (Department of Environment and Fight Against Climate Change). 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.
- 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.
- 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) 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>
- Dehghanipour, A. H., G.Schoups, B. Zahabioun, and H Babazadeh. 2020. "Meeting agricultural and environmental water demand in endorheic irrigated river basins: A simulation-optimization approach applied to the Urmia Lake basin in Iran." *Agricultura Water Management* 241 (1): 106353. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106353>
- Döll P., and J. Zhang. 2010. "Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations." *Hydrology and Earth System Sciences* 14: 783-799. Doi: 10.5194/hess-14-783-2010
- Du, T., L. Xiong, C-Y. Xu, C. J. Gippel, S. Guo, and P. Liu. 2015. "Return period and risk analysis of nonstationary low-flow series under climate change." *Journal of Hydrology* 527: 234-250. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.041>
- 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.
- Ehsanzadeh E., and K. Adamowski. 2007. "Detection of Trends in Low Flows across Canada." *Canadian Water Resources Journal* 32(4): 251-264. doi : <https://doi.org/10.4296/cwrj3204251>
- 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).
- Fortin, J.P., R Moussa, C Bocquillon, et J.P. Villeneuve. 1995. HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Revue des sciences de l'eau*, 8(1) :97-124.
- Fortin, J.-P., R Turcotte, S. Massicotte, R Moussa, J. Fitzback et J.-P Villeneuve. 2001a. Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. 1: Description of model. *Journal of Hydrologic Engineering* 6(2): 91-99.
- Fortin, J.-P., R Turcotte, S. Massicotte, R Moussa, J. Fitzback et J.-P Villeneuve. 2001 b. Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. : Application to Chaudière Watershed. *Journal of Hydrologic Engineering* 6(2): 100-108.
- Fortin, J-P., et A. Royer. 2004. HYDROTEL : Le modèle hydrologique HYDROTEL. Bases théoriques. Guide théorique adressé aux utilisateurs du modèle hydrologique HYDROTEL, INRS-ETE, 104 p.

- Gain, A. K., W. W. Immerzeel, F. C. Sperna Weiland, and M. F. P. Bierkens. 2011. "Impact of climate change on the stream flow of the lower Brahmaputra: trends in high and low flows based on discharge-weighted ensemble modelling." *Hydrology and Earth System Sciences* 15: 1537–1545. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-15-1537-2011>, 2011.
- 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.
- 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.
- Glisacclimate. 2021a. « IPSL-CM5A-LR Model. » <http://www.glisacclimate.org/node/2218> [consulté le 14 juin 2021].
- Glisacclimate. 2021b. « INMCM4 Model. » <http://www.glisacclimate.org/node/2220> [consulté le 14 juin 2021].
- Glisacclimate. 2021c. « CMCC-CESM Model. » <http://www.glisacclimate.org/node/2243> [consulté le 14 juin 2021].
- Gombault C., M. F. Sottile, F. F. Ngwa, C. A. Madramootoo, R. A. Michaud, I. Beaudin, and M. Chikhaoui . 2015. "Modelling climate change impacts on the hydrology of an agricultural watershed in southern Québec." *Canadian Water Resources Journal* 40(1): 71-86. doi: 10.1080/07011784.2014.985509
- 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.
- Gu, R., S. Montgomery, and T. Al Austin. 1998. "Quantifying the effects of stream discharge on summer river temperature." *Hydrological Sciences Journal* 43(6): 885-904. Doi: <https://doi.org/10.1080/02626669809492185>
- Guay C., M. Minville, and M. Braun. 2015. "A global portrait of hydrological changes at the 2050 horizon for the province of Québec." *Canadian Water Resources Journal* 40(3): 285-302. doi:10.1080/07011784.2015.1043583
- Hamilton, RE, Kosakoski GT. 1982. Water requirements for the fisheries resource of the Englishman River, Vancouver Island, B.C. Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences 1676.
- 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>
- Hersh, R. S., and D. R. Maidment. 2006. "Assessment of hydrologic alteration software". The University of Texas at Austin CRWR Online Report 06–11.
- Hewa, G. A., Q. J. Wang, T. A. McMahon, R. J. Nathan, and M. C. Peel. 2007. "Generalized extreme value distribution fitted by LH moments for low-flow frequency analysis." *Water Resources Research* 43(6): W06301. doi: <https://doi.org/10.1029/2006WR004913>
- Horne A.C., R. Nathan, N.L. Poff, N.R. Bond, J.A. Webb, J. Wang, and A. John. 2019. "Modeling Flow-Ecology Responses in the Anthropocene: Challenges for Sustainable Riverine Management." *BioScience* 69(10): 789-799
- Horne A.C., E.L. O'Donnell, and R. E. Tharme. 2017. *Mechanisms to allocate environmental water*. Water for the environment: from policy and science to implementation and management. 361-398 p.
- Hugues, D. A, and F. Münster. 2000. *Hydrological information and techniques to support the determination of the water quantity component of the ecological reserve for rivers*. Report from the project "Integration and Application of Daily Flow Analysis and Simulation Approaches within Southern Africa" (Water Research Commission Project No 867).

- Hugues, D. A. and P. Hannart. 2003. "A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa." *Journal of Hydrology* 270(3-4): 167-181. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00290-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00290-1)
- Hulley M., C. Clarke, and E. Watt. 2014. "Occurrence and magnitude of low flows for Canadian rivers: an ecozone approach." *Canadian Journal of Civil Engineering* 41(1-8). doi: <https://doi.org/10.1139/cjce-2013-0300>
- Jeong, D.I., A. Daigle, A. St-Hilaire. 2013. "Development of a Stochastic Water Temperature Model and Projection of Future Water Temperature And Extreme Events In The Ouelle River Basin In Québec, Canada." *River Research and Applications* 29 (7): 805-821. DOI: 10.1002/rra.2574.
- Joshi, D., and A. St-Hilaire. 2013. *Low flow frequency analysis of three rivers in Eastern Canada*. Rapport soumis à l'Institut National de la Recherche Scientifique: Statistical Hydroclimatology Research Group. Ville de Québec, QC, Canada; 33 p.
- Jowett, I. G. 1997. "Instream flow methods: a comparison of approaches." *Regulated rivers: Research & Management* 13: 115-127.
- Kelly, L., R. M. Kalin, D. Bertram, M. Kanjaye, M. Nkhata, and H. Sibande. 2019. "Quantification of temporal variations in base flow index using sporadic river data: application to the Bua catchment, Malawi." *Water* 11(5) : 901. Doi : <https://doi.org/10.3390/w11050901>
- King, J. M., Brown, C. A., and Sabet, H. (2003). A scenario-based holistic approach for environmental flow assessments. *River Res. Appl.* 19, 619–639. doi: 10.1002/rra.709
- King, J.M., Tharme, R.E., de Villiers, M.S. (Eds.), 2000. Environmental flow assessments for rivers: manual for the Building Block Methodology. Water Research Commission Technology Transfer Report TT131/00, Water Research Commission, Pretoria 340 pp.
- Kite, G. W. 1978. *Frequency and Risk Analysis in Hydrology*. Water Resources Publications: Fort Collins, Colorado, 224 p.
- Ksiazek, L., A. Wos, J. Florek, M. Wyrebek, D. Mlynski, and A. Walega. 2019. "Combined use of the hydraulic and hydrological methods to calculate the environmental flow: Wisloka river, Poland: case study." *Environmental Monitoring and Assessment* 191: 254. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7402-7>
- Kwak, J., A. St-Hilaire, F. Chebana, G. Kim. 2017. "Summer season water temperature modeling under climate change: case study for Fourchue River, Quebec, Canada." *Water*, 9(5): 346 DOI [10.3390/w9050346](https://doi.org/10.3390/w9050346).
- Le Coz, J, F. Larrarte, G. Saysset, G. Pierrefeu, J.F. Brochot, et al. 2009. Mesures hydrologiques par profileur à effet Doppler (aDcp) en France : application aux cours d'eau et aux réseaux urbains. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, EDP Sciences, 2009, p. 115 - p. 122.
- 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. 2013. "Review of approaches and methods to assess Environmental Flows across Canada and internationally." Document 2012/039, DFO Canadian Sciences Advisory Secretary Research.
- LSE (Loi Sur l'Eau). 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>
- Loi sur les pêches (cf. Canadian Fisheries Act. 2020)
- 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>
- Ludwig R., I. May, R. Turcotte, L. Vescovi, M. Braun, J.-F. Cyr, L.-G. Fortin, D. Chaumont, S. Biner, I. Chartier⁴, D. Caya, and W. Mauser. 2009. "The role of hydrological model complexity and uncertainty in climate change impact assessment." *Advances in Geosciences* 21 : 63-71. doi : [10.5194/adgeo-21-63-2009](https://doi.org/10.5194/adgeo-21-63-2009)

- 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.
- Marx A., R. Kumar, S. Thober, O. Rakovec, N. Wanders, M. Zink, E. F. Wood, M. Pan, J. Sheffield, and L. Samaniego. 2018. "Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3°C." *Hydrology and Earth System Sciences* 22: 1017-1032. doi : [10.5194/hess-2017-485](https://doi.org/10.5194/hess-2017-485)
- Mawdsley J., R. O'Malley, and D. S. Ojima. 2009. "A Review of Climate-Change Adaptation Strategies for Wildlife Management and Biodiversity Conservation." *Conservation Biology* 23(5): 1080-1089. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01264.x>
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre le Changement Climatique) 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>
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre le Changement Climatique) 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 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre le Changement Climatique) 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 (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre le Changement Climatique) 2015a. « 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>
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre le Changement Climatique) 2015b. *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.
- MELCC (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre le Changement Climatique) 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 le Changement Climatique) 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>
- Merritt, D. M., Scott, M. L., Poff, N. L., Auble, G. T., and D. A. Lytle. 2010. "Theory, methods and tools for determining environmental flows for riparian vegetation: riparian vegetation-flow response guilds." *Freshwater Biology* 55(1): 206-225. doi:10.1111/j.1365-2427.2009.02206.x
- Meyer J. L., M. J. Sale, P. J. Mulholland, and N. L. Poff. 1999. "Impacts of climate change on aquatic ecosystem functioning and health." *Journal of the American water resources association* 35(6): 1373-1386. doi: [10.1111/j.1752-1688.1999.tb04222.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb04222.x)
- Meylan, P., A. C. Favre, and A. Musy. 2008. *Hydrologie fréquentielle: Une science prédictive*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- 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.
- MFFP (Ministère de la Faune, des Forêts et des Parcs). 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.*

- Milhous R.T., Urdike M.A., and Schneider D.M. 1989. "Physical Habitat Simulation System Référence Manual - Version II." Instream Flow Information Paper No. 26, U.S. Fish & Wildlife Service Biol. Rep. 89(16), 191 p.
- Milhous, R. T. 1999. *History, theory, use, and limitations of the physical habitat simulation system*. Proceedings of the Third International Symposium on Ecohydraulics, Utah State University Extension. Logan, Utah.
- Minville M., S. Krau, F. Brissette, and R. Leconte. 2010. "Behaviour and Performance of a Water Resource System in Québec (Canada) Under Adapted Operating Policies in a Climate Change Context." *Water Resources Management* 24: 1333–1352. doi: 10.1007/s11269-009-9500-8
- 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)
- Mortsch L., H. Hengeveld, M. Lister, L. Wenger, B. Lofgren, F. Quinn, and M. Slivitzky. 2000. "Climate Change Impacts on the Hydrology of the Great Lakes-St. Lawrence System." *Canadian Water Resources Journal* 25(2): 153-179. doi: 10.4296/cwrj2502153
- MPO. 2013. *Framework for assessing the ecological flow requirements to support fisheries in Canada*. Rapport du Secrétariat canadien de consultation scientifique de Pêches et Océans Canada (MPO), Avis. Scientifique 2013/017.
- Mpelasoka F. S., and F. H. S. Chiew. 2009. "Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections" *Journal of Hydrometeorology* 10(5): 1168-1183. doi: <https://doi.org/10.1175/2009JHM1045.1>
- NEMO. 2021. "Nucleus for European Modelling of the Ocean model." <https://cmc.ipsl.fr/international-projects/cmip5/> [consulté le 14 juin 2021]
- Nikitina O. I., V. G. Dubinina, M. V. Bolgov, M. P. Parilov, and T. A. Pariloya. 2020. "Environmental flow releases for wetland biodiversity conservation in the Amur river Basin." *Water* 12 (10): 2812 doi: <https://doi.org/10.3390/w12102812>
- 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).
- Opperman, J.J., E. Kendy, R. E. Tharme, A. T. Warner, E. Barrios and B. D. Richter . 2018. A three-level framework for assessing and implementing environmental flows. *Frontiers in Environmental Science*, 6 (76), 1–13. doi:10.3389/fenvs.2018.00076
- Ouarda, Taha B.M.J., Christian Charron, and André St-Hilaire. 2008. "Statistical Models and the Estimation of Low Flows." *Canadian Water Resources Journal* 33 (2): 195–206. <https://doi.org/10.4296/cwrj3302195>.
- Ouellet, V., St-Hilaire, A., Dugdale, S. J., Hannah, D. M., Krause, S., and S. Proulx-Ouellet. 2020. "River temperature research and practice: Recent challenges and emerging opportunities for managing thermal habitat conditions in stream ecosystems." *Science of the Total Environment* 736: 139679. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139679>
- 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.
- Ouranos (2015). *Sommaire de la synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. Édition 2015. Montréal, Québec : Ouranos, 13p.
- 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).
- Palmer M. A., D. P. Lettenmaier, N. L. Poff, S. L. Postel, B. Richter, and R. Warner. 2009. "Climate Change and River Ecosystems: Protection and Adaptation Options." *Environmental Management* 44:1053–1068. doi: 10.1007/s00267-009-9329-1

- Pastor, A. V., F. Ludwig, H. Biemans, H. Hoff, and P. Kabat. 2014. "Accounting for environmental flow requirements in global water assessments." *Hydrology and Earth System Sciences* 18(12): 5041-5059. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-18-5041-2014>
- 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.
- 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).
- 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., 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.
- Poff, N. L., and J. H. Matthews. 2013. "Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects." *Current opinion in environmental sustainability* 5(6): 667-675. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.006>
- Poff, N. L., R. E. Tharme, and A. Arthington. 2017. *Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies*. Water for the environment: from policy and science to implementation and management. 36 p.
- Poff N. L. 2017. "Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world." *Freshwater Biology* 63(8): 1011-1021. Doi: <https://doi.org/10.1111/fwb.13038>
- Randall, R.G., Bradford, M.J., Clarke, K.D., and Rice, J.C. 2013. A science-based interpretation of ongoing productivity of commercial, recreational or Aboriginal fisheries. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2012/112 iv + 26 p.
- 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)
- Renöfält, B.M., R. Jansson, and C. Nilsson. 2010. "Effects of hydropower generation and opportunities for environmental flow management in Swedish riverine ecosystems." *Freshwater Biology*, 55 (1) (2010), pp. 49-67, [10.1111/j.1365-2427.2009.02241.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2009.02241.x)
- 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., A.T. Warner, J.L. Meyer, and K. Lutz. 2006. "A collaborative and adaptive process for developing environmental flow recommendations." *River Research and Applications* 22(3): 297-318. doi: <https://doi.org/10.1002/rra.892>
- 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., 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, D. P. Braun, and J. Powell. 1998. "A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network." *Regulated Rivers: Research and Management* 14(4): 329-340. doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(199807/08\)14:4<329::AID-](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(199807/08)14:4<329::AID-)

- RRR505>3.0.CO;2-E Richter, B.D., Baumgartner J.V., Wigington R., Braun D.P. 1997. How much water does a river need? *Freshwater Biology* 37: 231-249.
- 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).
- Roy L., R. Leconte, F. P. Brissette, and C. Marche. 2001. "The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec river basin." *Hydrological Processes* 15(16): 3167-3179. doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.323>
- Rousseau, A. N., J. P. Fortin, R. Turcotte, A. Royer, S. Savary, F. Quévy, P. Noël, and C. Paniconi (2011), PHYSITEL, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models, *Water News, Official Magazine of CWRA – Canadian Water Resources Association*, 31(1), 18-20.
- Schwarz, G. (1978) Estimating the Dimension of a Model. *Annals of Statistics*, 6, 461-464. <http://dx.doi.org/10.1214/aos/1176344136>
- 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.
- Sharma, U., and V. Dutta. 2020. « Establishing environmental flows for intermittent tropical rivers: Why hydrological methods are not adequate?" *International Journal of Environmental Science and Technology* 17: 2949-2966. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02680-6>
- Shrestha S, S. Sharma, R. Gupta, and R. Bhattarai. 2019. "Impact of global climate change on stream low flows: A case study of the great Miami river watershed, Ohio, USA." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 12(1): 84–95.
- 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).
- Smakhtin, V., C. Revenga, and P. Döll. 2004. "A pilot global assessment of environmental water requirements and scarcity." *Water International* 29(3): 307-317. Doi: <https://doi.org/10.1080/02508060408691785>
- Smakhtin, V. U., Shilpakar, R. L., and D. A. Hughes. 2006. "Hydrology-based assessment of environmental flows: An example from Nepal." *Hydrological Science Journal* 51: 207–222, doi:10.1623/hysj.51.2.207
- 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.
- Sokal, R.R., and P.H. Sneath. 1963. "Principles of numerical taxonomy". San Francisco: W. H. Freeman, *Journal of Mammalogy* 46(1): 111–112. doi: <https://doi.org/10.2307/1377831>
- Sood, A.; Smakhtin, V.; Eriyagama, N.; Villholth, K. G.; Liyanage, N.; Wada, Y.; Ebrahim, G.; and Dickens, C. 2017. *Global environmental flow information for the sustainable development goals*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). 37p. (IWMI Research Report 168). doi: 10.5337/2017.201
- St-Hilaire, A., D. Caissie, TBMJ Ouarda, N.B. Bergeron, C. Boyer. 2021. "Climate change and extreme river temperature." Dans A. Fari, [ed.] *Climate change and extreme Events*: 25-37. Elsevier. doi.org/10.1016/B978-0-12-822700-8.00011-1
- St-Hilaire, A.; Ferchichi, H.; Berthot, L.; Caissie, D. 2021. "The Fate of Stationary Tools for Environmental Flow Determination in a Context of Climate Change." *Water* (13): 2103. Doi: <https://doi.org/10.3390/w13091203>
- 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).
- Tessmann, S. 1980. *Environmental assessment, technical appendix e in environmental use sector reconnaissance elements of the western Dakotas region of South Dakota study*. South

- Dakota state university, Water Resources Institute, South Dakota State University, Brookings, South Dakota.
- 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).
- UN-SDG (United Nations, Sustainable Development Goals). 2016. United Nations, Sustainable Development Goals, <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>, (accessed 23.04.2021).
- 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: Chairperson, Publications Board.
- The Nature Conservancy, 2018. Indicators of Hydrologic Alteration: Software for Understanding Hydrologic Changes in Ecologically-Relevant Terms. *Last consultation in June 2021*: <https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/IHA-Software-Download.aspx>
- Velazquez J. A., J. Schmid, S. Ricard, M. J. Muerth, B. Gauvin St-Denis, M. Minville, D. Chaumont, D. Caya¹, R. Ludwig, and R. Turcotte. 2013. "An ensemble approach to assess hydrological models' contribution to uncertainties in the analysis of climate change impact on water resources." *Hydrology and Earth System Sciences* 17(2): 565–578. doi: 10.5194/hess-17-565-2013
- Vescovi, L., P. Baril, C. Desjarlais, R. Roy, and A. Musy. 2009. *Eau et changement climatique au Québec*. Contribution au troisième rapport sur l'Eau in UN World Water Assessment Programme, 2009, Water in a Changing World: United Nations World Water Development Report 3, UNESCO, Paris. 2009.
- Virkki, V., E. Alanärä, M. Porkka, L. Ahopelto, T. Gleeson, C. Mohan, L. Wang-Erlandsson, M. Flörke, D. Gerten, S. N. Gosling, N. Hanasaki, H. Müller Schmied, and M. Kummu. 2021. "Environmental flow envelopes: quantifying global, ecosystem-threatening streamflow alterations." *Hydrology and Earth System Sciences*. doi: <https://doi.org/10.5194/hess-2021-260>
- Volodin, E. M., N. A. Dianskii, and A. V. Gusev. 2010. "Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations." *Atmospheric and Oceanic Physics* 46: 414-431.
- Welcomme, R. L., Winemiller, K. O., and I. G. Cowx. 2006. "Fish environmental guilds as a tool for assessment of ecological condition of rivers." *River Research and Applications* 22(3): 377-396. doi: [10.1002/rra.914](https://doi.org/10.1002/rra.914)
- Whitehead P. G., R. L. Wilby, R. W. Battarbee, M. Kernan, and A. J. Wade. 2009. "A review of the potential impacts of climate change on surface water quality." *Hydrological Sciences Journal* 54(1): 101-123. doi: 10.1623/hysj.54.1.101
- Xiong, B, L. Xiong, J. Chen, C-Y. Xu, and L. Li. 2018. "Multiple causes of nonstationarity in the Weihe annual low-flow series." *Hydrology and Earth System Sciences* 22(2): 1525-1542. Doi: <https://doi.org/10.5194/hess-22-1525-2018>
- Yarnell, S.M., G. E. Petts, J. C. Schmidt, A. A. Whipple, E. E. Beller, C. N. Dahm, P. Goodwin, and J H. Viers. 2015. "Functional flows in modified riverscapes: hydrographs, habitats and opportunities." *BioScience*, 65 (10): 963–972. doi:10.1093/biosci/biv102
- 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
- Zhang, Y., A.H. Arthington, S.E. Bunn, S. Mackay, J. Xia, and M. Kennard. 2012. "Classification of flow regimes for environmental flow assessment in regulated river: the Huai River Basin, China" *River and Research. Application* 28 (7) 989-1005

ANNEXE I

Liste des 71 indices hydrologiques d'étiage utilisés dans l'analyse à composantes principales

Tableau-A I Indices hydrologiques d'étiage (traduit de Daigle et al. 2011)

| AMPLITUDE | |
|-----------|---|
| A1 | Moyenne du débit journalier moyen ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A2 | Médiane du débit journalier moyen ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A3 | Moyenne des débits minimums de Janvier ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A4 | Moyenne des débits minimums de Février ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A5 | Moyenne des débits minimums de Mars ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A6 | Moyenne des débits minimums d'Avril ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A7 | Moyenne des débits minimums de Mai ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A8 | Moyenne des débits minimums de Juin ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A9 | Moyenne des débits minimums de Juillet ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A10 | Moyenne des débits minimums d'Août ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A11 | Moyenne des débits minimums de Septembre ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A12 | Moyenne des débits minimums d'Octobre ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A13 | Moyenne des débits minimums de Novembre ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A14 | Moyenne des débits minimums de Décembre ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A15 | Moyenne des rapports des débits annuels minimaux au débit médian par an (sans unité) |
| A16 | Moyenne des rapports des débits annuels minimaux au débit moyen par an (sans unité) |
| A17 | Médiane des rapports des débits annuels minimaux au débit médian par an (sans unité) |
| A18 | Calculer le minimum de la moyenne mobile du débit sur une période de 7 jours par an et les diviser par le débit annuel moyen de la même année. ML17 est la moyenne de ces rapports (sans unité). |
| A19 | Moyenne des rapports des débits annuels minimum et moyen par an (sans unité) |
| A20 | Diviser la série de débits journaliers en 5 blocs après avoir supprimé les valeurs nulles : trouver les débits minimums de chaque bloc : considérer ces valeurs comme débits de base pour chaque bloc si 90% de ces minimums sont inférieurs aux débits minimums des blocs de chaque côté ; sinon les compter nulles : remplir les valeurs nulles par interpolation linéaire : calculer le débit total pour toute la période de mesure et le débit total de base pour toute la période de mesure : ML20 correspond au rapport du débit total de base et du débit total (sans unité) |
| A21 | Total de jour à débit nul divisé par le total d'années de mesures (jour/an) |
| A22 | Moyenne des débits mensuels minimum par an ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A23 | Le plus bas débit mensuel annuel divisé par le débit annuel moyen (sans unité) |

| | |
|------------------|---|
| A24 | Moyenne annuelle du débit spécifique ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A25 | Moyenne des minimums annuels du débit journalier ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A26 | Minimum des débits journaliers sur une période de 2 ans ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A27 | Minimum des débits journaliers sur une période de 5 ans ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| A28 | Minimum des débits journaliers sur une période de 10 ans ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| DUREE | |
| D1 | Minimum de la moyenne mobile pour 1 jour ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D2 | Minimum de la moyenne mobile pour 3 jours ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D3 | Minimum de la moyenne mobile pour 7 jours ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D4 | Minimum de la moyenne mobile pour 30 jours ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D5 | Minimum de la moyenne mobile pour 90 jours ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D6 | Moyenne du minimum de la moyenne mobile pour 1 jour par an ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D7 | Moyenne du minimum de la moyenne mobile pour 3 jours par an ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D8 | Moyenne du minimum de la moyenne mobile pour 7 jours par an ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D9 | Moyenne du minimum de la moyenne mobile pour 30 jours par an ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D10 | Moyenne du minimum de la moyenne mobile pour 90 jours par an ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| D11 | Moyenne des débits minimaux annuels d'un jour divisés par la médiane (sans unité) |
| D12 | Moyenne des débits minimaux annuels de 7 divisés par la médiane (sans unité) |
| D13 | Minimum annuel de la moyenne mobile de 30 jours des débits divisés par la médiane des débits. Calculer le minimum de la moyenne mobile de 30 jours pour chaque année : DL13 est la moyenne de ces valeurs divisées par la médiane de tous les débits (sans unité) |
| D14 | 75% de la valeur de dépassement divisée par la médiane (sans unité) |
| D15 | 90% de la valeur de dépassement divisée par la médiane (sans unité) |
| D16 | Minimum de la moyenne mobile pour 3 jours divisé par la médiane (sans unité) |
| D17 | Minimum de la moyenne mobile pour 7 jours divisé par la médiane (sans unité) |
| D18 | Minimum de la moyenne mobile pour 30 jours divisé par la médiane (sans unité) |
| D19 | Minimum de la moyenne mobile pour 90 jours divisé par la médiane (sans unité) |
| D20 | Médiane des durées moyennes annuelles pour les débits de crue inférieurs à un seuil égal au 25 ^e percentile (jours) |
| D21 | Débit dépassé 90% du temps ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$) |
| FREQUENCE | |
| F1 | Nombre moyen des débits de crue inférieur à un seuil égal au 25 ^e percentile (jours) |
| F2 | Nombre moyen de débits de crue avec des débits inférieurs à un seuil égal à 5% de la valeur de débit moyenne (sans unité) |

| TIMING / DATE | |
|----------------------|---|
| T1 | Moyenne du jour julien du minimum annuel (jour julien) |
| T2 | Diviser les années en périodes de deux mois (Oct.-Nov., Déc.-Jan....) : Compter le nombre de périodes d'étiage (débit de crue dont le flot \leq du seuil des 5 ans du débit d'étiage) pour chaque période pour toute la série de données : TL3 est le nombre maximum de périodes d'étiage donné divisé par le total de périodes d'étiage (sans unité) |
| T3 | Jour julien moyen des sept jours de débits minimums (jour julien) |
| VARIABILITE | |
| V1 | Moyenne des coefficients de variation des débits journaliers pour chaque année (sans unité) |
| V2 | Coefficient de variation des valeurs minimales de débit mensuel (sans unité) |
| V3 | Écart-type des rapports des minimums de moyenne mobile de 7 jours du débit par le débit annuel moyen par an (sans unité) |
| V4 | Coefficient de variation des débits mensuels minimums annuels (sans unité) |
| V5 | Coefficient de variation des débits mensuels minimums annuels calculé pour la période de juillet à septembre (sans unité) |
| V6 | Coefficient de variation du débit minimum annuel pour 1 jour (sans unité) |
| V7 | Coefficient de variation du débit minimum annuel pour 3 jours (sans unité) |
| V8 | Coefficient de variation du débit minimum annuel pour 7 jours (sans unité) |
| V9 | Coefficient de variation du débit minimum annuel pour 30 jours (sans unité) |
| V10 | Coefficient de variation du débit minimum annuel pour 90 jours (sans unité) |
| V11 | Coefficient de variation des durées des débits de crue inférieurs d'un seuil égal au 25 ^e percentile (sans unité) |
| V12 | Coefficient de variation de FL1 (sans unité) |
| V13 | Coefficient de variation du jour julien des minimums annuels (sans unité) |
| V14 | Écart-type du jour julien des sept jours débits minimums (jours) |
| V15 | Coefficient de variation du jour julien des sept jours minimums (sans unité) |

ANNEXE II

Les 32 Indicateurs Hydrologiques d'Altération

Tableau-A II Indicateurs Hydrologiques d'Altération pour la méthode RVA (simplifié et traduit de Richter et al. 1998)

| Caractéristiques du régime hydrologique | Indices hydrologiques | Exemples d'influence sur les écosystèmes |
|---|--|---|
| Amplitude, temporalité | M1 à M12 : Moyennes mensuelles interannuelles | <p>Disponibilité :</p> <ul style="list-style-type: none"> - des habitats pour les organismes aquatiques - des sols humides pour les plantes - en eau pour les animaux terrestres - de nourriture / couverture pour les mammifères à fourrure <p>Fiabilité de l'approvisionnement en eau pour les animaux terrestres. Accès des prédateurs aux sites de nidification Influence sur la température de l'eau, les niveaux d'oxygène, et la photosynthèse dans la colonne d'eau</p> |
| Amplitude, durée | M13 : Moyenne des maximums journaliers annuels | Équilibre entre un organisme compétitif, rudéral et tolérant au stress Création de sites pour la colonisation des plantes |
| | M14 : Moyenne des minimums journaliers annuels | Structuration des écosystèmes aquatiques par des facteurs abiotiques vs. facteurs biotiques |
| | M15 : Moyenne des maximums annuels de 3 jours | Structuration de la morphologie des chenaux fluviaux et des conditions physiques de l'habitat |
| | M16 : Moyenne des minimums annuels de 3 jours | Stress hydrique du sol chez les plantes Déshydratation chez les animaux |
| | M17 : Moyenne des maximums annuels de 7 jours | Stress anaérobique chez les plantes Volume des échanges de nutriments entre les rivières et les plaines inondables |
| | M18 : Moyenne des minimums annuels de 7 jours | Durée des conditions stressantes telles que la faible teneur en oxygène et les concentrations d'éléments chimiques en milieu aquatique |
| | M19 : Moyenne des maximums annuels de 30 jours | Répartition des communautés végétales dans les lacs, les étangs et les plaines inondables |
| | M20 : Moyenne des minimums annuels de 30 jours | Durée des débits de crue pour éliminer des déchets, aérer les frayères dans les sédiments des chenaux |

| | | |
|-----------------------------|--|--|
| | M21 : Moyenne des maximums annuels de 90 jours | |
| | M22 : Moyenne des minimums annuels de 90 jours | |
| Temporalité | M23 : Jour julien du débit maximum journalier annuel | Compatibilité avec les cycles de vie des organismes Prévisibilité / évitement du stress pour les organismes Accès à des habitats spéciaux lors de la reproduction ou pour éviter la prédation |
| | M24 : Jour julien du débit minimum journalier annuel | Indices de frai des poissons migrateurs Evolution des stratégies vitales, mécanismes comportementaux |
| Amplitude, fréquence, durée | M25 : Nombre d'évènements de crue par an | Fréquence et ampleur du stress hydrique du sol pour les plantes, fréquence et durée du stress anaérobie pour les plantes |
| | M26 : Nombre de période d'étiage par an | Disponibilité des habitats de plaine inondable pour les organismes aquatiques Échanges de nutriments et de matière organique entre le fleuve et la plaine inondable |
| | M27 : Durée moyenne des évènements de crue par an | Disponibilité des minéraux du sol |
| | M28 : Durée moyenne des périodes d'étiage par an | Accès des oiseaux d'eau aux sites d'alimentation, de repos et de reproduction Influence sur le charriage dans les lits d'eau, la texture des sédiments du chenal et la durée de perturbation du substrat (impulsions élevées) |
| Fréquence, variabilité | M29 : Moyenne des différences positives des débits journaliers | Sécheresse sur les plantes (niveaux en baisse) |
| | M30 : Moyenne des différences négatives des débits journaliers | Isolation des organismes sur les îles et les plaines inondables (niveaux croissants) |
| | M31 : Nombre de fois où le débit augmente | Contrainte causée par la dessiccation sur des organismes lotiques à faibles mobilité (zone <i>variable</i>) |
| | M32 : Nombre de fois où le débit diminue | |

ANNEXE III

Les lois de distribution comparées pour le calcul des métriques 7Q2 et 7Q10

Loi des valeurs extrêmes généralisées (GEV) :

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 - \frac{k}{\alpha} (x - u) \right]^{1/k} \right\} \quad (A III.1)$$

Loi Gumbel :

$$F(x) = \exp \left\{ - \exp \left[- \frac{x - u}{\alpha} \right] \right\} \quad (A III.2)$$

Loi de Weibull à 2 paramètres :

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x}{\alpha} \right)^c \right\} \quad (A III.3)$$

Loi Gamma :

$$F(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} \exp^{-\alpha x} \quad (A III.4)$$

Avec :

$F(x)$: fonction de densité de probabilité des lois de distribution

$\Gamma(\lambda)$: fonction gamma

α : paramètre d'échelle

u : paramètre de position

k, c, λ : paramètres de forme.

ANNEXE IV

Matériel utilisé et mesures de jaugeage réalisées durant l'été 2018

Tableau-A IV Instruments de mesure utilisés pour faire le jaugeage

| Méthode | Profondeur | Description | Calcul du débit |
|--|--|--|---|
| Vélocimètre | Pour les profondeurs inférieures à 1,5 m : rivières Ouelle et Des-Eaux-Volées | Cette méthode se décompose en trois parties : <ul style="list-style-type: none"> - Dérouler un mètre à mesurer sur toute la largeur du cours d'eau pour faire 20 points de mesure à égales distances l'une de l'autre; - Utiliser une règle rigide pour mesurer la profondeur à chaque point de mesure; - Mesurer la vitesse de l'eau au point de mesure à l'aide du capteur du vélocimètre placé à 40% de la base de la profondeur précédemment mesurée. La vitesse est moyennée pour une période de 30 secondes. | $Q = V * A$ <u>Avec :</u> Q : Débit (m^3s^{-1}) V : Vitesse moyenne (m/s) A : Aire (m^2) Total : somme des débits de chaque point de mesure |
| Profileur de vitesse acoustique de type StreamPro ADCP® | Dans les cours d'eau ayant entre 1,5 et 5 m de profondeur moyenne : rivières Beauvillage, Bécancour et Bras-du-Nord. | Une corde est tendue entre les deux rives de la section de mesure. Trois autres cordes sont installées pour pouvoir déplacer l'instrument de mesure d'un bord à l'autre de la section (entre 10 et 20 allers-retours). Un capteur bleu situé au bout de l'appareil est plongé dans l'eau, côté amont, d'environ 3 à 5 cm, émet les ultrasons et envoi les réponses, traduites en vitesse, par Bluetooth à un capteur branché à un ordinateur. Il est possible de régler la puissance du signal et de suivre en direct la prise de mesure avec le logiciel WinRiverII®. | L'ADCP fonctionne avec un effet Doppler pulsé. Le principe est d'analyser le décalage fréquentiel de l'écho d'ultrasons émis dans l'eau, rétrodiffusés par les particules en suspension. Le débit est l'intégration des vitesses mesurées (Le Coz et al. 2009). |

Tableau-B IV Stations hydrométriques des rivières sélectionnées. Q : débit

| Date de la mesure de jaugeage | Q du DEHQ (m^3s^{-1}) | Q mesuré (m^3s^{-1}) | Largeur (m) | Profondeur (m) | Section mouillée (m^2) | Vitesse Courant (m/s) |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|----------------|----------------------------|-----------------------|
| Bras-du-Nord (050409) | | | | | | |
| 03/07/2018 | 15.63 | 16.26 | 24.82 | 2.06 | 51.25 | 0.34 |
| 18/07/2018 | 7.36 | 7.29 | 24.89 | 1.96 | 48.68 | 0.16 |
| 31/07/2018 | 10.27 | 10.29 | 25.29 | 1.88 | 47.63 | 0.24 |
| 07/08/2018 | 13.49 | 13.18 | 25.25 | 2.12 | 53.63 | 0.26 |
| 16/08/2018 | 6.16 | 6.02 | 24.26 | 1.83 | 44.39 | 0.15 |

| Des Eaux-Volées (051003) | | | | | | |
|---------------------------------|-------|------|-------|------|-------|------|
| 03/07/18 | 0.22 | 0.26 | 3.45 | 0.44 | 1.50 | 0.18 |
| 19/07/18 | 0.12 | 0.13 | 5.6 | 0.27 | 1.51 | 0.09 |
| 31/07/18 | 0.13 | 0.09 | 5.7 | 0.18 | 1.03 | 0.09 |
| 07/08/18 | 0.19 | 0.14 | 5.7 | 0.20 | 1.14 | 0.12 |
| Bécancour (024003) | | | | | | |
| 05/07/18 | 4 | 5.24 | 22.35 | 1.02 | 22.85 | 0.25 |
| 17/07/18 | 3.28 | 3.65 | 21.89 | 0.87 | 19.11 | 0.21 |
| 08/08/18 | 3.909 | 4.80 | 21.27 | 1.01 | 21.45 | 0.25 |
| 27/08/18 | 2.29 | 2.79 | 21.74 | 0.92 | 19.98 | 0.15 |
| Beaurivage (023401) | | | | | | |
| 05/07/18 | 2.94 | 2.74 | 33.55 | 1.78 | 59.8 | 0.05 |
| 18/07/18 | 1.53 | 1.59 | 34.21 | 1.63 | 55.73 | 0.03 |
| 08/08/18 | 1.46 | 1.9 | 34.39 | 1.78 | 61.21 | 0.03 |
| 16/08/18 | 0.89 | 1.08 | 33.66 | 1.65 | 55.42 | 0.02 |
| 27/08/18 | 0.75 | 0.60 | 33.93 | 1.66 | 56.36 | 0.02 |
| Ouelle (022704) | | | | | | |
| 06/07/18 | 1.02 | 0.82 | 16.65 | 0.48 | 7.97 | 0.10 |
| 19/07/18 | 0.65 | 0.51 | 15 | 0.42 | 6.30 | 0.08 |
| 07/08/18 | 2.29 | 3.13 | 16 | 0.59 | 9.44 | 0.33 |

ANNEXE V

La gestion des débits d'étiage au Québec

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 2015a). L'estimation du débit d'étiage répond à trois besoins (MELCC 2015a): (1) évaluer les débits pouvant être prélevés dans les cours d'eau ; (2) maintenir un débit minimal dans les cours d'eau et (3) estimer les concentrations et les charges de contaminants déversées dans les cours d'eau tout en protégeant le milieu aquatique et n'affectant pas les autres usages liés à l'eau. La gestion des débits d'étiage concerne *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 2015a). Dans sa politique de prélèvement de l'eau, le Québec indique qu'il faut calculer les débits d'étiage en tenant compte des conditions naturelles du cours d'eau, des impacts cumulatifs des prélèvements et demande des études complémentaires pour justifier des prélèvements qui dépasseraient les normes préétablies.

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 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, les ressources en eau 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 Loi sur la Qualité de l'Environnement (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) impose de déclarer les prélèvements d'eau (12 août 2009), de payer une redevance pour utiliser l'eau (1 décembre 2010), et d'encadrer les projets de transport d'eau hors du bassin versant du fleuve Saint-Laurent (22 juin 2011).

Dans la dernière version de l'art.31.76 (2017) de la LQE (2009) trois principes sont à considérer pour octroyer une 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. Ainsi, l'art.31.76 recommande de concilier les besoins en eau (1) de la population (santé, assainissement, sécurité civile et eau potable) ; (2) des écosystèmes aquatiques (protection) ; et (3) des activités humaines (énergie, agriculture, industries, loisirs et tourisme). Aussi, l'art.31.76 prévoit de tenir compte des conséquences des prélèvements en lien avec (1) les droits d'usage; (2) la disponibilité et la répartition des ressources en eau ; (3) l'évolution des milieux urbains et ruraux et ; (4) le développement économique d'une région ou d'une municipalité. 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 2015b), 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 sept 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 présente deux façons de calculer un débit d'étiage (MELCC 2015a). La première 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, autrement dit des méthodes de débits classés. La seconde façon consiste à estimer un débit d'étiage pour une période donnée (année, saison, mois, période particulière) ainsi que sa probabilité d'occurrence (MELCC 2015a), soit des méthodes à base d'analyse fréquentielle. La DEHQ utilise des méthodes à base d'analyse fréquentielle (MELCC 2018) :

- 7Q2 : débit d'étiage de récurrence de deux ans sur sept jours consécutifs;
- 7Q10 : débit d'étiage de récurrence de dix ans sur sept jours consécutifs;
- 30Q5 : débit d'étiage de récurrence de cinq ans sur 30 jours consécutifs;

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 tenir compte de la météorologie changeant selon la latitude au Québec, D'après Belzile et al. (1997), l'usage 7Q2 provient d'une étude québécoise interne au MELCC (Beaudelin et Bérubé 1994), non disponible au public. La méthode du 7Q10 vient d'une étude américaine (Reiser et al. 1989). Au Québec, la métrique 7Q2 est utilisée pour la gestion des prélèvements et du partage de l'eau pendant les périodes d'étiage (MELCC 2015b). Les métriques 7Q10 et 30Q5 sont utilisées pour répondre aux objectifs environnementaux de rejets (MELCC 2007). A noter que 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 2018).

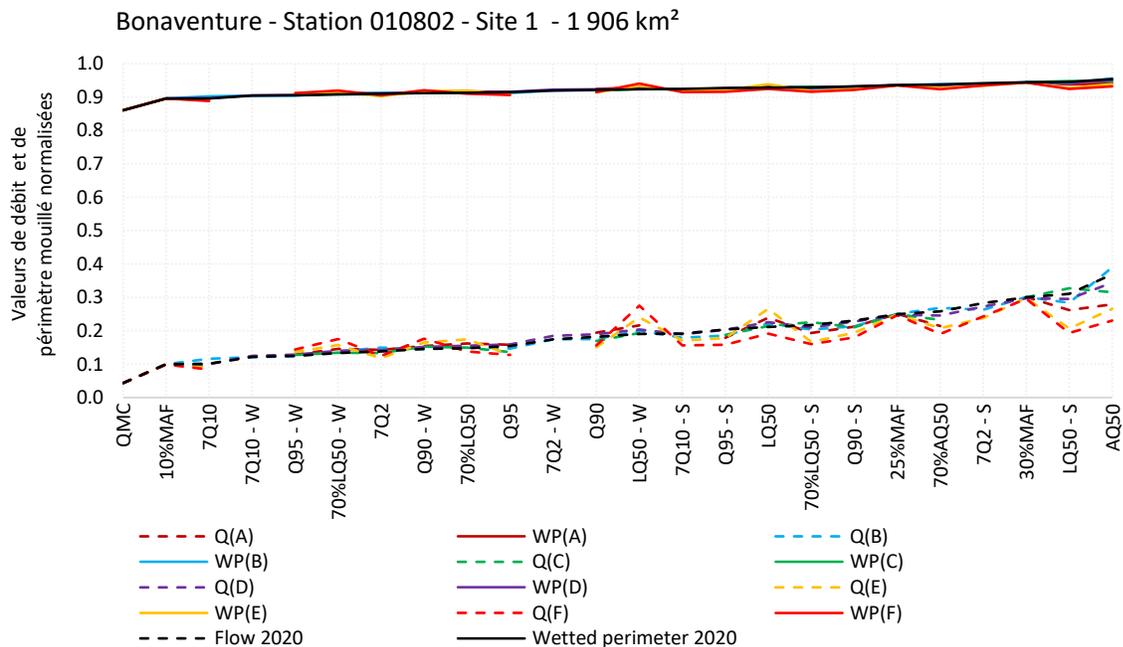
ANNEXE VI

Méthodes hydrologiques, périmètre mouillé et changements climatiques

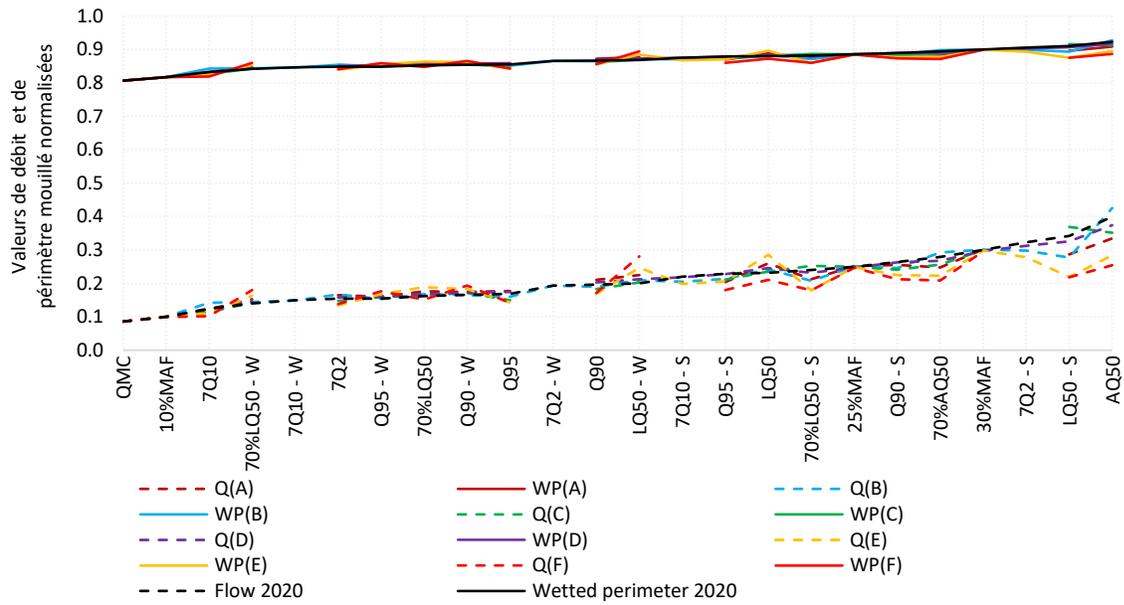
Les graphiques suivants présentent l'évolution des débits (Q) et des périmètres mouillés (WP) de 43 tronçons de rivière, pour 20 métriques, trois seuils de débits (10%MAF, 25%MAF, 30%MAF), un seuil de périmètre mouillé (QMC) et six scénarios de changement climatique. Seules les rivières Sainte-Marguerite Nord-Est (R06), Harricana (R08) et Pontax (R08) n'ont pas de valeurs de débits simulés associées. Le sous-titre de chaque graphe donne le nom de la rivière, les numéros de la station hydrométrique et du site de mesure de jaugeage et la taille du bassin versant.

A la fin, les tableaux des valeurs standardisées de débit (%MAF) et des périmètres mouillés associés (%WPS), issues des observations du MELCC sont donnés.

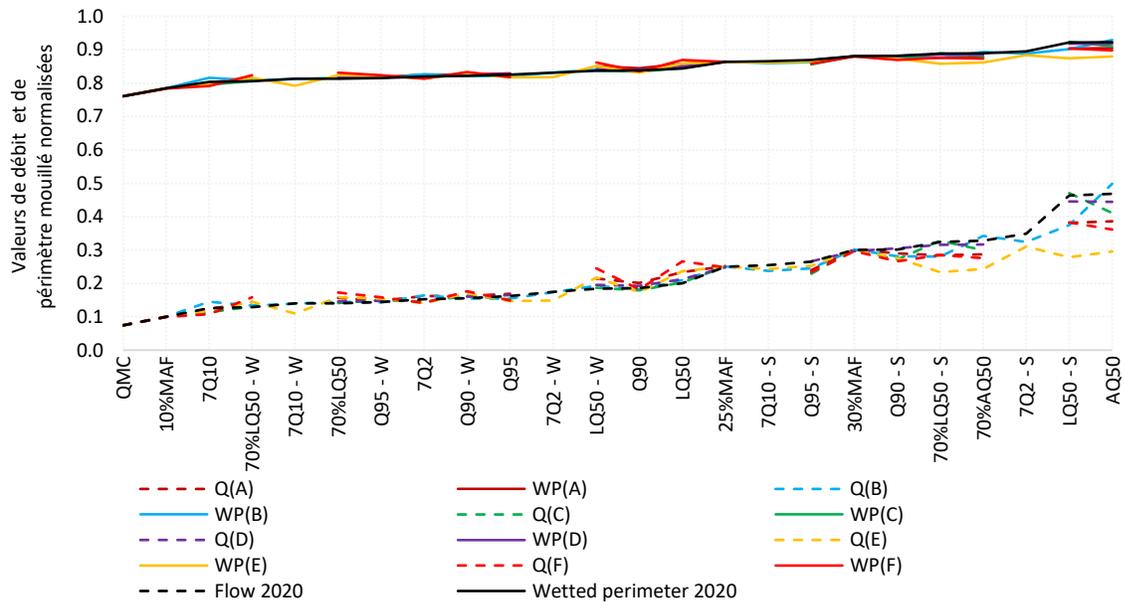
Région hydrographique 01 : Baie des chaleurs et Percé



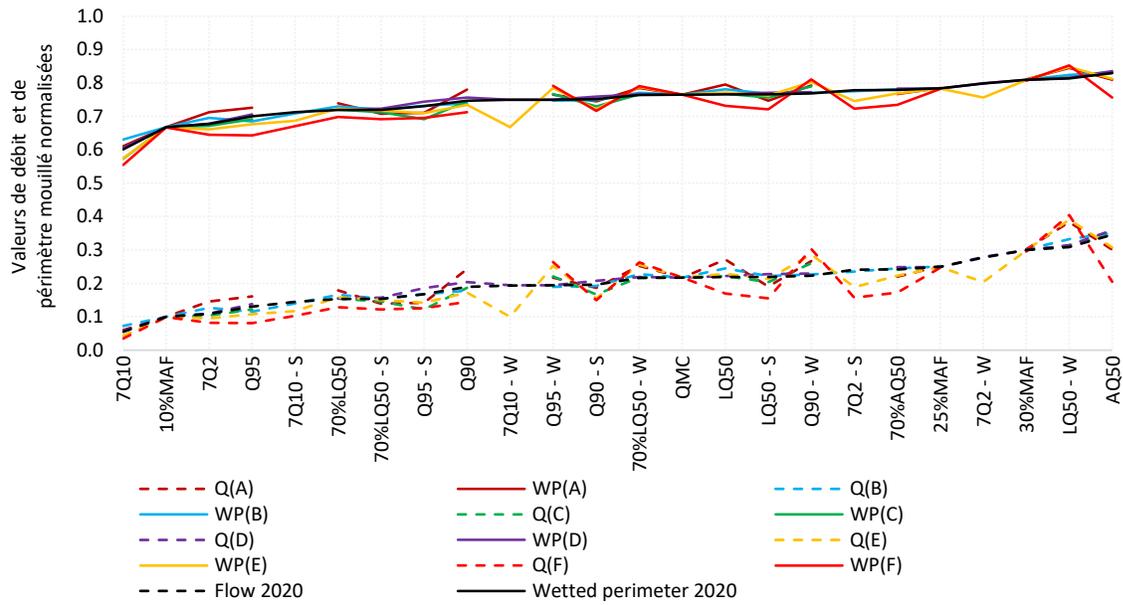
Petite rivière Cascapédia - Station 010902 - Site 5 - 1 340 km²



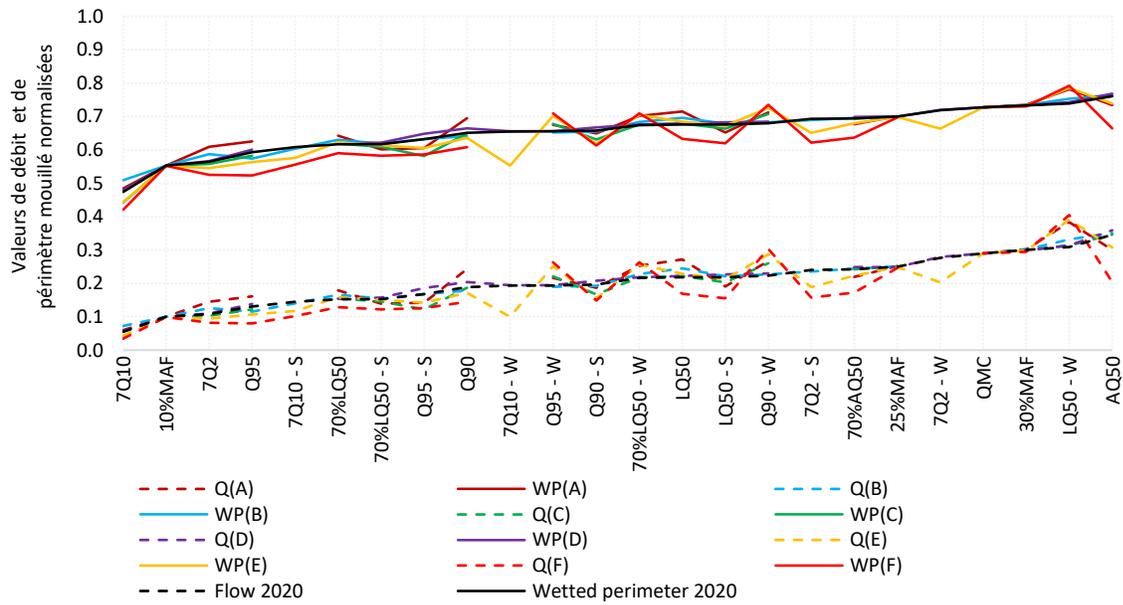
Cascapédia - Station 011003 - Site 9 - 1 689 km²



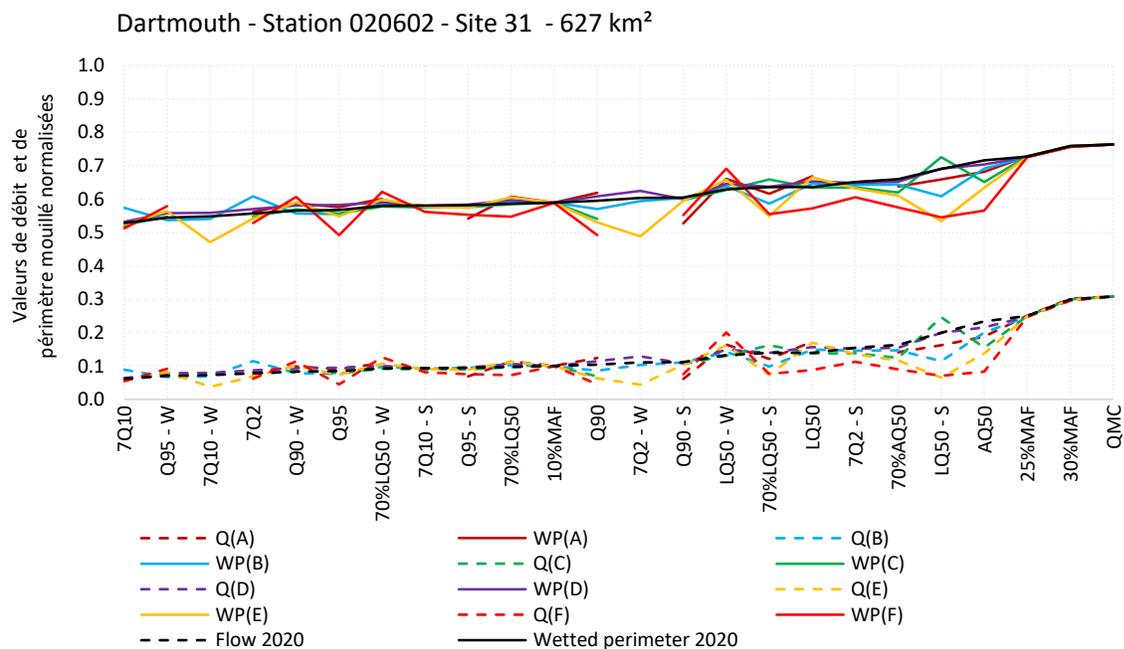
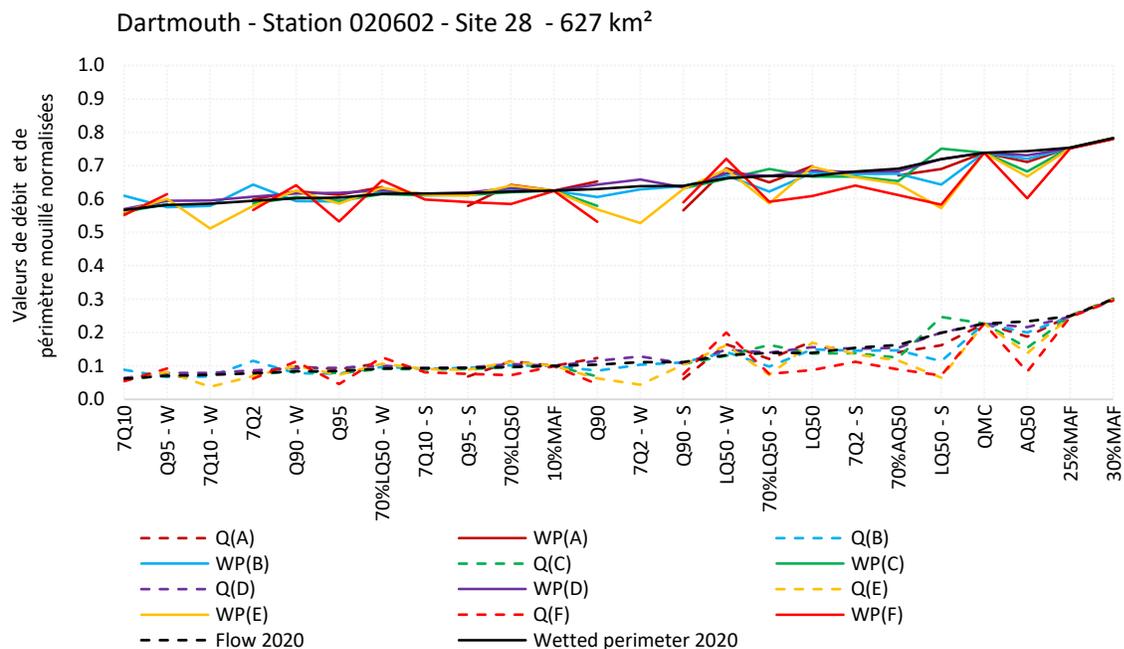
Décharge du lac Matapédia - Station 011508 - Site 16 - 555 km²



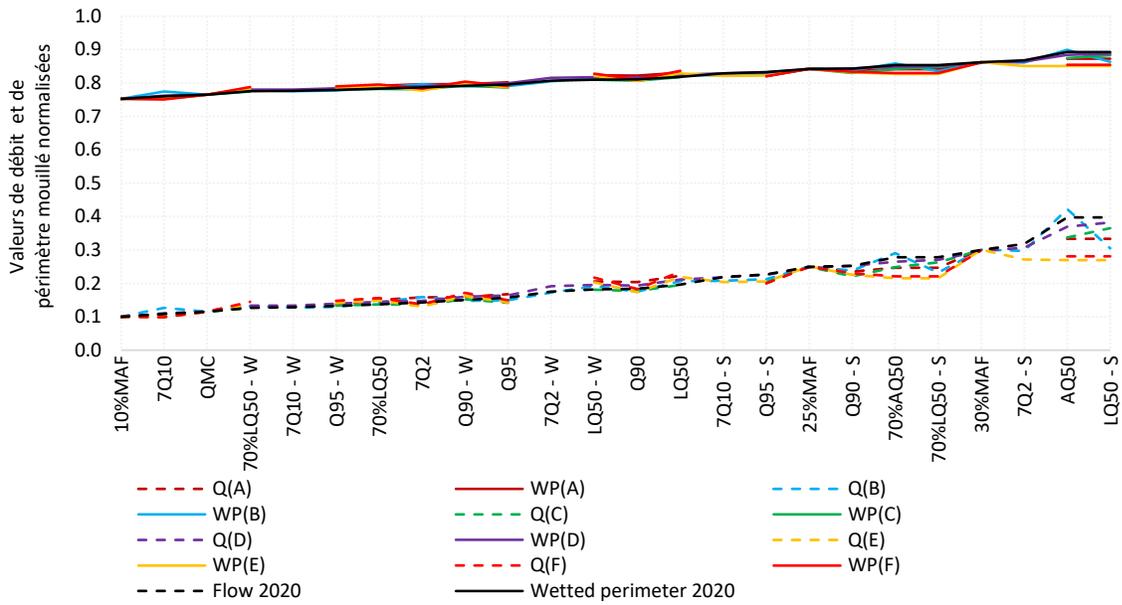
Décharge du lac Matapédia - Station 011508 - Site 17 - 555 km²



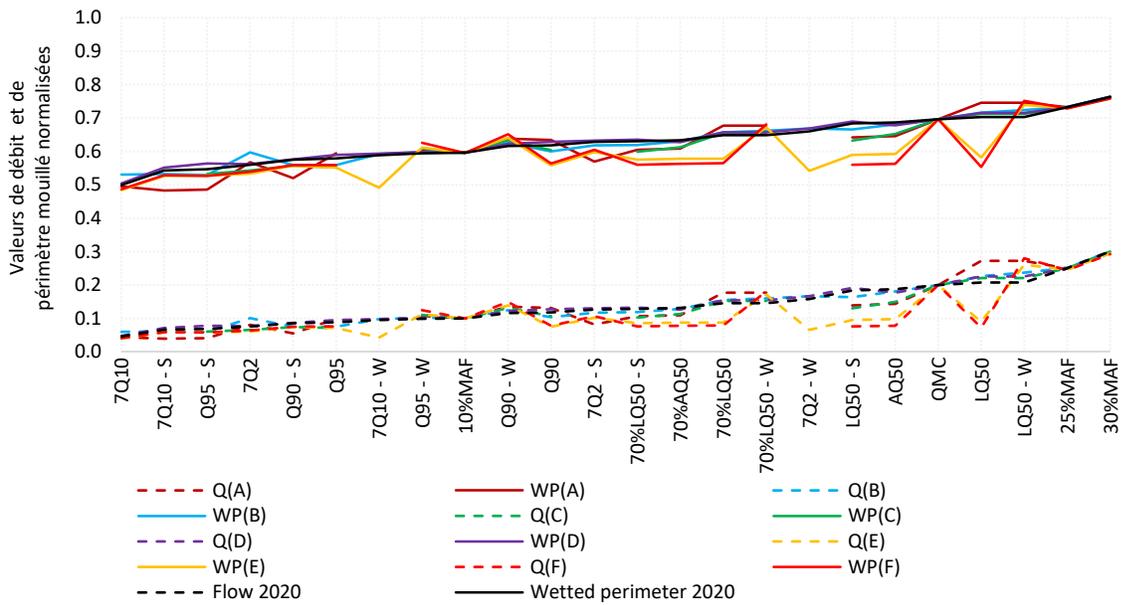
Région hydrographique 02 : Saint-Laurent sud-est



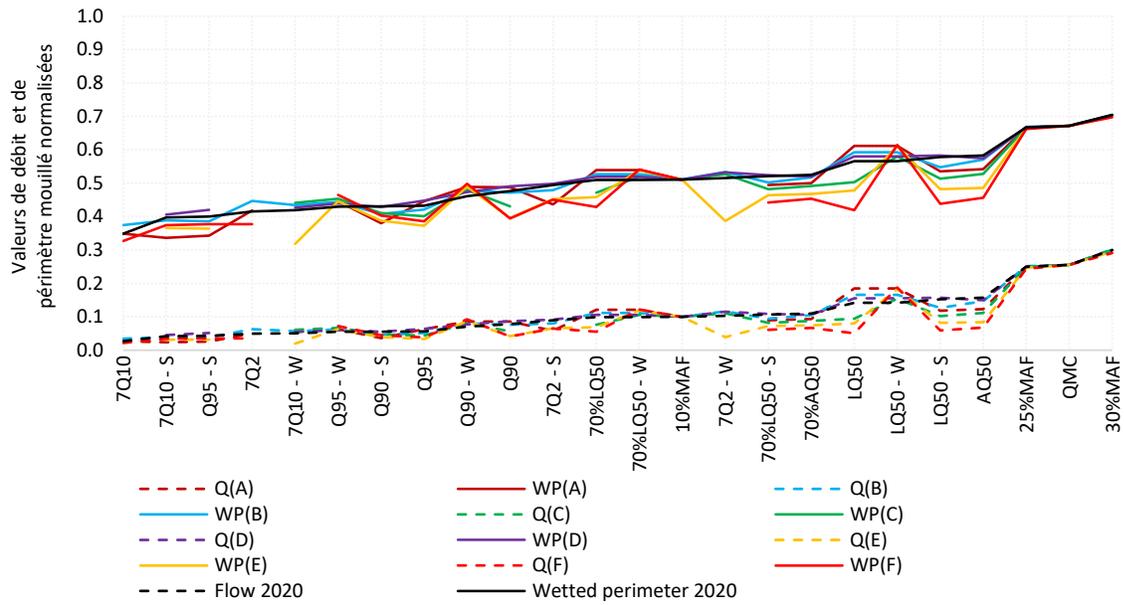
Sainte-Anne - Station 021407 - Site 33 - 772 km²



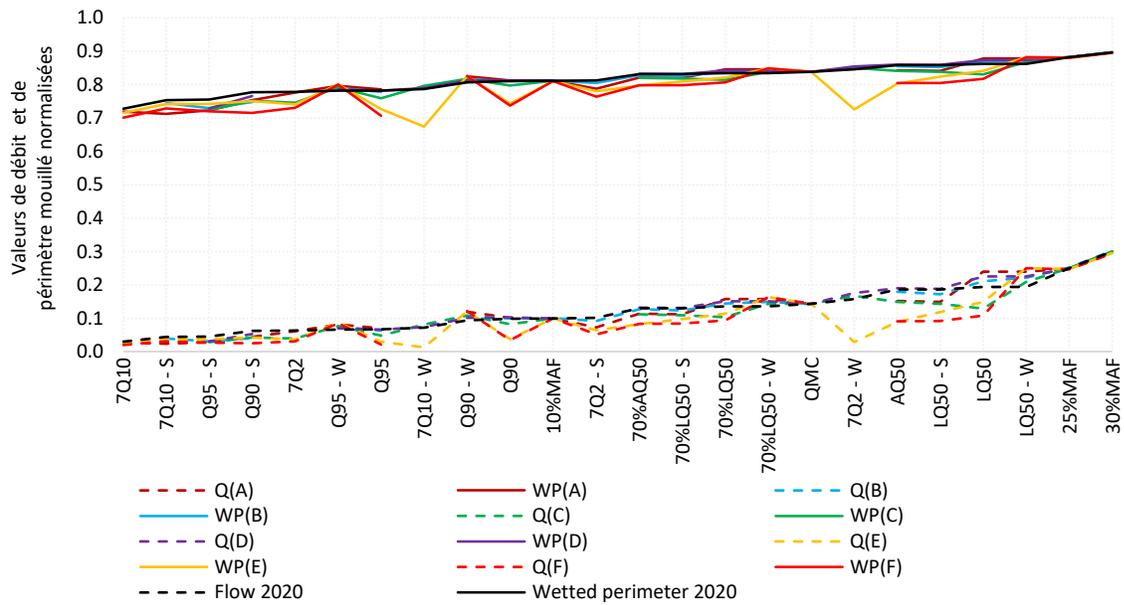
Du Loup - Station 022507 - Site 54 - 515 km²



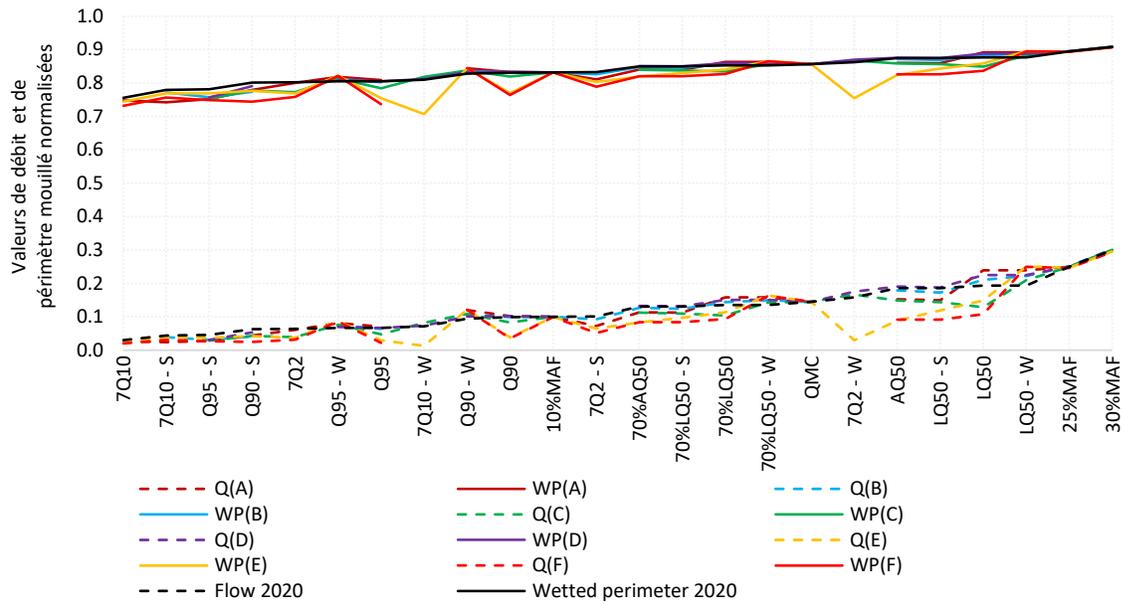
Ouelle - Station 022704 - Site 60 - 798 km²



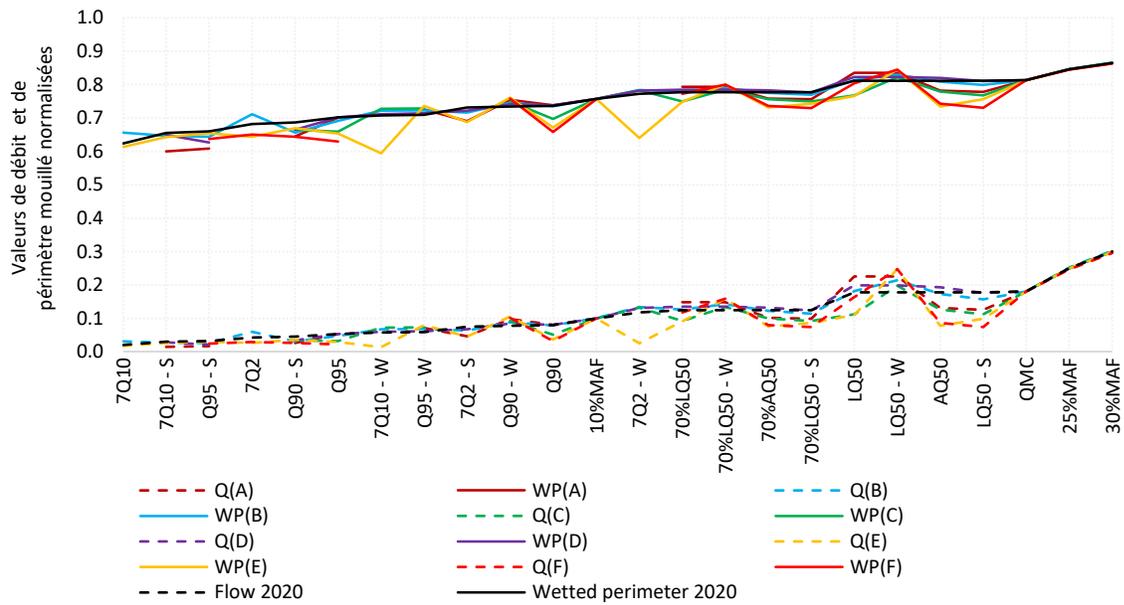
Beaurivage - Station 023401 - Site 3681 - 705 km²



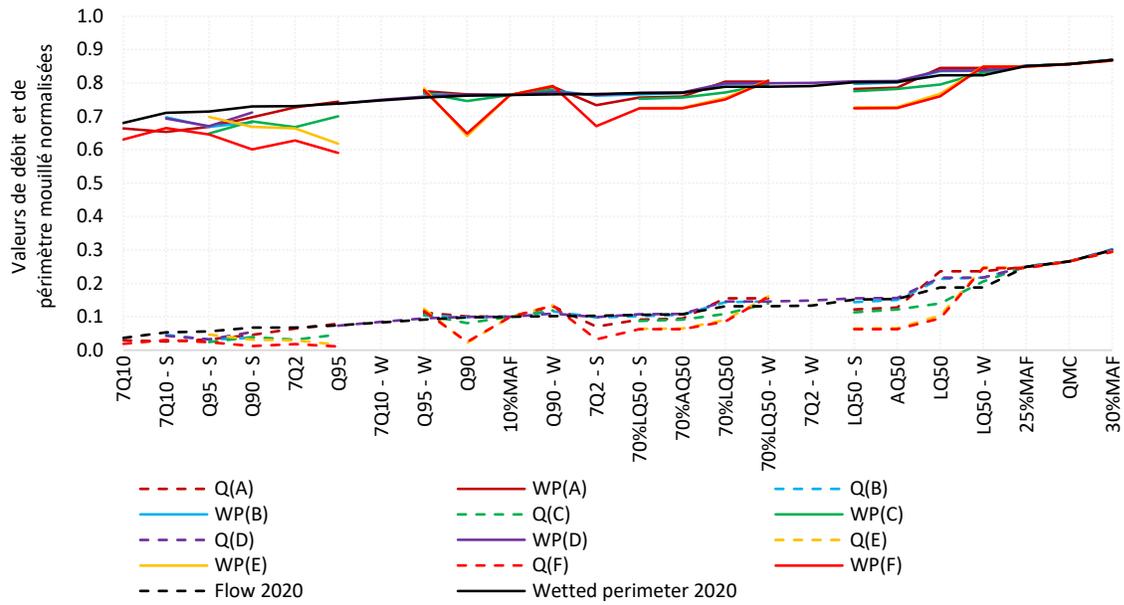
Beaurivage - Station 023401 - Site 74 - 705 km²



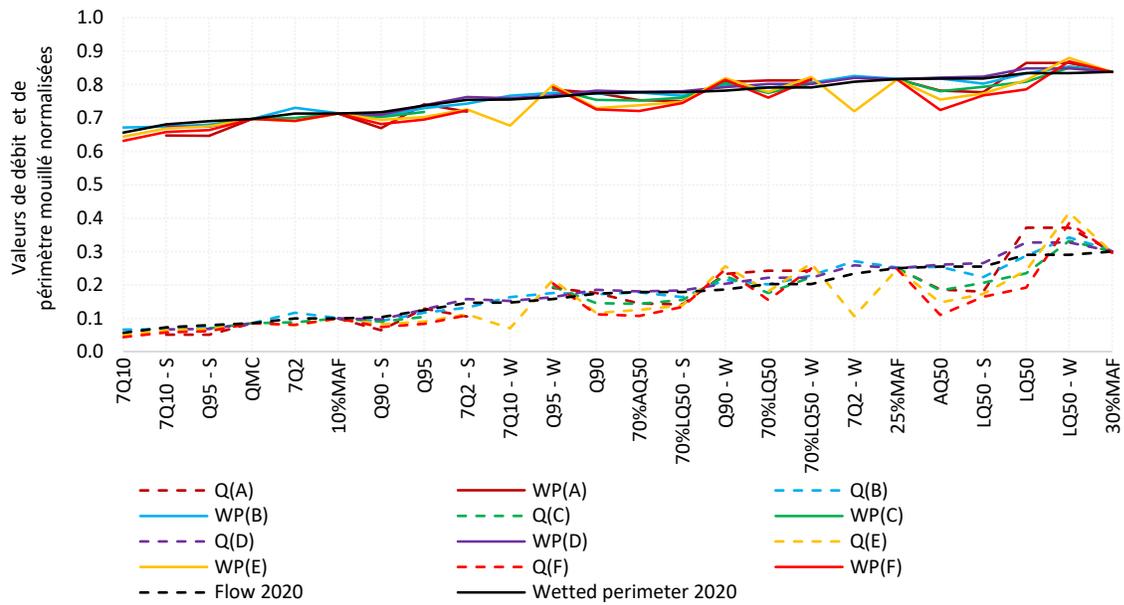
Famine - Station 023422 - Site 79 - 696 km²



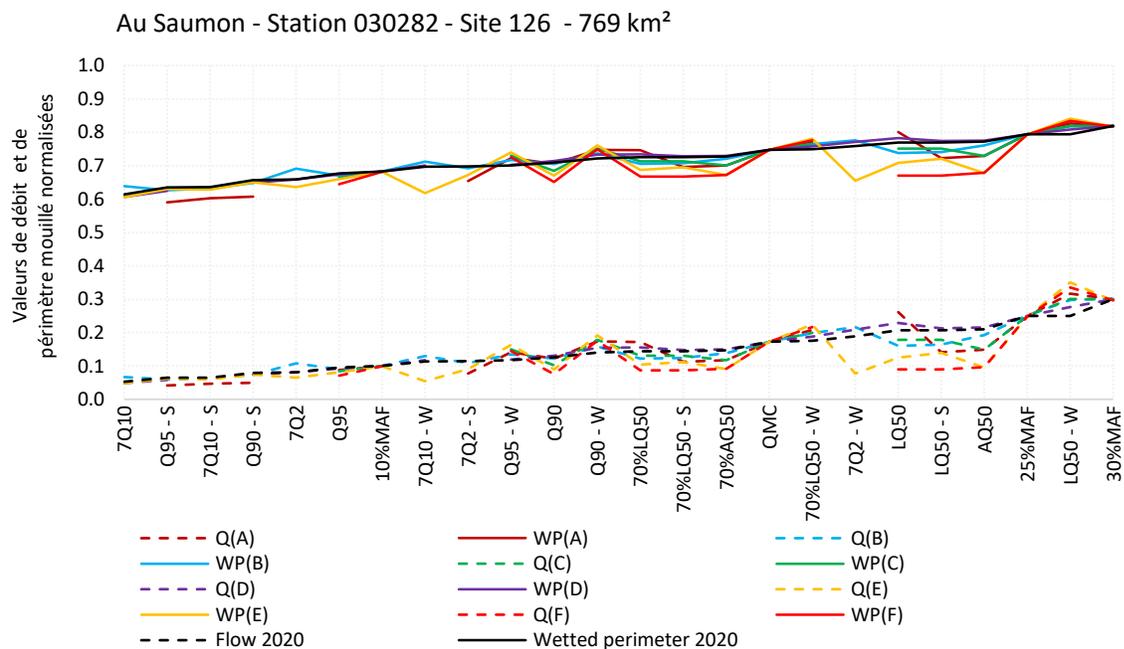
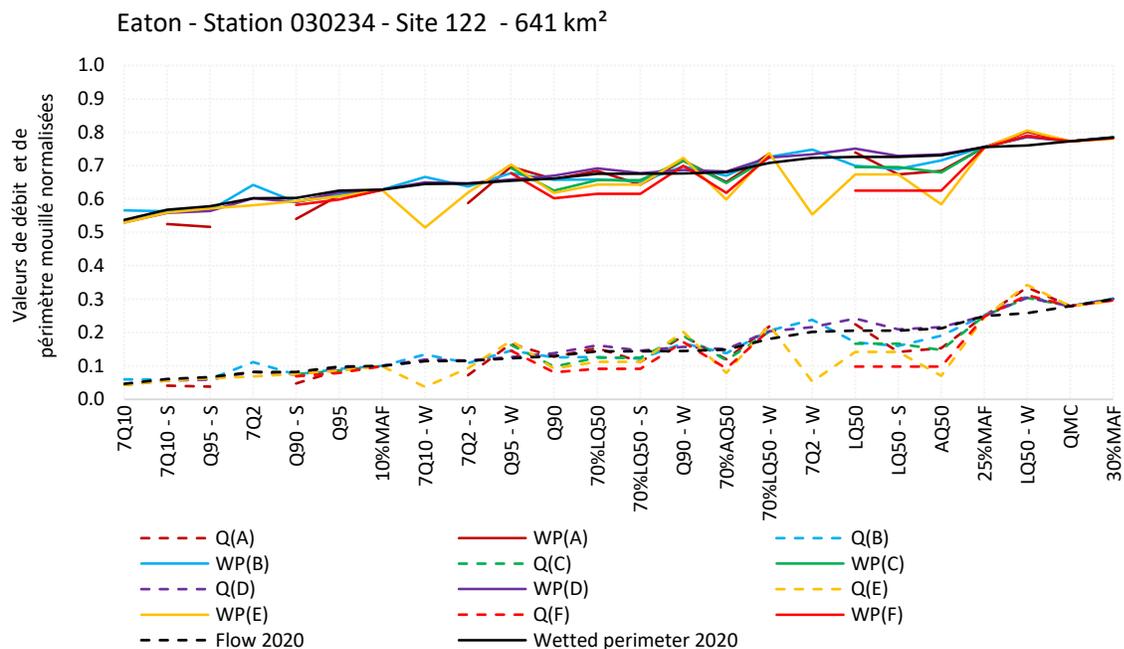
Bras d'Henri - Station 023432 - Site 88 - 154 km²



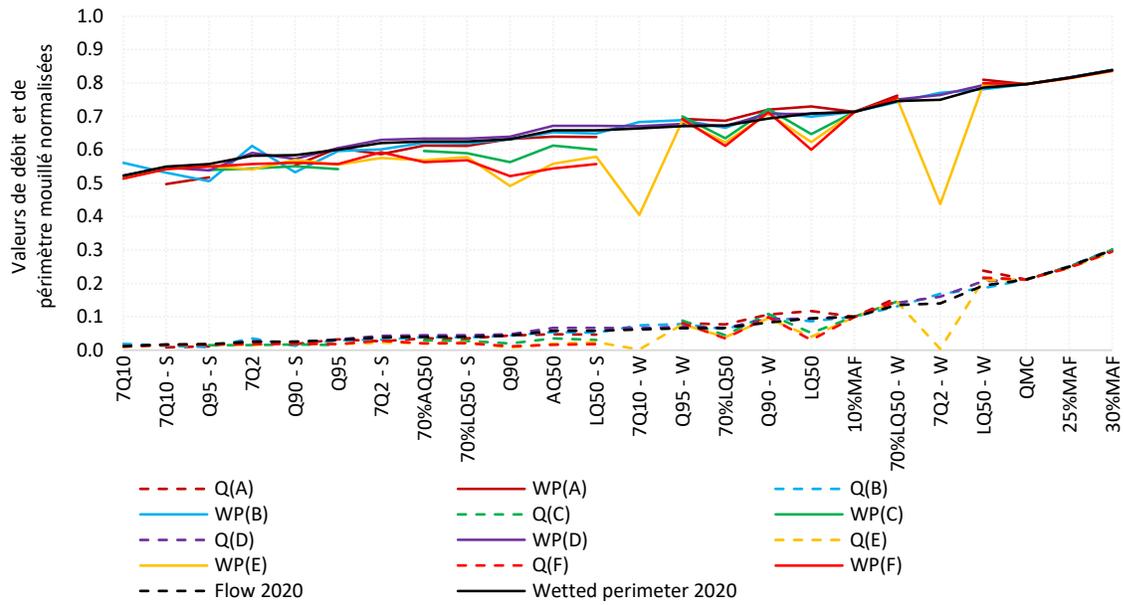
Bécancour - Station 024003 - Site 1417 - 229 km²



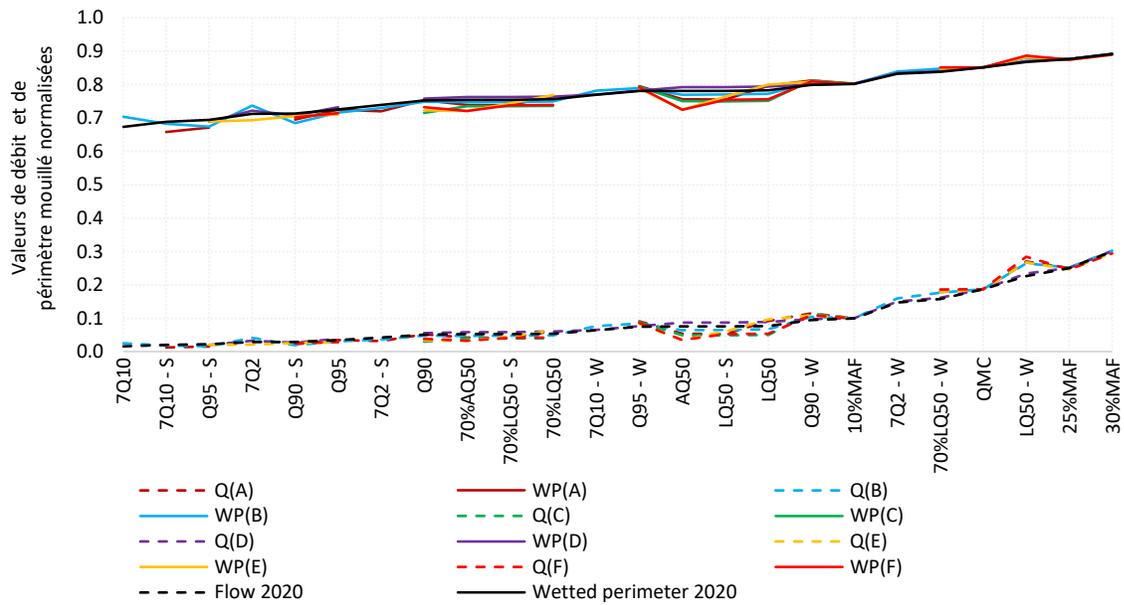
Région hydrographique 03 : Saint-Laurent sud-ouest



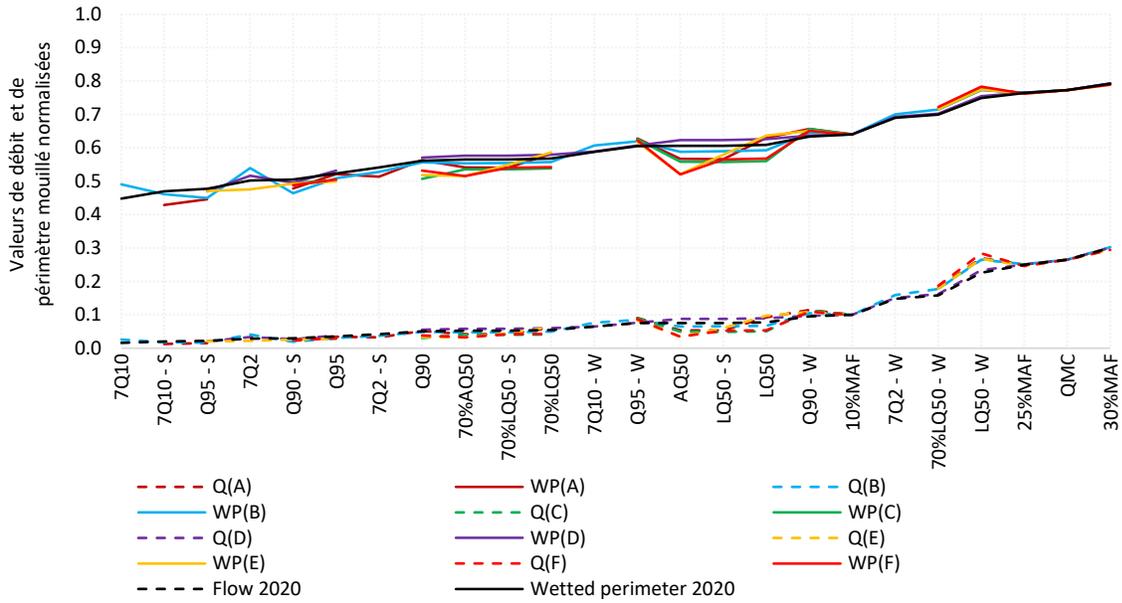
David - Station 030316 - Site 148 - 323 km²



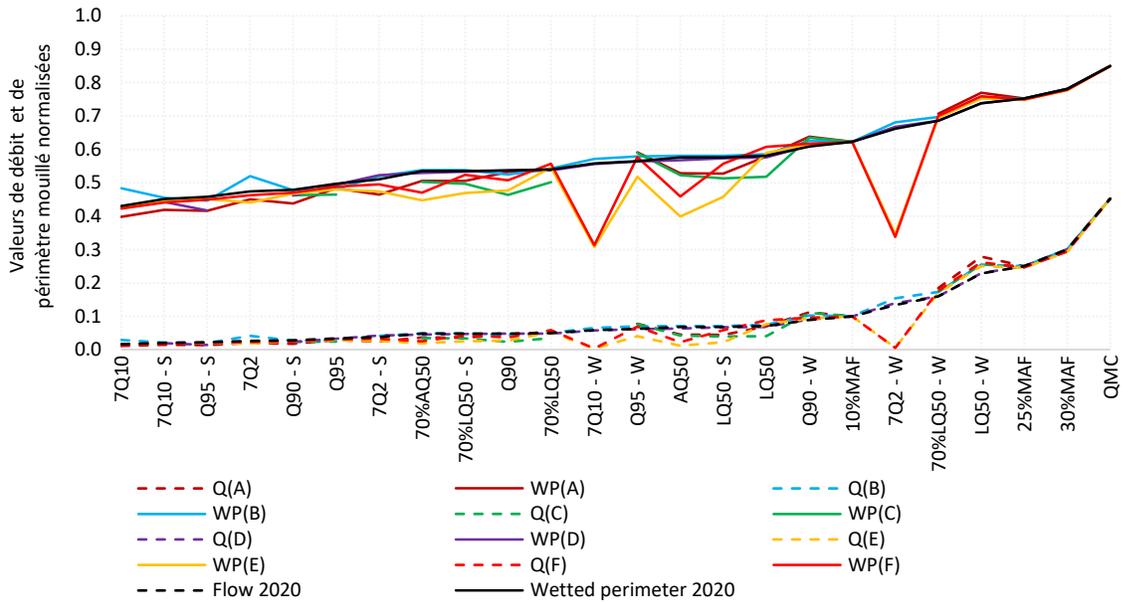
Des Hurons - Station 030415 - Site 167 - 308 km²



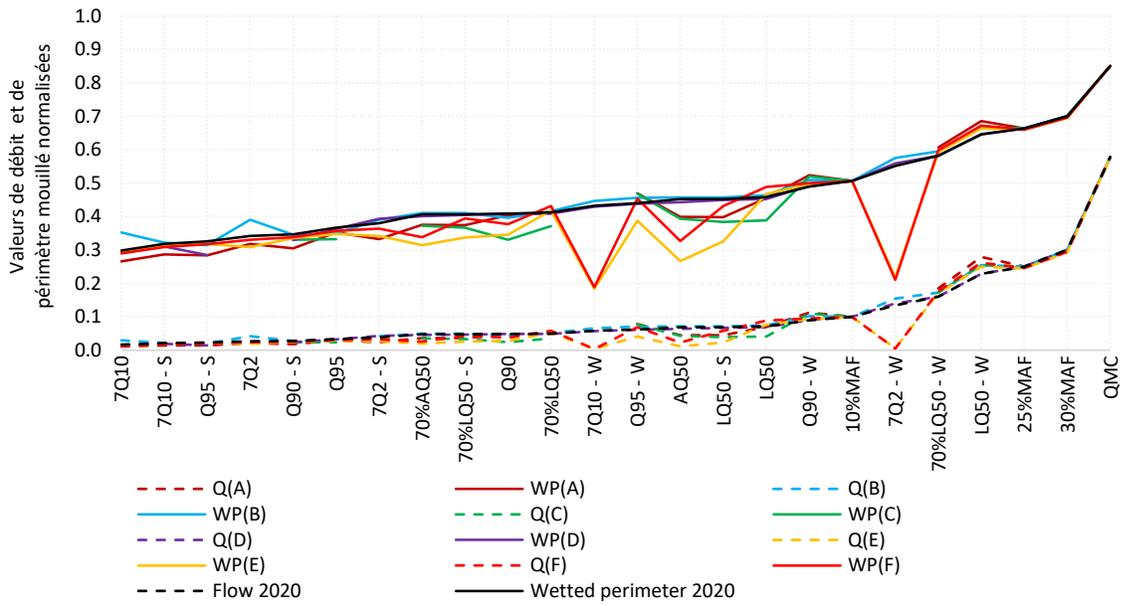
Des Hurons - Station 030415 - Site 1742 - 308 km²



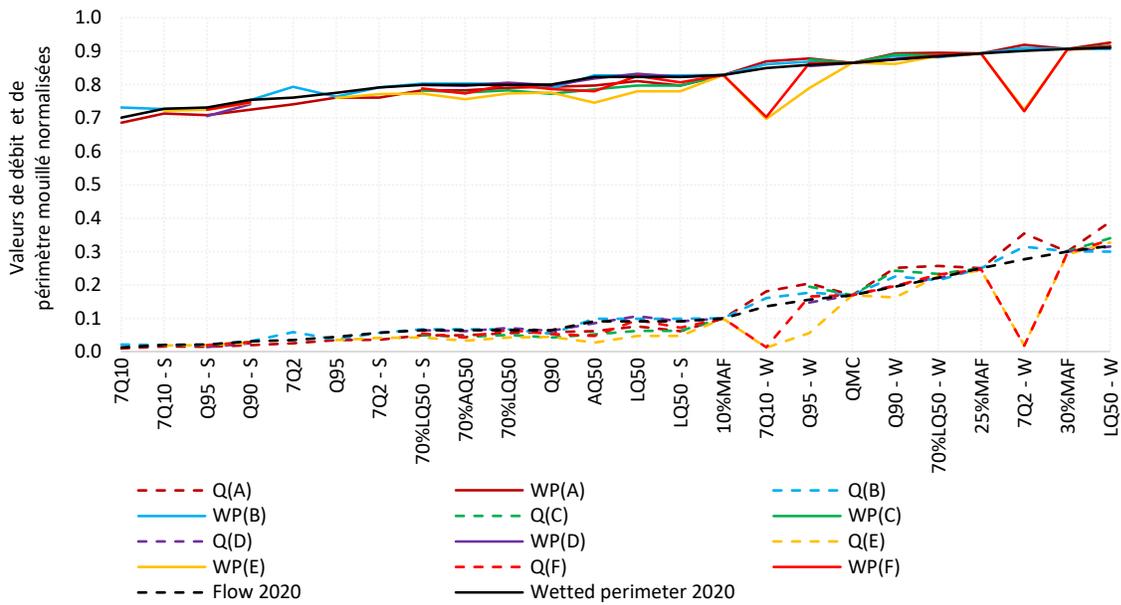
L'Acadie - Station 030421 - Site 170 - 367 km²



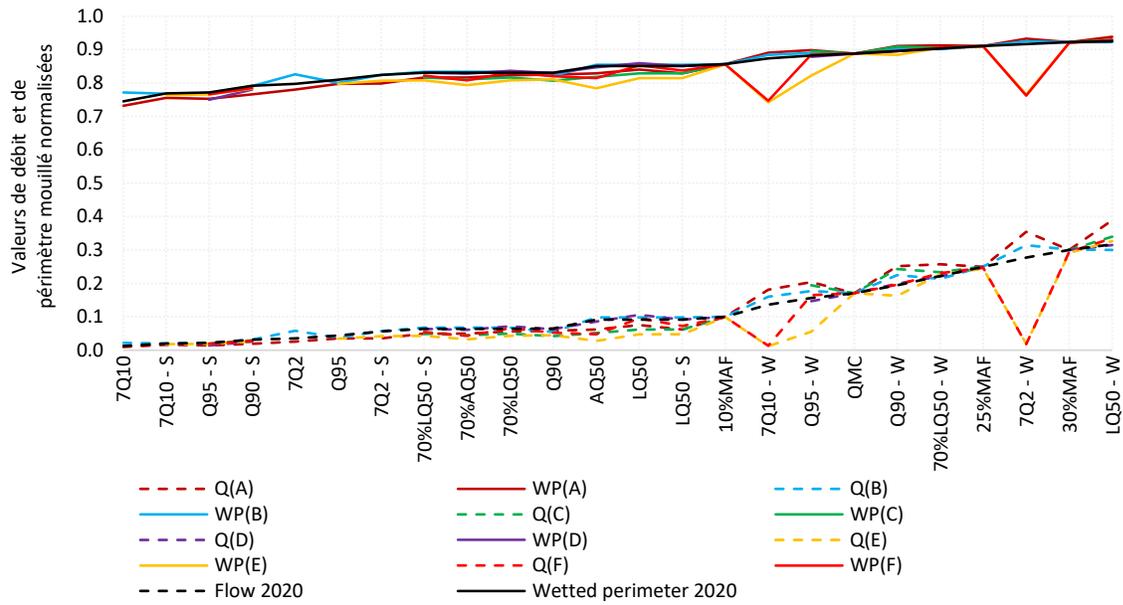
L'Acadie - Station 030421 - Site 171 - 367 km²



Des Anglais - Station 030907 - Site 192 - 642 km²

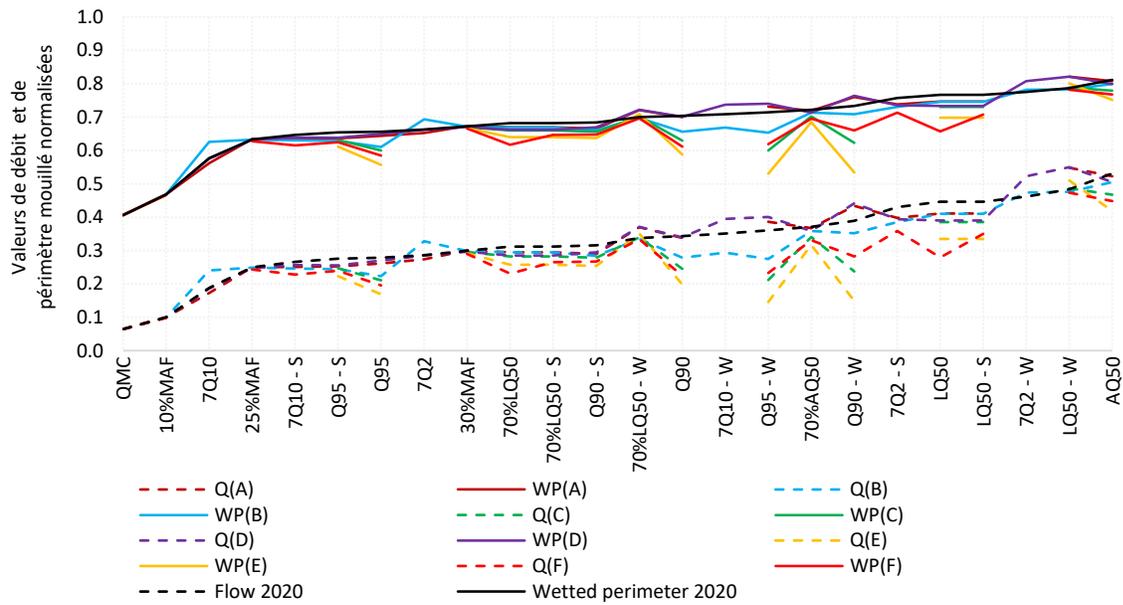


Des Anglais - Station 030907 - Site 193 - 642 km²

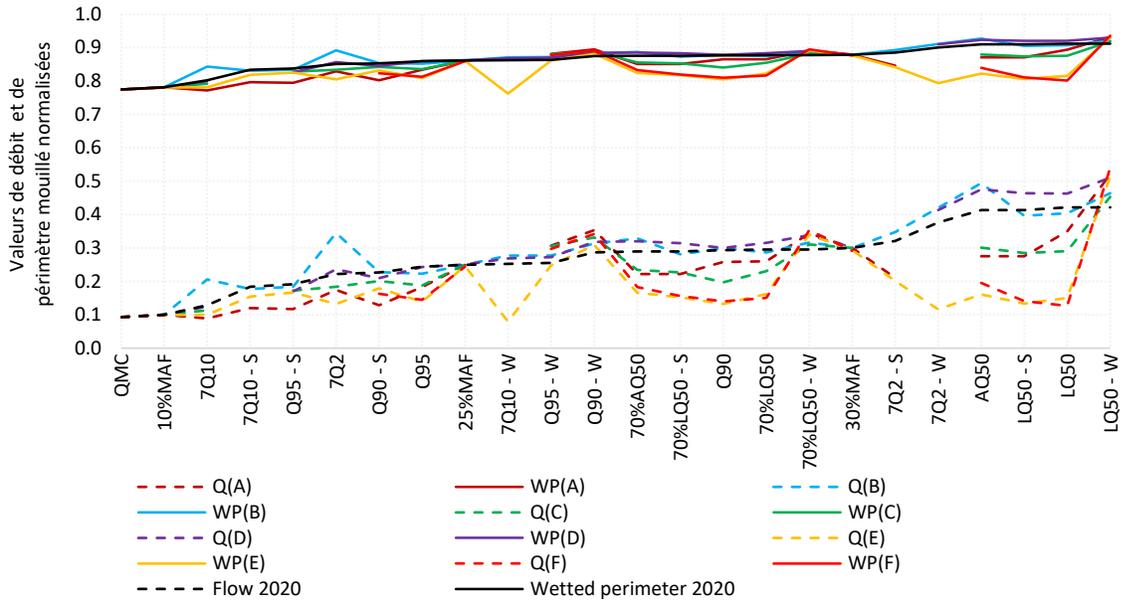


Région hydrographique 04 : Outaouais et Montréal

Dumoine - Station 041902 - Site 256 - 3 756 km²

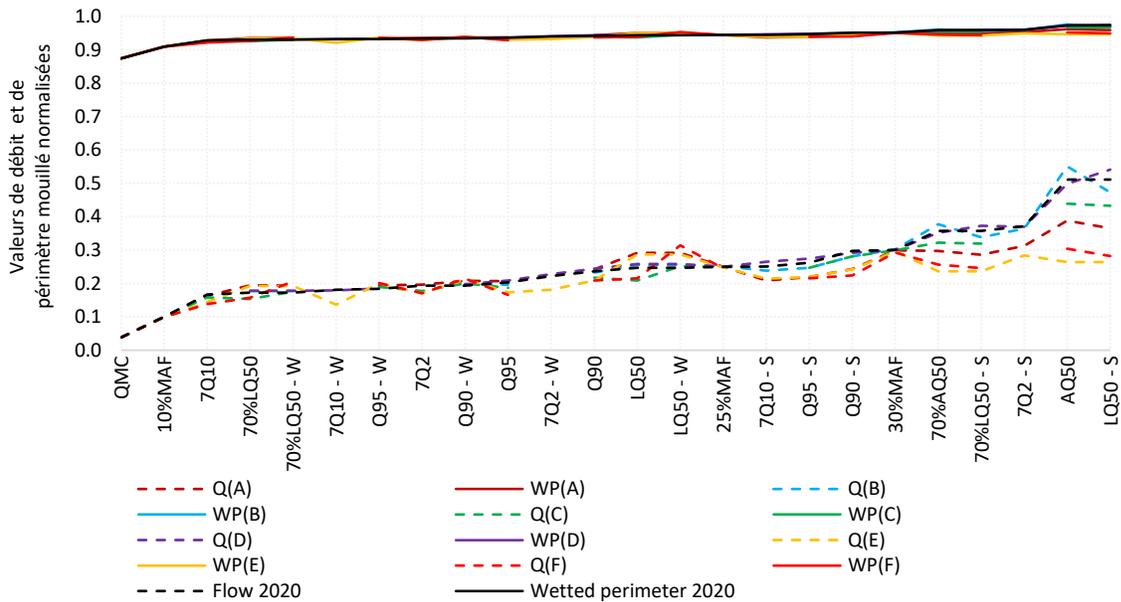


Matawin - Station 050119 - Site 274 - 1 387 km²

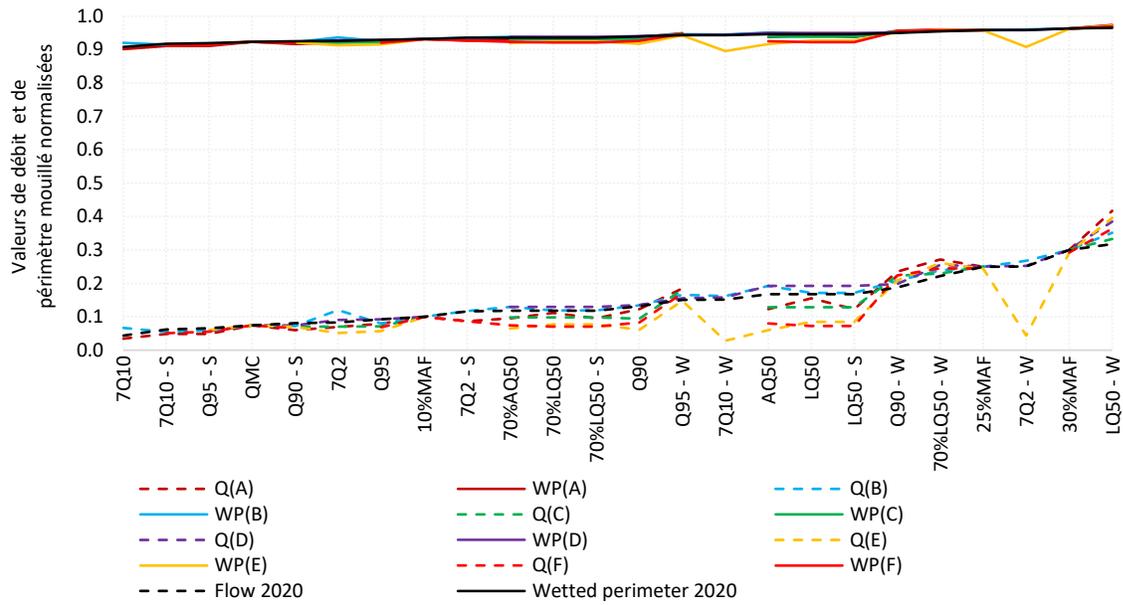


Région hydrographique 05 : Saint-Laurent nord-ouest

Bras du Nord - Station 050409 - Site 287 - 646 km²

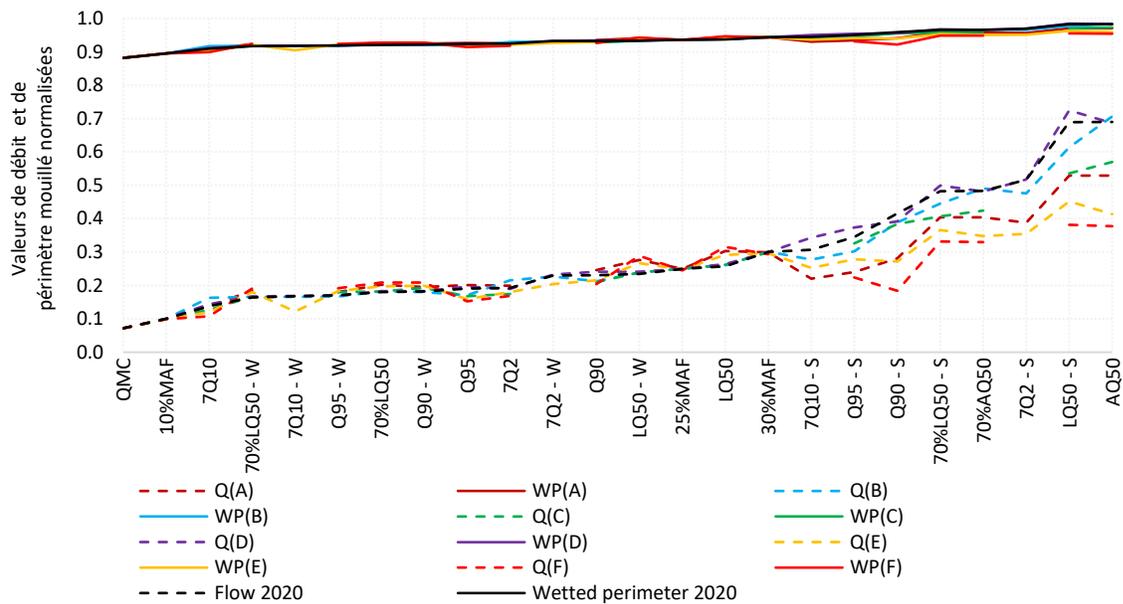


De l'Achigan - Station 052233 - Site 332 - 641 km²

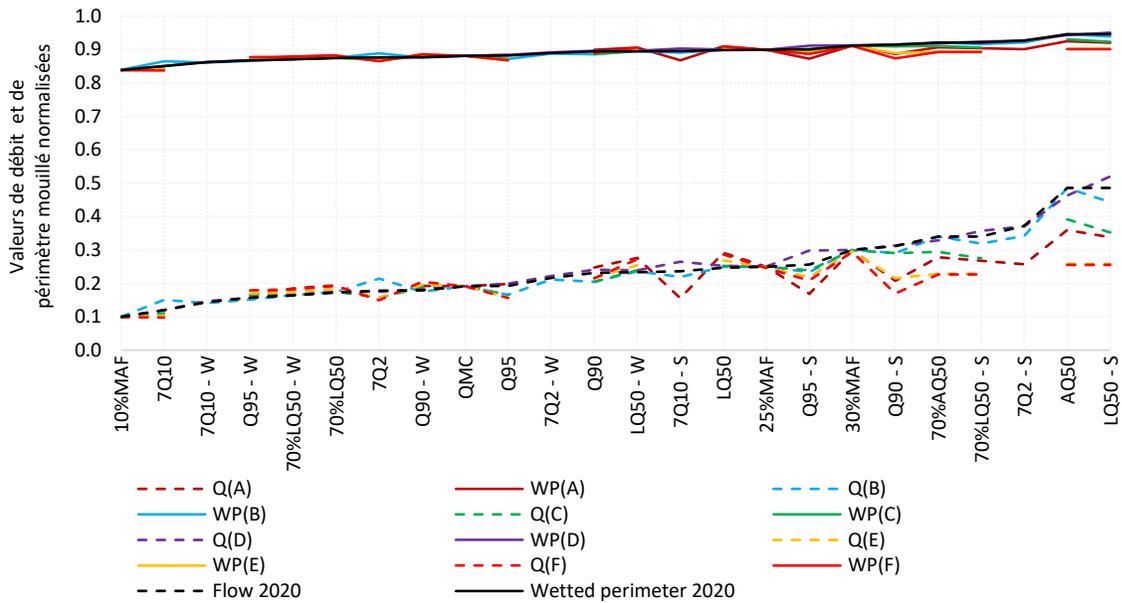


Région hydrographique 06 : Saguenay et lac Saint-Jean

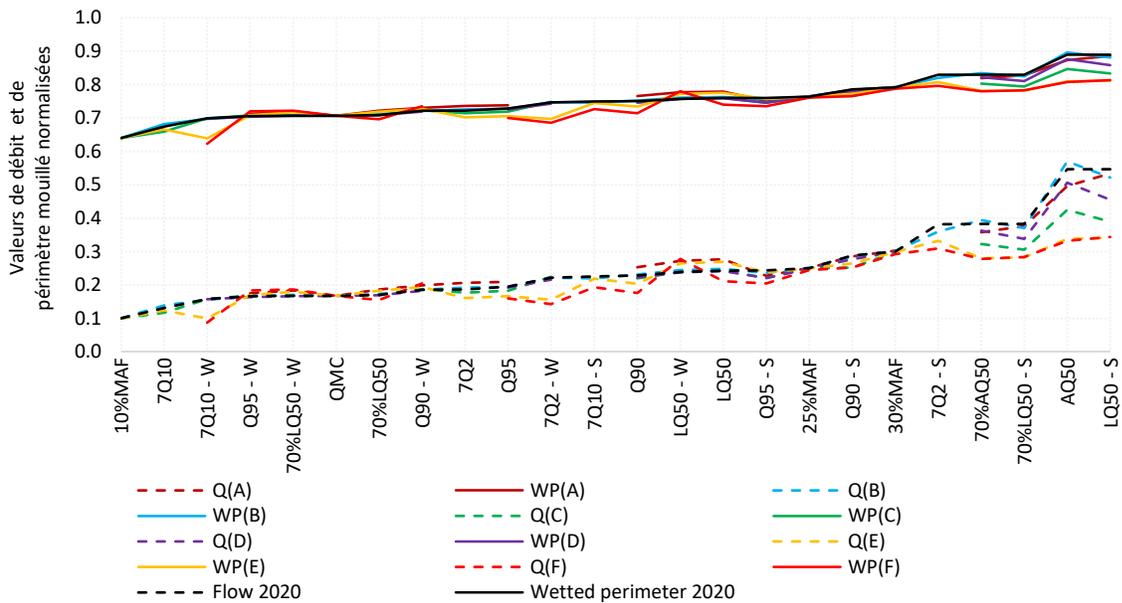
Aux Écorces - Station 061020 - Site 370 - 1 115 km²



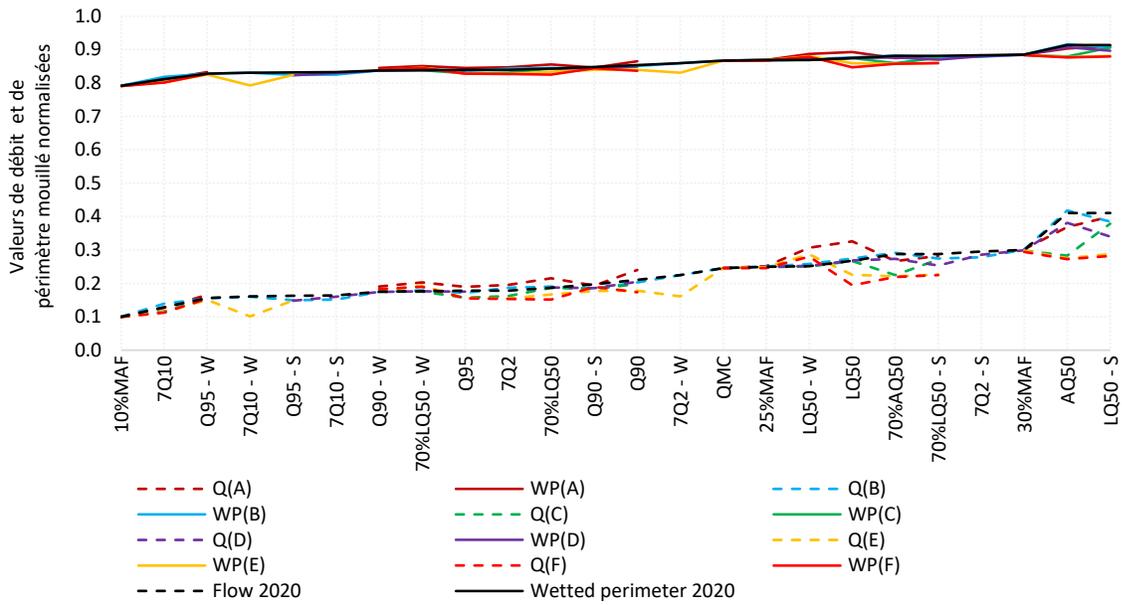
Cyriac - Station 061024 - Site 375 - 350 km²



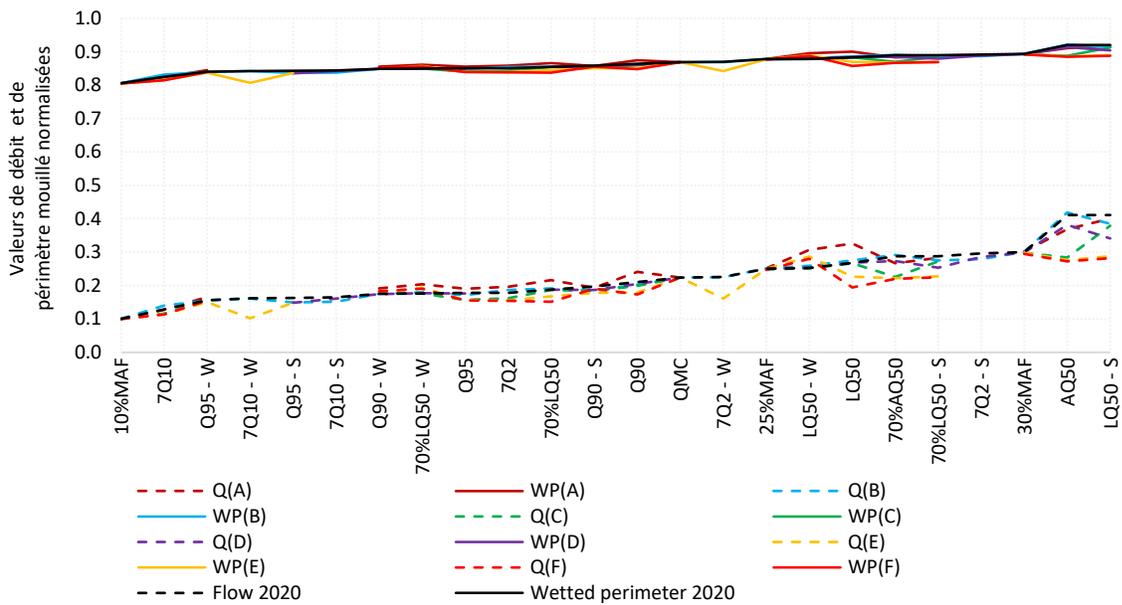
Petite rivière Péribonka - Station 061801 - Site 389 - 1 020 km²



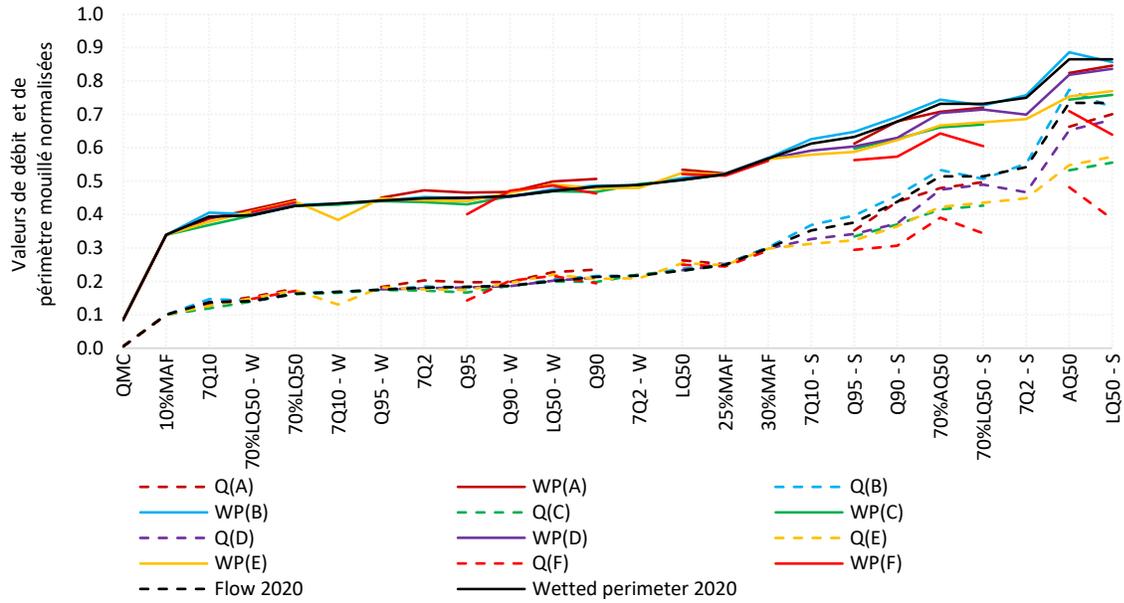
Aux Saumons - Station 061909 - Site 394 - 591 km²



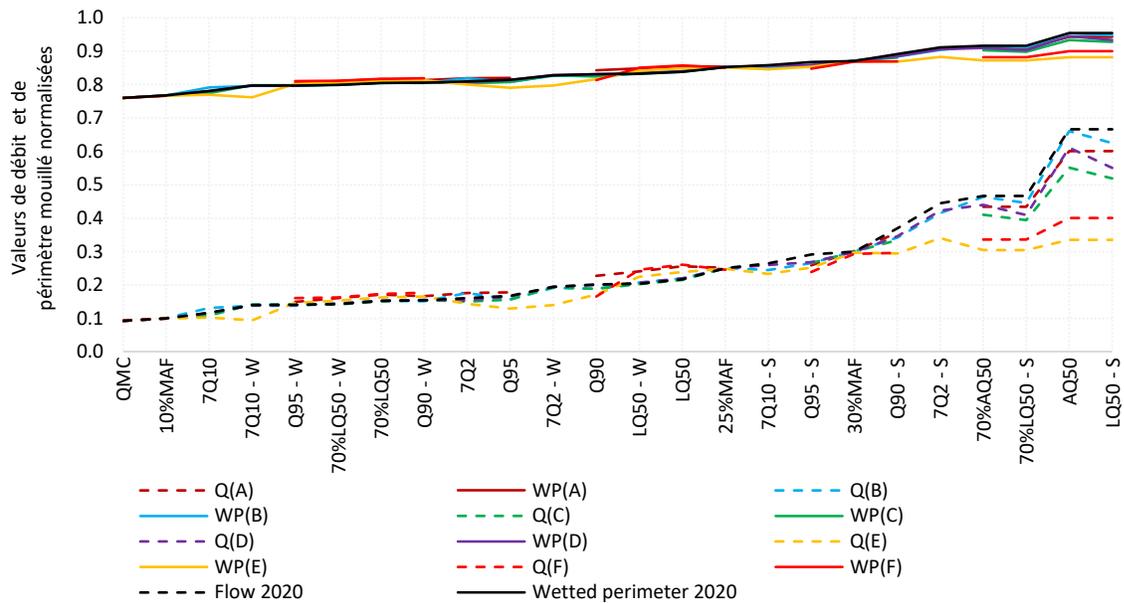
Aux Saumons - Station 061909 - Site 2392 - 591 km²

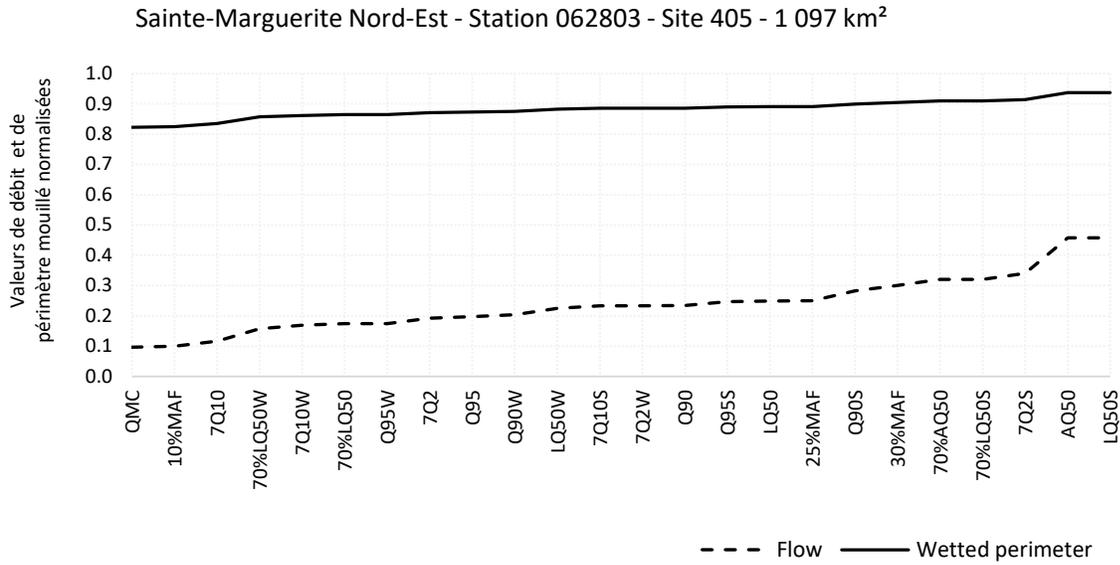


Mistassini - Station 062102 - Site 2415 - 9 631 km²

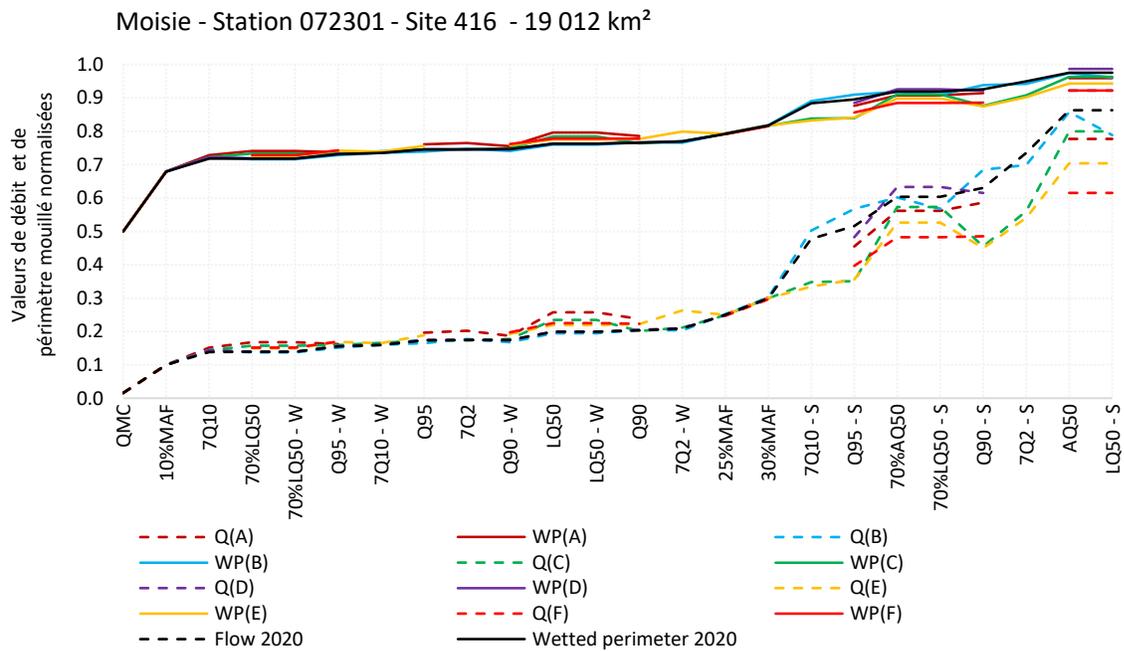


Valin - Station 062701 - Site 2419 - 768 km²

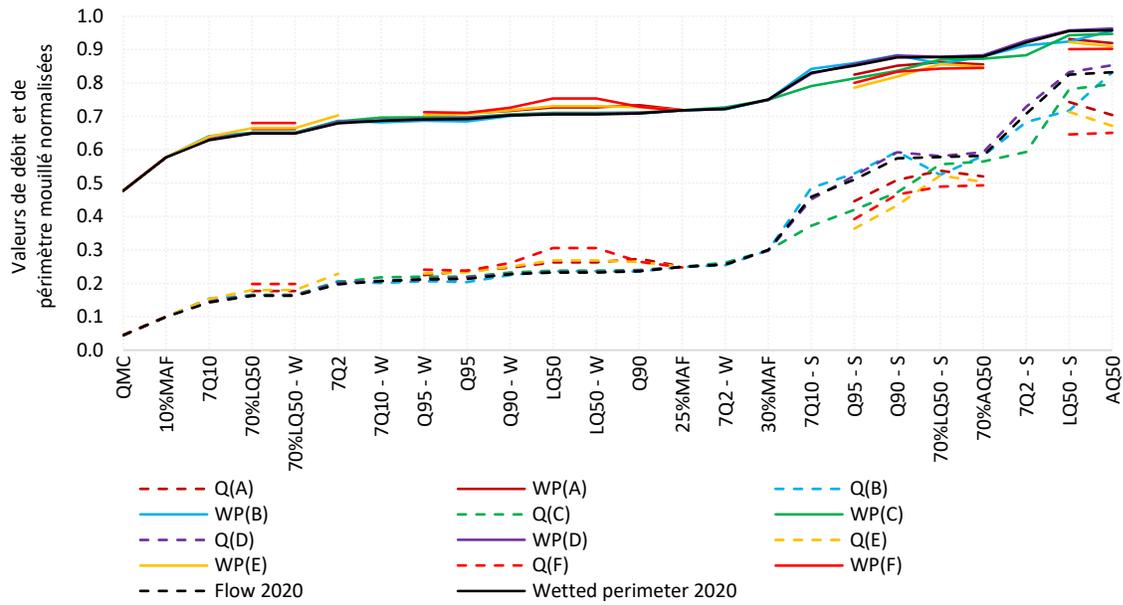




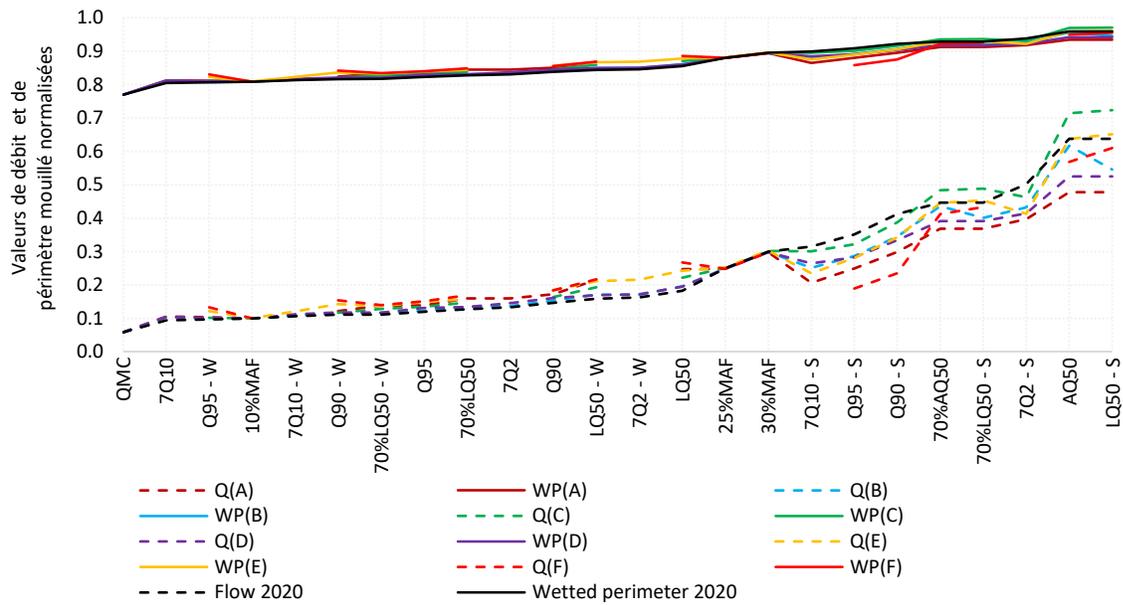
Région hydrographique 07 : Saint-Laurent nord-est



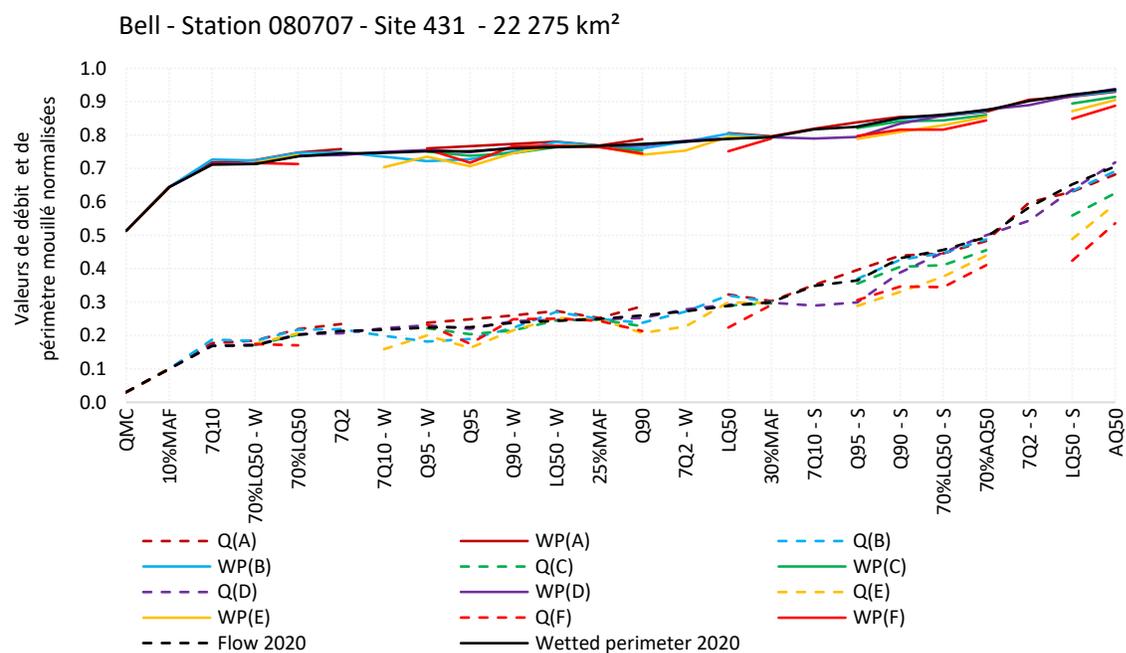
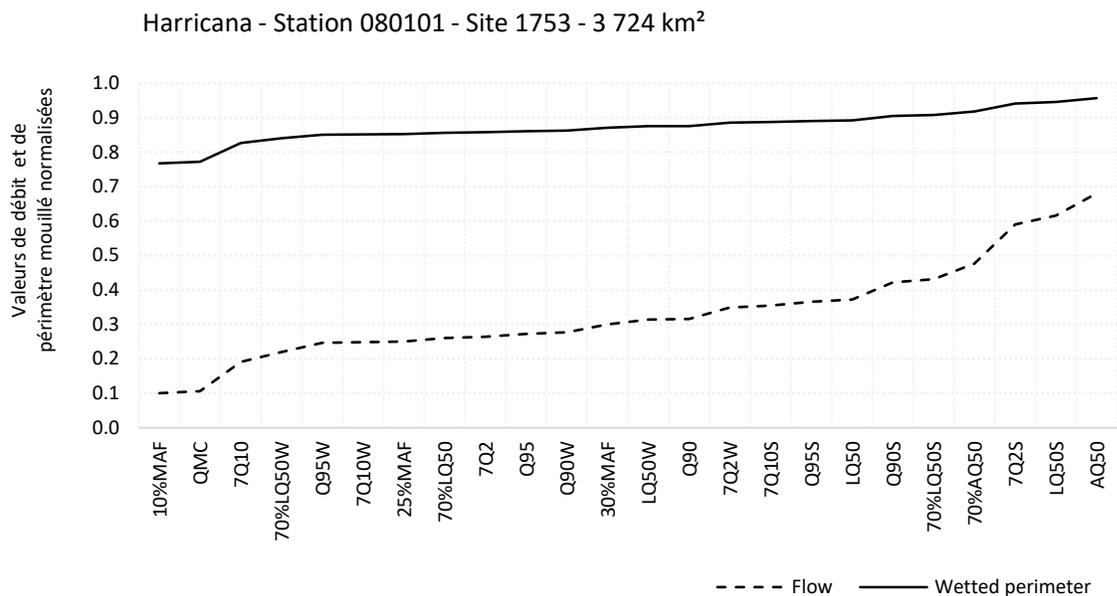
Magpie - Station 073503 - Site 419 - 7 201 km²



Saint-Paul - Station 076601 - Site 424 - 5 504 km²



Région hydrographique 08 : Baies de Hannah et de Rupert



| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----------------------------------|------|------|----|------|------|------|------|------|----|------|----|------|
| 21 | R03 | L'Acadie-170 | 45.2 | 1.7 | 10 | 3.4 | 2.6 | 5 | 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 | 23.1 | 25.7 | 25 | 48.3 | 30 | 69 |
| 30 | R06 | Cyriac-375 | 19.2 | 12 | 10 | 19.3 | 17.8 | 17.3 | 23.1 | 24.7 | 25 | 34 | 30 | 48.6 |
| 31 | R06 | Petite rivière Péribonka-389 | 16.7 | 13.1 | 10 | 19.5 | 18.6 | 17 | 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 | 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 | 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 | 30 | 45.8 |
| 37 | R07 | Moisie-416 | 1.6 | 13.9 | 10 | 17.4 | 17.5 | 14 | 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 | 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 | 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 | 28.9 | 25 | 49.4 | 30 | 70.6 |
| 42 | R08 | Bell-431 | 3 | | | | | | | | | | | |
| 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-B V Valeurs standardisés des débits observés (%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 | 7Q10 - S (%) | Q95 - S (%) | 7Q2 - S (%) | 70LQ50 - S (%) | Q90 - S (%) | LQ50 - S (%) | 7Q10 - W (%) | Q95 - W (%) | 7Q2 - W (%) | 70LQ50 - W (%) | Q90 - W (%) | LQ50 - W (%) |
|----|-----|------------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|----------------|-------------|--------------|
| 1 | R01 | Bonaventure-1 | 19.1 | 20.4 | 28.3 | 21.7 | 23 | 31 | 12.2 | 12.5 | 17.4 | 13.3 | 14.6 | 19 |
| 2 | R01 | Petite rivière Cascapédia-5 | 2 | 22.9 | 32.3 | 24 | 26.4 | 34.3 | 15 | 15.5 | 19.4 | 14 | 16.6 | 20 |
| 3 | R01 | Cascapédia-9 | 25.5 | 26.5 | 34.9 | 32.4 | 30.2 | 46.3 | 14 | 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 | 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 | 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 | 14.6 | 17.8 | 10.3 | 25.5 | 14.7 | 15.8 | 23.4 | 20.3 | 18.6 | 29 |
| 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 | 20.7 | 11.4 | 11.7 | 18.9 | 17.5 | 14 | 25 |
| 18 | R03 | David-148 | 1.7 | 1.9 | 3.8 | 4 | 2.5 | 5.8 | 6.2 | 6.6 | 14 | 13.6 | 8.3 | 19.4 |
| 19 | R03 | Des Hurons-167 | 2 | 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 | 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 | 31.2 | 31.6 | 44.6 | 35.1 | 36 | 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 | 16.4 | 18.2 | 23.5 |
| 30 | R06 | Cyriac-375 | 23.7 | 25.6 | 37.3 | 34 | 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 | 14.0 | 19.4 | 14.2 | 15.3 | 20.4 |
| 36 | R06 | Sainte-Marguerite Nord-Est-405 | 23.3 | 24.6 | 34 | 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 | 86.3 | 16 | 15.6 | 20.9 | 14 | 17.5 | 19.9 |
| 38 | R07 | Magpie-419 | 45.9 | 51 | 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 | 43.1 | 42.2 | 61.6 | 24.8 | 24.6 | 34.9 | 22 | 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 | 14.5 |

Tableau-C V Valeurs standardisés des périmètres mouillés observés (%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 | 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 | 88.6 | 89.5 | 90 | 92.3 |
| 3 | R01 | Cascapédia-9 | 76 | 80.4 | 78.4 | 82.5 | 82 | 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 | 67.7 | 71.9 | 74.7 | 76.6 | 78.4 | 78 | 81 | 83 |
| 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | 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 | 79.4 | 72.8 | 81.9 | 77.2 |
| 18 | R03 | David-148 | 79.7 | 52.2 | 71.4 | 60 | 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 | 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 | 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 | 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 |
| 27 | R05 | Bras du Nord-287 | 87.4 | 92.9 | 90.9 | 93.6 | 93.4 | 93 | 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 | 92.1 | 91.2 | 94.6 |
| 31 | R06 | Petite rivière Péribonka-389 | 70.7 | 67.4 | 64 | 72.8 | 72.2 | 70.9 | 75.1 | 76.0 | 76.4 | 83 | 79.2 | 88.9 |
| 32 | R06 | Aux Saumons-2392 | 86.9 | 82.4 | 80.5 | 85 | 85 | 85.4 | 86.4 | 88.3 | 87.8 | 88.9 | 89.3 | 92 |
| 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 | 78.1 | 76.7 | 81.4 | 81 | 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 | 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 | 95.8 | 93 | 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 | 58.5 | 61.4 | 62.4 | 58.7 | 64.4 | 63.8 | 72.4 | 85.2 | 75.5 | 92.5 |

Tableau-D V Valeurs standardisés des périmètres mouillés observés (%WPS_{MAF}) pour chaque site étudié. RH : Région hydrographique (SUITE)

| | RH | Rivière – Site de jaugeage | 7Q10 - S (%) | Q95 - S (%) | 7Q2 - S (%) | 70LQ50 - S (%) | Q90 - S (%) | LQ50 - S (%) | 7Q10 - W (%) | Q95 - W (%) | 7Q2 - W (%) | 70LQ50 - W (%) | Q90 - W (%) | LQ50 - W (%) |
|----|-----|---------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|-----------------|
| 1 | R01 | Bonaventure-1 | 92.4 | 92.7 | 94.1 | 93 | 93.2 | 94.6 | 90.4 | 90.5 | 92 | 90.8 | 91.2 | 92.4 |
| 2 | R01 | Petite rivière Cascapédia-5 | 87.6 | 87.9 | 90.6 | 88.3 | 89 | 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 | 75 | 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 | 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 | 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 |
| 9 | R02 | Du Loup-54 | 54.3 | 54.6 | 62.8 | 63.1 | 57.5 | 68.3 | 58.8 | 59.4 | 66 | 64.8 | 61.6 | 70.2 |
| 10 | R02 | Ouelle-60 | 39.8 | 40 | 49.4 | 52.1 | 43.1 | 57.8 | 42 | 43 | 51.5 | 51 | 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 | 80.1 | 87.4 | 81 | 80.5 | 86.3 | 85.2 | 82.8 | 87.7 |
| 13 | R02 | Famine-79 | 65.5 | 66 | 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 | 73 | 80.2 | 74.8 | 75.6 | 79.1 | 78.9 | 76.7 | 82.3 |
| 15 | R02 | Bécancour-1417 | 68.1 | 69 | 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 | 69.7 | 70.1 | 75.9 | 74.9 | 72.1 | 79.5 |
| 18 | R03 | David-148 | 55 | 55.7 | 62 | 62.5 | 58.4 | 65.8 | 66.4 | 67.1 | 75 | 74.6 | 69.4 | 78.6 |
| 19 | R03 | Des Hurons-167 | 68.9 | 69.4 | 73.9 | 75.5 | 71.4 | 78.1 | 77 | 78 | 83.3 | 83.8 | 79.9 | 86.7 |
| 20 | R03 | Des Hurons-1742 | 47 | 47.8 | 54.1 | 56.5 | 50.5 | 60.6 | 58.8 | 60.5 | 69 | 69.9 | 63.4 | 74.9 |
| 21 | R03 | L'Acadie-170 | 45.1 | 45.8 | 51 | 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 | 40.7 | 34.7 | 45.2 | 43.2 | 44 | 55.2 | 58.2 | 49 | 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 |
| 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 | 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 | 95.8 | 95.1 | 97.3 | 93.2 | 93.2 | 94.0 | 93 | 93.4 | 94.4 |
| 28 | R05 | De l'Achigan-332 | 91.8 | 92 | 93.6 | 93.6 | 92.6 | 94.7 | 94.4 | 94.3 | 95.8 | 95.5 | 95 | 96.5 |
| 29 | R06 | Aux Écorces-370 | 94.5 | 95 | 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 | 87.1 | 87.7 | 89.5 |
| 31 | R06 | Petite rivière Péribonka-389 | 74.9 | 76 | 83 | 83 | 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 | 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 | 93.7 | 86.2 | 86.4 | 88.5 | 85.7 | 87.5 | 88.3 |
| 37 | R07 | Moisie-416 | 88.3 | 89.5 | 95 | 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 | 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 | 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 |