

HYDROLOGIE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF

Incluant la classification de la plaine d'inondation alluviale

Mise à jour du rapport final présenté à
La Corporation d'aménagement et de protection de la rivière Ste-Anne (CAPSA)
Organisme de bassin versant : Rivières Sainte-Anne,
Portneuf et secteur de La Chevrotière

Alain N. Rousseau, ing., Ph. D.
Andrés Gonzalez, M. Sc.
Stéphane Savary, ing. jr., M. Sc.

Centre Eau Terre Environnement
Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE)
490, rue de la Couronne, Québec (QC), G1K 9A9

Rapport No-2085

23 février 2023

© Alain N. Rousseau, 2022

Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-972-2 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2023

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2023

Table de Matières

1	INTRODUCTION	1
2	APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	3
2.1	MISE EN PLACE DE LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE.....	3
2.1.1	<i>Discrétisation et caractérisation du bassin versant de la rivière Portneuf à l'aide de PHYSITEL</i>	<i>3</i>
2.1.1.1	Modèle numérique d'altitude	4
2.1.1.2	Réseau hydrographique	6
2.1.1.3	Occupation du sol.....	8
2.1.1.4	Types de sol.....	11
2.1.1.5	Orientation d'écoulement.....	12
2.1.1.6	Segmentation en versants (UHRH)	14
2.1.2	<i>Intégration du bassin versant de la rivière Portneuf au modèle HYDROTEL</i>	<i>16</i>
2.1.2.1	Éléments généraux	16
2.1.2.2	Stations météorologiques et hydrométriques en support à la modélisation.....	18
2.1.2.3	Approche de modélisation	20
2.1.2.4	Calage du modèle HYDROTEL.....	21
2.2	CARACTÉRISATION DES PLAINES D'INONDATION ALLUVIALES.....	22
2.2.1	<i>Puissance fluviale.....</i>	<i>23</i>
2.2.2	<i>Puissance spécifique fluviale.....</i>	<i>23</i>
2.2.3	<i>Débit de plein bord</i>	<i>24</i>
2.2.3.1	Analyse fréquentielle des extrêmes : approche empirique.....	24
2.2.4	<i>Classement des types des plaines d'inondation alluviales</i>	<i>26</i>
3	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	28
3.1	DÉBITS OBSERVÉS À LA STATION PORTNEUF	28
3.2	CALAGE DU MODÈLE	29
3.3	PORTRAIT HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.....	30
3.3.1	<i>Hydrogramme des débits journaliers moyens.....</i>	<i>30</i>
3.3.2	<i>Régime de précipitations.....</i>	<i>31</i>
3.3.3	<i>Coefficient de ruissellement (K).....</i>	<i>33</i>
3.3.4	<i>Bilan hydrologique cumulatif moyen</i>	<i>34</i>
3.4	CLASSEMENT DE LA PLAINE D'INONDATION ALLUVIALE	36

3.4.1	<i>Débits de plein bord</i>	36
3.4.2	<i>Puissance fluviale spécifique</i>	37
3.4.3	<i>Type de plaines d'inondation alluviale</i>	38
4	CONCLUSIONS	45
5	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	46
6	ANNEXE I. FORMATION DES ACTEURS MUNICIPAUX ORGANISÉE PAR LA CAPSA	
	49	

Liste des figures

FIGURE 1. STRUCTURE DE PHYSITEL 4.0 POUR LA DISCRÉTISATION D'UN BASSIN EN VERSANTS (UHRH).....	4
FIGURE 2. MNA DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.	5
FIGURE 3. RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF	7
FIGURE 4. OCCUPATION DU SOL DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF	10
FIGURE 5. CARTE DE DISTRIBUTION DES TYPES DE SOL DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF	11
FIGURE 6. ORIENTATION D'ÉCOULEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.	13
FIGURE 7. DISTRIBUTION DES SUPERFICIES DES UHRH DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.	14
FIGURE 8. VERSANTS (UHRH) DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.	15
FIGURE 9. SCHÉMA MÉTHODOLOGIQUE D'HYDROTEL 4.0.....	17
FIGURE 10. LOCALISATION DES CINQ (5) STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES, LA STATION HYDROMÉTRIQUE DE PORTNEUF (050702) ET LA GRILLE DE POINTS ISSUE DE CAPA POUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF	19
FIGURE 11. PROCÉDURE DE CALCUL DES INDICATEURS HYDROLOGIQUES DE DIFFÉRENTES PÉRIODES DE RETOUR	25
FIGURE 12. FONCTION DE DISTRIBUTION CUMULÉE SELON LA PROBABILITÉ EMPIRIQUE DE CUNNANE26	
FIGURE 13. HYDROGRAMME DES DÉBITS JOURNALIER MOYENS OBSERVÉS À LA STATION PORTNEUF (050702) AVEC LES 10 ^{ÈME} ET 90 ^{ÈME} PERCENTILES (TOILE MAUVE) DE L'ANNÉE 2003 À 2020.	28
FIGURE 14. HYDROGRAMME DES DEBITS MOYENS OBSERVES (LIGNE BLEU) ET SIMULES (LIGNE ORANGE) POUR LA STATION PORTNEUF (050702) AVEC LES 10EME ET 90EME PERCENTILES OBSERVES (TUILE BLEU PALE) DE L'ANNEE 2003 AU 2020.....	31
FIGURE 15. REGIME DE PRECIPITATION JOURNALIERE.	32
FIGURE 16. REGIME DE PRECIPITATION TOTALE MENSUELLE.....	33
FIGURE 17 QUOTIENT DE L'ÉCOULEMENT ANNUEL MOYEN (BARS EN ORANGE) ET LA PRÉCIPITATION ANNUELLE MOYENNE EN AMONT (BARS EN BLEU), AINSI QUE LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.....	34
FIGURE 18. BILAN HYDRIQUE CUMULATIF MOYEN SELON UNE ANNÉE HYDROLOGIQUE (1 ^{ER} OCTOBRE AU 30 SEPTEMBRE) À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF. (PPT : PRÉCIPITATION LIQUIDE, ETP : ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE, QT : ÉCOULEMENT	

OBSERVÉ, ENN : ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE, PPN : PRÉCIPITATION SOLIDE, TMIN : TEMPÉRATURE MINIMALE, TMAX : TEMPÉRATURE MAXIMALE)	35
FIGURE 19. DISTRIBUTION DES DÉBITS DE PLEIN BORD À UNE PÉRIODE DE RETOUR 1.5 ANS, 2 ANS, 3 ANS, 4 ANS ET 5 ANS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF	37
FIGURE 20. DISTRIBUTION DES PUISSANCES FLUVIALES SPÉCIFIQUES AVEC UN DÉBIT DE PLEIN BORD D'UNE PÉRIODE DE RETOUR DE 1.5 ANS, 2 ANS, 3 ANS, 4 ANS ET 5 ANS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF	38
FIGURE 21. ÉVOLUTION DES CLASSES DES PLAINES INONDABLES DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF SELON LE DÉBIT DE PLEIN BORD UTILISÉ POUR CALCULER LA PUISSANCE SPÉCIFIQUE DU TRONÇON DE RIVIÈRE.....	39
FIGURE 22. DIAGRAMME DES POURCENTAGES DES DIFFÉRENTES CLASSES DE PLAINES D'INONDATION ALLUVIALES GÉNÉRALE, ET DÉTAILLÉ POUR LES TRONÇONS DE TYPE B DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF EN UTILISANT UN DÉBIT DE PLEIN BORD D'UNE PÉRIODE DE RETOUR DE 2 ANS (Q_{2ANS}).....	40
FIGURE 23. CARTE DE CLASSEMENT DES PLAINES D'INONDATION ALLUVIALES (TYPES A, B ET C) SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.....	41
FIGURE 24. CARTE DE PLAINES D'INONDATION ALLUVIALES DE TYPE A DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.....	42
FIGURE 25. CARTE DE PLAINES D'INONDATION ALLUVIALES DE TYPE B DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.....	43
FIGURE 26. CARTE DE PLAINES D'INONDATION ALLUVIALES DE TYPE C DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.....	44

Liste des tableaux

TABLEAU 1. DISTRIBUTION DE LA COUVERTURE DES CLASSES D'OCCUPATION SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF.....	9
TABLEAU 2. DISTRIBUTION DU TYPE DE SOL SUR LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF	12
TABLEAU 3. ENSEMBLE DE SOUS-MODÈLES HYDROLOGIQUES DISPONIBLES DANS HYDROTEL 4.0 .	17
TABLEAU 4. STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES À UN RAYON DE 50 KM DU SAINT-BASILE-DE-PORTNEUF.	20
TABLEAU 5. PROCESSUS SIMULÉS, ALGORITHMES UTILISÉS ET PARAMÈTRES DE CALAGE POUR LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF	20
TABLEAU 6. SCÉNARIOS LORS DU CALAGE DU MODÈLE HYDROTEL.....	22
TABLEAU 7. CLASSIFICATION DES PLAINES INONDABLES BASÉE SUR L'ÉNERGIE DU COURS D'EAU. ADAPTÉ DE NANSON AND CROKE (1992) ET BESNARD (2016).....	27
TABLEAU 8. QUALITÉ DE L'AJUSTEMENT DU MODÈLE SELON CINQ SCÉNARIOS PAR RAPPORT AUX DÉBITS JOURNALIERS OBSERVÉS À LA STATION HYDROMÉTRIQUE DE PORTNEUF.....	30

1 Introduction

Ce rapport présente les résultats d'un projet en deux volets de l'OBV CAPSA portant sur : (i) l'acquisition de connaissances sur l'hydrologie du bassin versant de la rivière Portneuf et (ii) la sensibilisation de la communauté et des intervenants « clés » sur le territoire. Plus spécifiquement ce document introduit les résultats des deux objectifs ciblés par le premier volet: (i) caractériser le régime hydrologique du bassin versant de la rivière Portneuf à l'aide de la modélisation hydrologique, ainsi que (ii) contribuer à la connaissance du portrait des enjeux liés aux problématiques d'érosion à partir d'une classification des plaines d'inondation alluviales à l'échelle du bassin versant.

L'acquisition de connaissances sur le régime hydrologique et sur les enjeux liés aux problématiques d'érosion à l'échelle du bassin versant, notamment, permet une meilleure gestion des ressources en eau sur un territoire. De nos jours, la protection des milieux hydriques et des écosystèmes aquatiques, ainsi que l'anticipation des événements extrêmes demeurent des activités essentielles dans la mesure où celles-ci contribuent : (i) à la protection du bassin versant, (ii) à l'étude de la vulnérabilité de sources d'eau autant pour la consommation que pour la production alimentaire, de même (iii) qu'à l'évaluation des actions appropriées dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques.

Certes, la détermination des services hydrologiques, ainsi que la caractérisation du bassin versant peuvent devenir des activités coûteuses au niveau économique et en ressources humaines. À cet égard, la modélisation hydrologique joue un rôle important en contribuant : (i) à la documentation de la dynamique du bassin versant, ainsi qu'à (ii) l'évaluation des événements extrêmes ayant un effet sur le bassin dans un horizon futur. La dynamique du bassin est caractérisée à partir de la modélisation des débits pour l'ensemble des tronçons de la rivière, et des principales variables météorologiques à l'échelle du bassin. Alors que la caractérisation de divers événements peut se faire avec l'estimation de leurs récurrences (*i.e.*, périodes de retour).

Par ailleurs, la mise en place de la modélisation requière des données de différentes caractéristiques du bassin (ex : le relief, l'occupation de sol, le réseau hydrographique, ou le type de sol) afin de discrétiser et de représenter au mieux son territoire. Ces informations peuvent être, parfois, limitées selon différents aspects, à savoir : la localisation, la taille du bassin, les résolutions spatiale et temporelle, ainsi que les chroniques hydrométéorologiques.

Dans le cadre du volet sur l'acquisition des connaissances, la modélisation est basée sur l'intégration du bassin versant de la rivière Portneuf dans les outils de modélisation hydrologique distribuée PHYSITEL/HYDROTEL 4.0. La représentation du bassin a été effectuée à partir de données historiques obtenues via la télédétection et l'imagerie aériennes (ex : LiDAR (*Light Detection and Ranging*) à l'échelle provinciale), ainsi que les travaux d'organismes productrices de données environnementales (ex : CAPSA, IRDA). L'intégration dans l'outil de modélisation sous-entend un calage du modèle distribué dans le but de reproduire au mieux les débits mesurés aux stations hydrométriques localisées dans le réseau hydrographique du bassin. Sur cette base, il devient possible de produire une caractérisation de la dynamique des débits journaliers du réseau hydrographique, ainsi que la caractérisation théorique des plaines d'inondation alluviales à l'échelle du bassin. Cette dernière repose sur l'estimation de la puissance fluviale intrinsèque de chaque tronçon de rivière, ainsi que de la caractérisation de la composition sédimentaire du lit mineur. Dans ce projet, un cadre novateur a été développé afin de considérer l'énergie de transport et la composition sédimentaire du réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Portneuf.

Le présent document est divisé en trois sections principales, la première partie est dédiée à l'approche méthodologique utilisée lors de la mise en place de la modélisation hydrologique ainsi que la caractérisation de la plaine d'inondation alluviale. La deuxième partie présente les résultats et discussions sur le calage du modèle hydrologique HYDROTEL, le régime hydrologique, ainsi qu'une analyse de la classification de l'ensemble des plaines d'inondation du bassin versant de la rivière Portneuf. Finalement, le document rappelle les principaux résultats de l'étude et apporte des recommandations de travaux futurs.

2 Approche méthodologique

Cette section décrit l'ensemble des éléments méthodologiques conduisant à la modélisation hydrologique, ainsi qu'à l'évaluation de la puissance érosive de l'ensemble de tronçons sur le bassin versant de la rivière Portneuf. Les sous-sections suivantes décrivent en détails : (i) la source et le prétraitement des données sources, (ii) l'intégration du bassin versant de la rivière Portneuf dans la plate-forme PHYSITEL, (iii) le calage du modèle hydrologique HYDROTEL, (iv) le calcul de la puissance spécifique fluviale, ainsi que l'algorithme de classement des tronçons.

2.1 Mise en place de la modélisation hydrologique

Cette section décrit les étapes de mise en place de la modélisation hydrologique sur le bassin versant de la rivière Portneuf dans la plate-forme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL.

2.1.1 Discrétisation et caractérisation du bassin versant de la rivière Portneuf à l'aide de PHYSITEL

L'intégration du bassin versant de la rivière Portneuf débute à l'aide du logiciel PHYSITEL (Rousseau et al., 2011). PHYSITEL est un logiciel complémentaire à HYDROTEL qui permet de déterminer la structure d'écoulement du bassin versant ainsi que les unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) nécessaires à la modélisation hydrologique de surface. Ce logiciel est compatible avec les données SIG (Système d'Information Géographique) afin de faciliter le transfert d'information.

La Figure 1 présente les étapes d'intégration dans PHYSITEL. L'orientation de l'écoulement de surface du bassin est établie à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA), d'un réseau hydrographique (rivières et lacs). Le portfolio des données sont complétées par l'occupation du sol, ainsi que de l'information sur les types de sol sur le secteur d'intérêt. Ensuite, PHYSITEL divise le bassin versant en UHRH et plus spécifiquement en versants. Ces unités de drainage de surface sont utilisées pour le calcul du bilan d'eau verticale sur l'ensemble du bassin en tenant compte de l'hétérogénéité spatiale (Turcotte et al., 2003).

Les sections 2.1.1.1 à 2.1.1.4 seront dédiées à présenter les données d'entrée, ainsi que leur méthode d'acquisition. Les sections 2.1.1.5 et 2.1.1.6 présenteront l'orientation de l'écoulement et le découpage en UHRH du bassin de la rivière Portneuf produit par PHYSITEL.

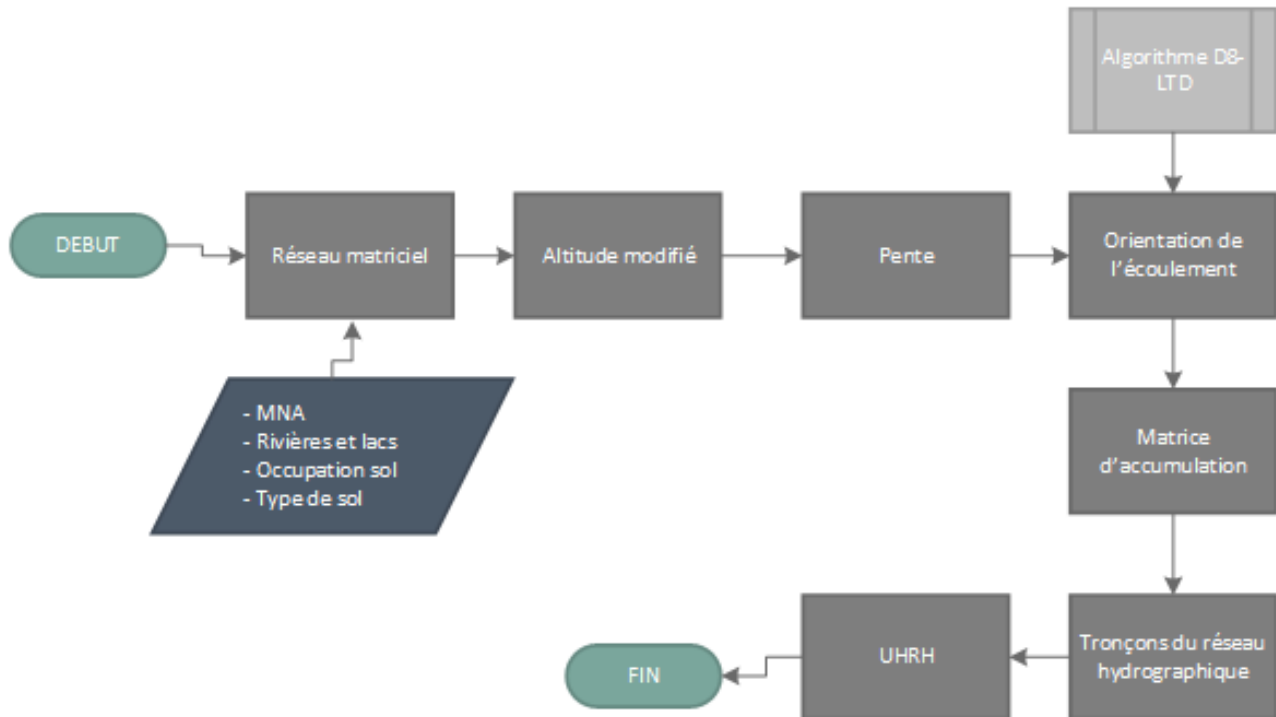


Figure 1. Structure de PHYSITEL 4.0 pour la discrétisation d'un bassin en versants (UHRH).

2.1.1.1 Modèle numérique d'altitude

Le MNA a été récupéré du site internet Données Québec issue du projet d'acquisition de données par LiDAR à l'échelle provinciale (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>). Ces données ont été téléchargées par feuillet 1 : 20 000 (21L12NO, 21L12NE, 21L13SO, 21L13SE, 21L13NO et 21L13NE) pour ensuite être rééchantillonnées à une résolution spatiale de 4 m x 4 m, ce qui est amplement suffisant pour la modélisation hydrologique d'un bassin de 367 km². Ensuite, ces données ont été fusionnées et délimitées selon le bassin versant de la rivière Portneuf à l'aide du logiciel ArcMap™ (version 10.7.1). Les données matricielles du MNA à cette résolution permettent de représenter la topographie de la région, l'aire du bassin, le réseau hydrique et les sous-bassins de façon précise. La Figure 2 présente le MNA du bassin versant de la rivière Portneuf.

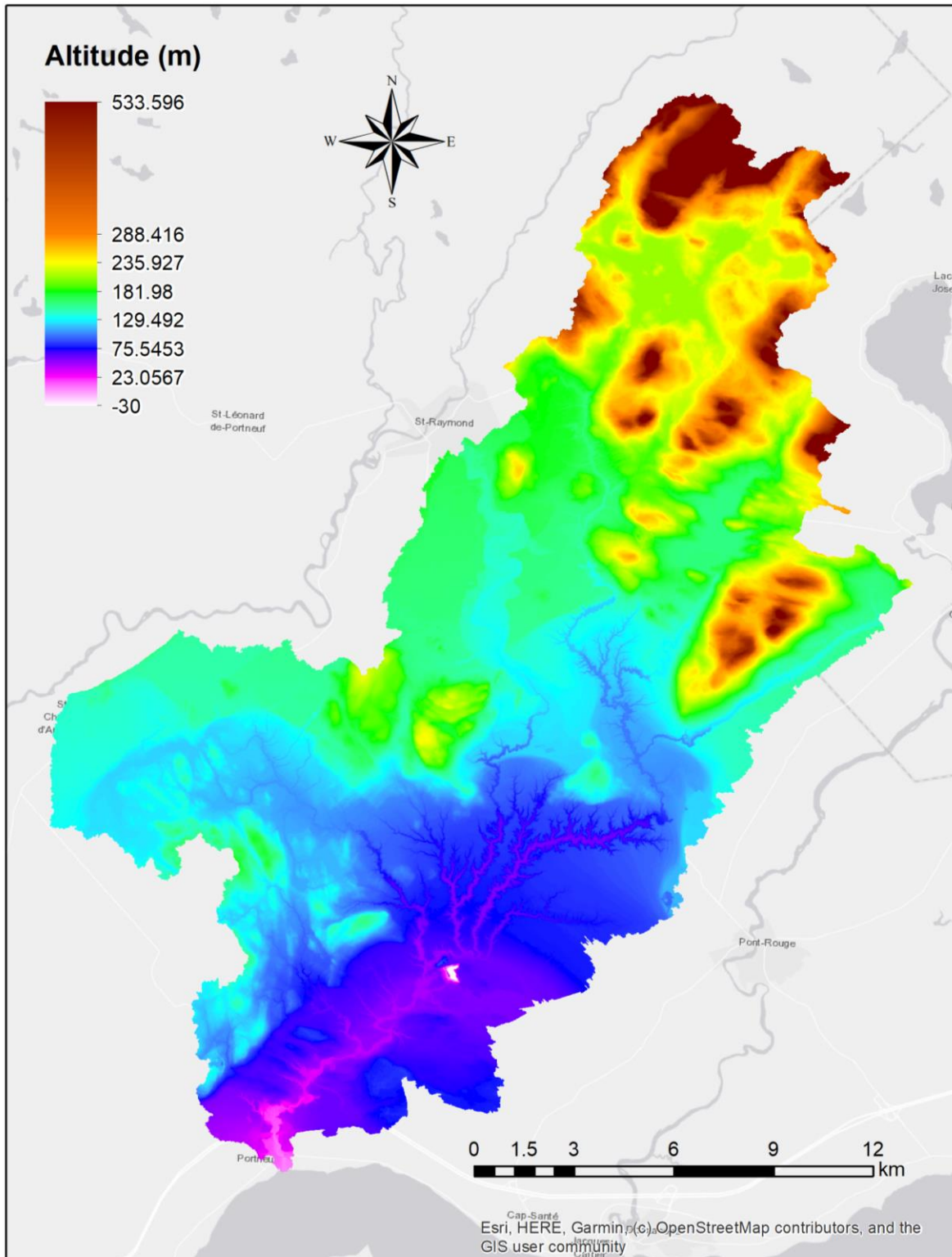


Figure 2. MNA du bassin versant de la rivière Portneuf.

2.1.1.2 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique comprend les rivières et lacs du bassin versant de la rivière Portneuf (Figure 3). La représentation hydrographique en format vectoriel a été récupérée du jeu de données de lits d'écoulements potentiels du site internet Données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/lits-d-ecoulements-potentiels-issus-du-lidar>). À la représentation hydrographique des rivières ont été ajoutées et intégrées celles des lacs issus de la Géobase du Réseau hydrographique du Québec (GRHQ) aussi disponible sur le site Données Québec (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/grhq>).

Dans le cadre de ce projet, seulement les écoulements et cours d'eau permanents ont été utilisées pour la mise en place de la modélisation hydrologique. La rivière Portneuf est le principal cours d'eau d'une longueur d'environ 50 km jusqu'au fleuve Saint-Laurent, près de la municipalité de Portneuf. Les grands tributaires de la rivière Portneuf sont la rivière Gosford, les rivières Blanche, Saint-Jacques, Chaude et le Grand Ruisseau. On dénote également, le lac Sept-Îles et le lac Sergent, les deux principaux lacs du bassin versant (CAPSA, 2012).

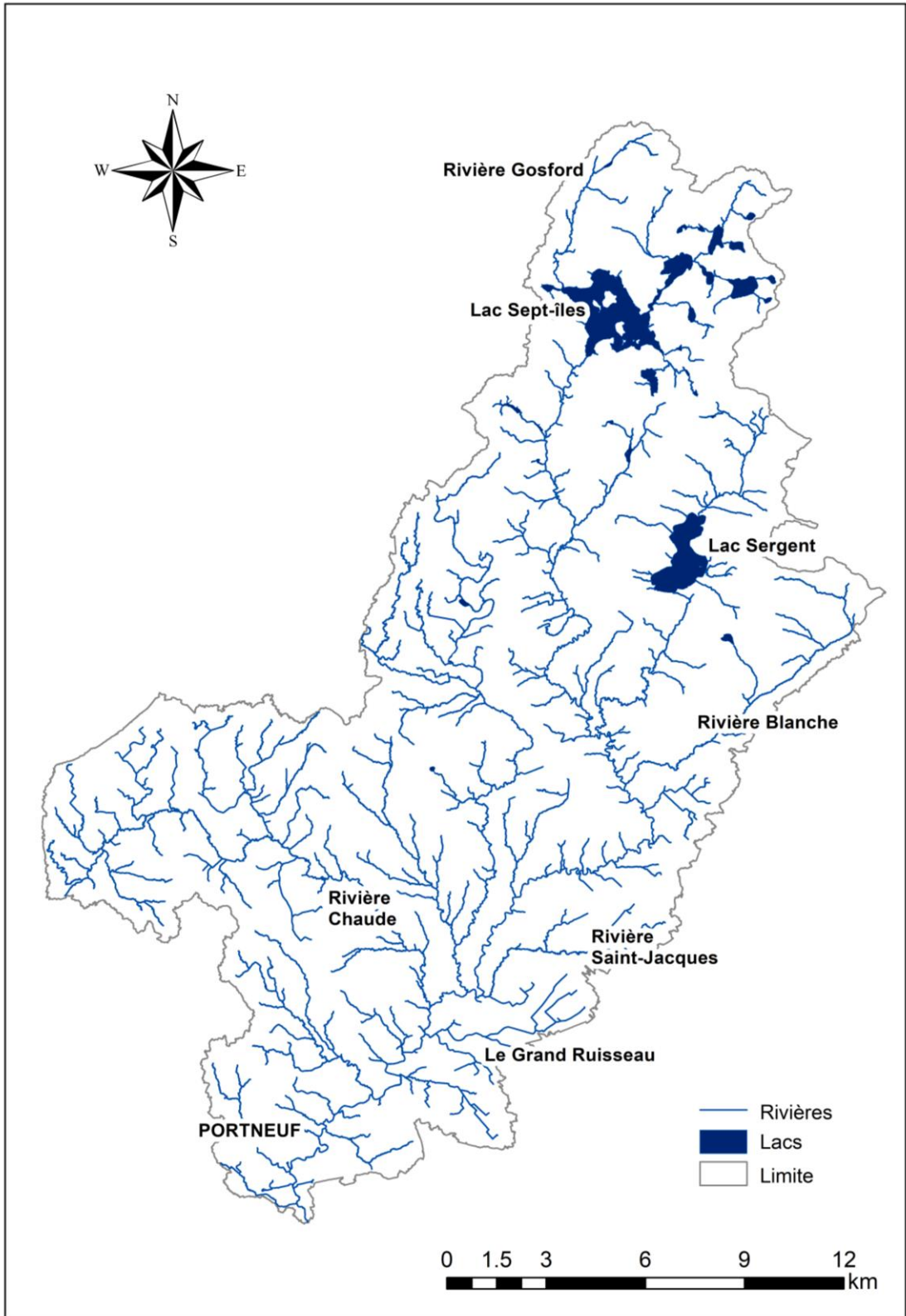


Figure 3. Réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Portneuf

2.1.1.3 Occupation du sol

La définition de l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Portneuf s'Est faite à partir de trois sources de données, à savoir :

- (i) un extrait d'un raster sur l'Utilisation du territoire de l'année 2017 produit par le ministère de l'Environnement et de Lutte contre les changements climatiques (MELCC) (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/utilisation-du-territoire>),
- (ii) un extrait de la Cartographie de l'occupation du sol des Basses-Terres du Saint-Laurent de l'année 2019 dans le cadre du Plan d'Action Saint-Laurent (PASL) du MELCC (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/cartographie-de-l-occupation-du-sol-des-basses-terres-du-saint-laurent>), et
- (iii) une carte écoforestière du Québec méridional de l'année 2017 (feuille 1 : 250 000 – 21L, <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/carte-ecoforestiere-avec-perturbations>).

La carte écoforestière a permis d'extraire le type de couvert forestière sur l'ensemble du territoire divisé en trois classes principales (résineux, feuillu ou mixte) sur la base du cinquième inventaire (MINISTÈRE DES FORÊTS, 2021). Ces cartes ont été fusionnées en utilisant l'outil ArcMap™ (version 10.7.1) pour générer l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Portneuf (Figure 4).

Le Tableau 1 présente les classes d'occupation sol avec l'aire et le pourcentage de superficie occupées par la classe sur l'ensemble du bassin de la rivière Portneuf. Ces résultats montrent que plus de 50% du bassin est constitué de peuplement forestier, 17.5% de sols dédiés à l'agriculture, et environ 4% par des milieux humides.

Tableau 1. Distribution de la couverture des classes d'occupation sur le bassin versant de la rivière Portneuf

Classes d'occupation sol	Aire (km²)	Superficie (%)
Forêts de conifères	31.48	8.58
Forêts de feuillus	99.8	27.2
Forêts mixtes	84.92	23.15
Forêts non déterminées	4.98	1.36
Agriculture	64.42	17.56
Urbain	22.17	6.04
Routes	3.29	0.9
Milieux ouverts	21.43	5.84
Eau	9.05	2.47
Sols nus	1.72	0.47
Eaux peu profondes	0.07	0.02
Marais	0.04	0.01
Marécages	10.13	2.76
Prairies humides	0.16	0.04
Tourbières ombrotrophes (BOG)	0.49	0.13
Tourbières minérotrophes (FEN)	0.87	0.24
Tourbières boisées	9.82	2.68
Milieux humides indéterminés	2.03	0.55
TOTAL	366.88	100

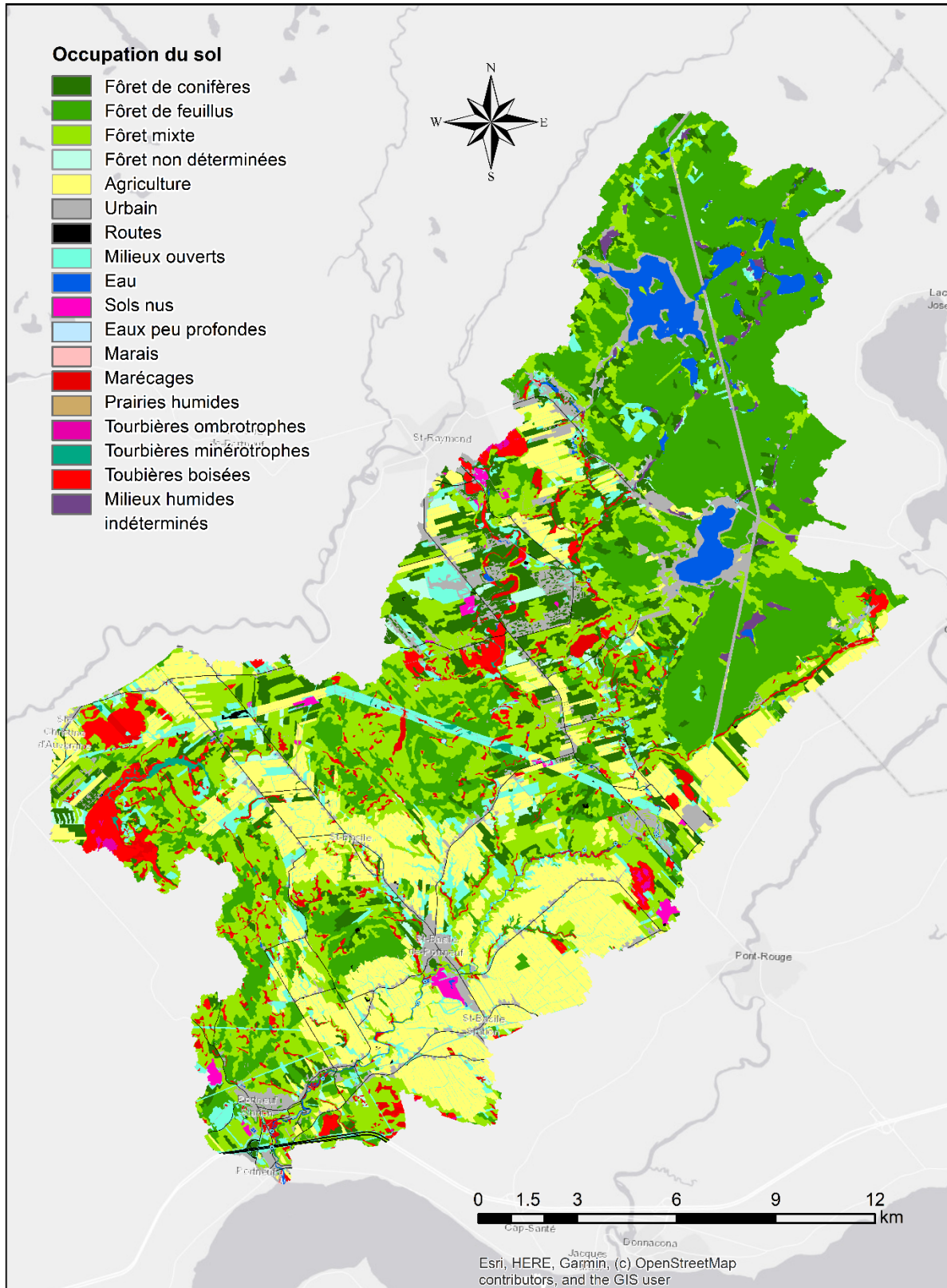


Figure 4. Occupation du sol du bassin versant de la rivière Portneuf

2.1.1.4 Types de sol

Les données sur les types de sol ont été obtenues des études pédologiques de la région 03, Capitale-National, menées par l'Institut de recherche et développement en agroenvironnement (IRDA) et la Direction des ressources informationnelles du ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). La Figure 5 présente le classement pédologique du bassin versant de la rivière Portneuf.

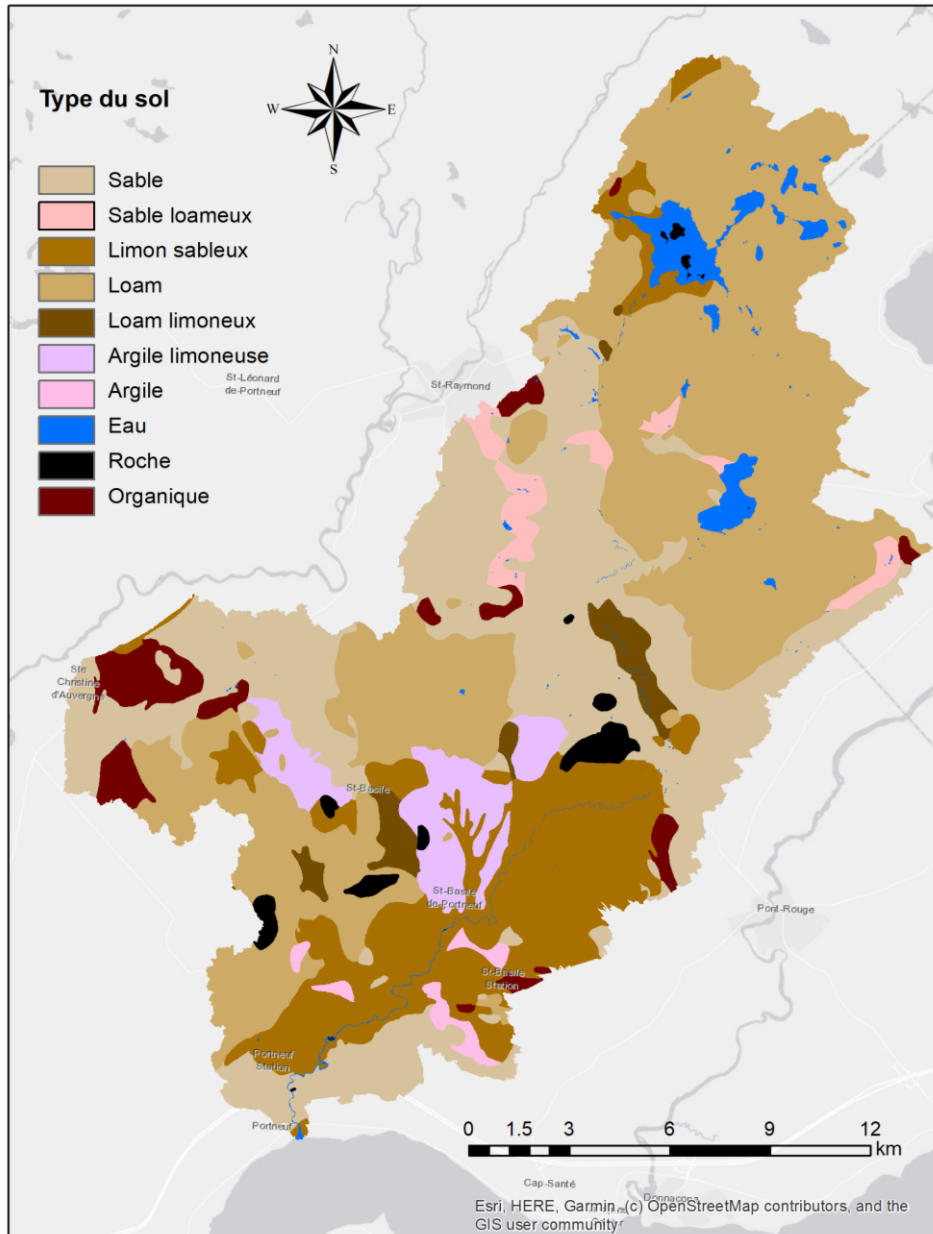


Figure 5. Carte de distribution des types de sol du bassin versant de la rivière Portneuf

Le Tableau 2 présente les types de sol et leurs pourcentages de la superficie sur l'ensemble du bassin. Les résultats mettent en évidence que le bassin versant de la rivière Portneuf est constitué en majorité de sols sableux, limon sableux et loam (environ 85%), alors qu'environ 4.7% de la superficie du bassin est composé d'argile limoneuse et 2.7% de sols organiques.

Tableau 2. Distribution du type de sol sur le bassin versant de la rivière Portneuf

Type de sol	Superficie (%)
Sable	28.05
Sable loameux	2.11
Limon sableux	18.00
Loam	39.37
Loam limoneux	2.11
Limon	0.00
Loam sablo-argileux	0.00
Loam argileux	0.00
Loam limono-argileux	0.00
Argile sableuse	0.00
Argile limoneuse	4.78
Argile	0.55
Eau	1.41
Urbain	0.85
Organique	2.77
Glace	0.00
TOTAL	100

2.1.1.5 Orientation d'écoulement

La Figure 6 présente l'orientation d'écoulement du bassin versant de la rivière Portneuf calculé en utilisant les altitudes modifiées par la présence du réseau hydrographique (Turcotte et al., 2001), la pente, ainsi que l'algorithme D8-LTD (Orlandini et al., 2003; Rousseau et al., 2011). À noter que les altitudes modifiées et la pente ont été calculées à l'aide de PHYSITEL en utilisant le MNA et le réseau hydrographique (voir Figure 1).

L'algorithme D8-LTD permet d'identifier les patrons d'écoulement selon huit (8) directions possibles (8 pixels voisins) de la ligne de partage des eaux jusqu'à l'exutoire du bassin. Cette méthode est caractérisée pour avoir un meilleur temps de calcul en comparaison aux autres méthodes, e.g., D8 (Orlandini et al., 2003). La matrice d'écoulement du bassin est calculée par un processus d'écoulement par voisinage, suite à l'identification de l'exutoire du bassin versant où les pixels voisins s'écoulant vers l'exutoire sont regroupés (Fortin et al., 2001).

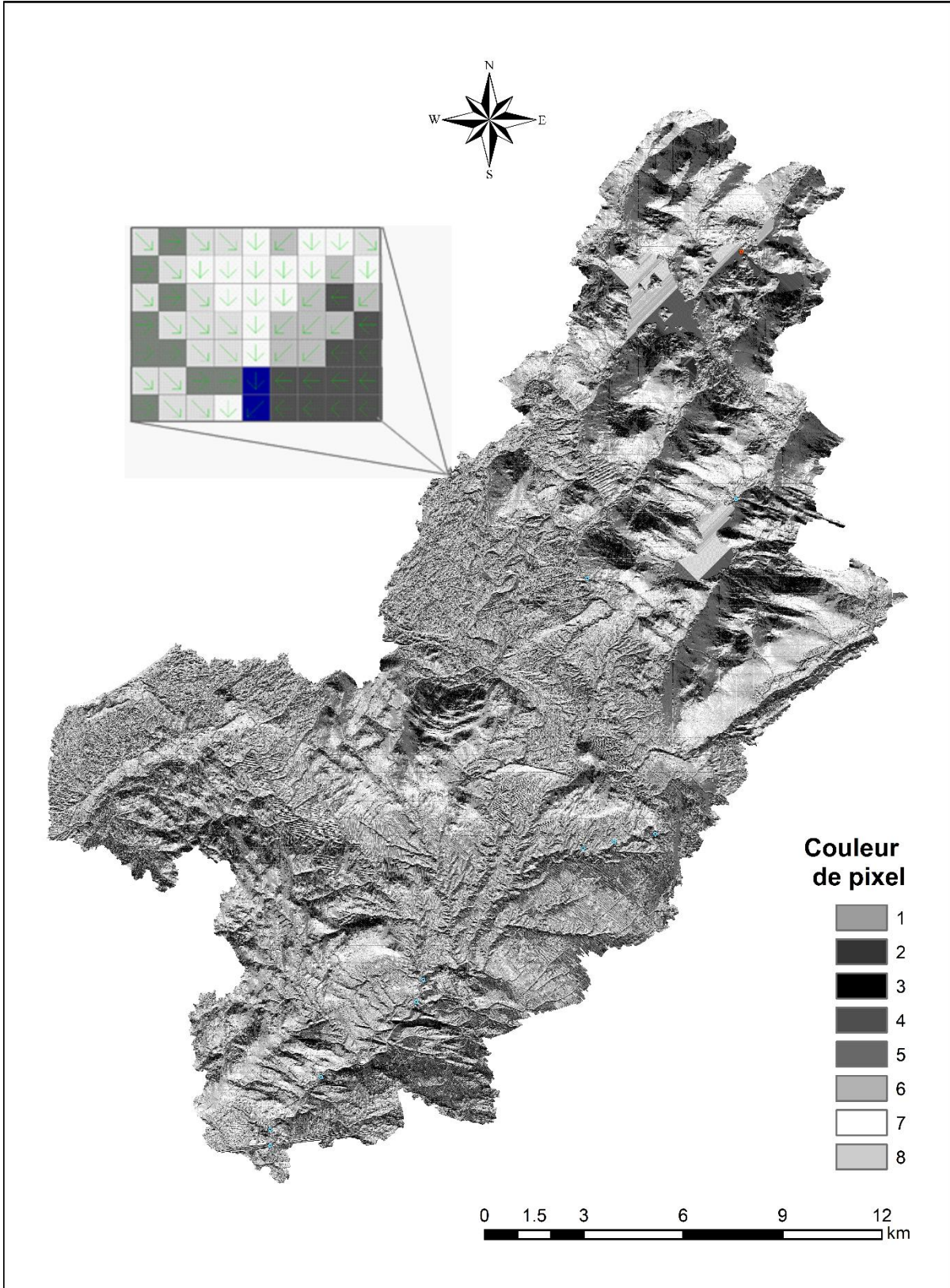


Figure 6. Orientation d'écoulement du bassin versant de la rivière Portneuf.

2.1.1.6 Segmentation en versants (UHRH)

PHYSITEL utilise l'orientation de l'écoulement pour générer les UHRH du bassin versant. Ces unités permettent de caractériser l'hétérogénéité spatiale du bassin, en discrétisant sa superficie en versants. La Figure 7 présente la distribution des UHRH selon la superficie en km². Environ 33% de l'ensemble des versants ont une superficie inférieure à 0.05 km² (5 ha), tandis qu'environ 52% ont une superficie entre 0.05 et 0.35 km² (5 et 35 ha). Cette distribution, composée en majorité par des versants inférieure à 0.35 km², permet une bonne représentation de l'hétérogénéité spatiale du bassin.

Par ailleurs, la création de ces UHRH permet : (i) de limiter le temps de calcul lors de la simulation, et (ii) de garantir une intégration détaillée des cours d'eau dans PHYSITEL (Fournier et al., 2013). La Figure 8 dévoile les 1989 UHRH produites par PHYSITEL; chaque UHRH étant associée à un tronçon.

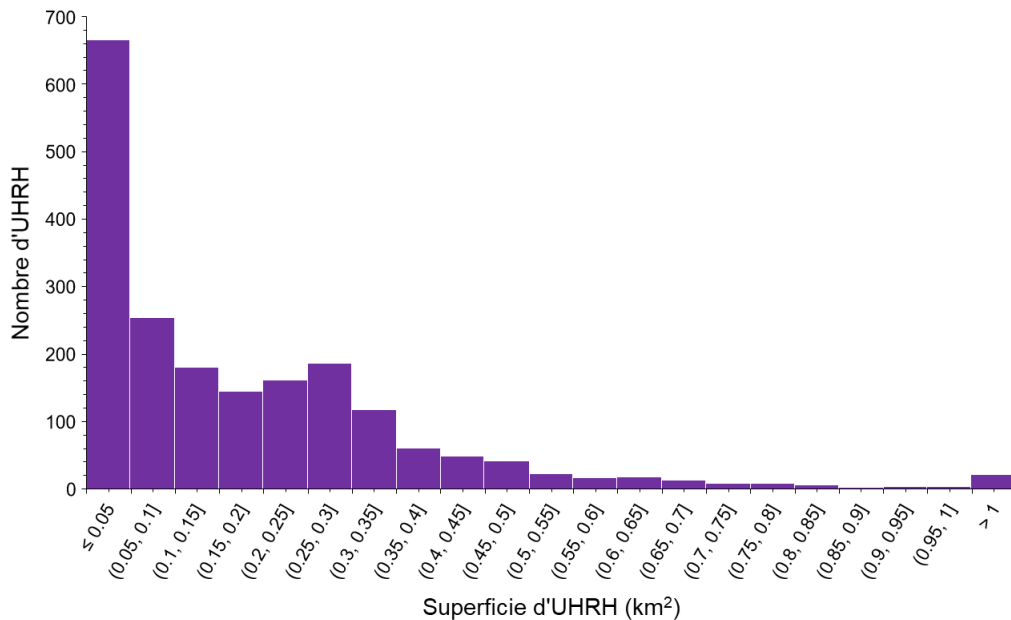


Figure 7. Distribution des superficies des UHRH du bassin versant de la rivière Portneuf.

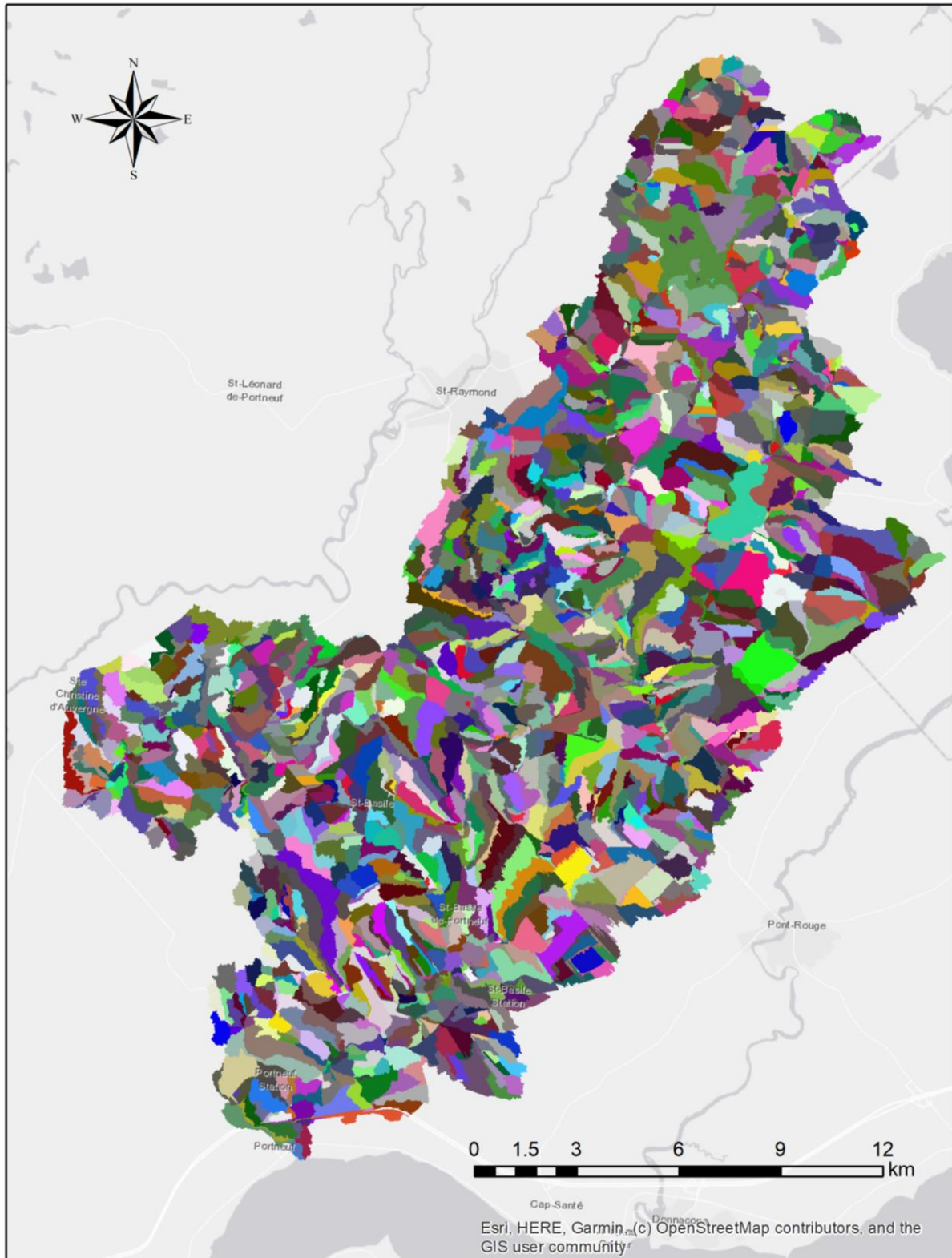


Figure 8. Versants (UHRH) du bassin versant de la rivière Portneuf.

2.1.2 Intégration du bassin versant de la rivière Portneuf au modèle HYDROTEL

Dans le cadre de ce projet, la modélisation hydrologique a été effectuée à l'aide du modèle hydrologique HYDROTEL 4.0. Les sections suivantes sont dédiées à la présentation du modèle, ainsi qu'à l'intégration du bassin versant de la rivière Portneuf.

2.1.2.1 Éléments généraux

HYDROTEL est un modèle hydrologique semi-distribué, autrement dit, les calculs hydrologiques sont faits sur les UHRH du bassin permettant de considérer la variabilité spatiale liées aux caractéristiques du bassin à l'étude, ainsi qu'aux conditions météorologiques qui l'affectent. Outre la compatibilité avec les fichiers générés par PHYSITEL, le modèle HYDROTEL est utilisé par le Centre d'expertise hydrique et barrages du MELCC pour estimer les apports aux barrages exploités par le MELCC et certains cours d'eau de l'archipel de Montréal de même qu'aux stations hydrométriques du Québec méridional (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/prevision/index.asp>). Il est aussi le modèle hydrologique utilisé pour la production de de l'Atlas hydroclimatique du Québec (<https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/Hydraulicite/Qmoy.htm>). Le modèle est aussi utilisé pour la prévision hydrologique aux centrales hydroélectriques du Yukon Energy (Rousseau et al., 2020). Enfin, HYDROTEL est le modèle de prédilection pour plusieurs chercheurs universitaires au Québec (ÉTS, UdeSherbrooke, ULaval, UQTR, UQÀM, UQAC) et à l'international (INRA de Montpellier (France), IMTA (Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua), Universidad Veracruzana (Mexique)) dans le cadre de diverses études, telles que les changements climatiques et l'allocation de prélèvements en eau de communautés mexicaines l'IMTA, la détermination des temps de parcours de l'eau et des temps d'intervention pour protéger la source d'eau potable Château d'Eau de la Ville de Québec, pour n'en nommer quelques-unes.

Actuellement, HYDROTEL comporte neuf sous-modèles contribuant à la modélisation du débit de surface d'une région d'intérêt. Néanmoins, dans le cadre de ce projet seulement sept sous-modèles ont été utilisées (Figure 9). Le Tableau 3 regroupe l'ensemble de sous-modèles hydrologiques avec les algorithmes disponibles à appliquer pour chaque processus. Ces algorithmes sont choisis selon la disponibilité et la typologie des données pour la meilleure représentation au bassin versant ciblé (Fournier et al., 2013).

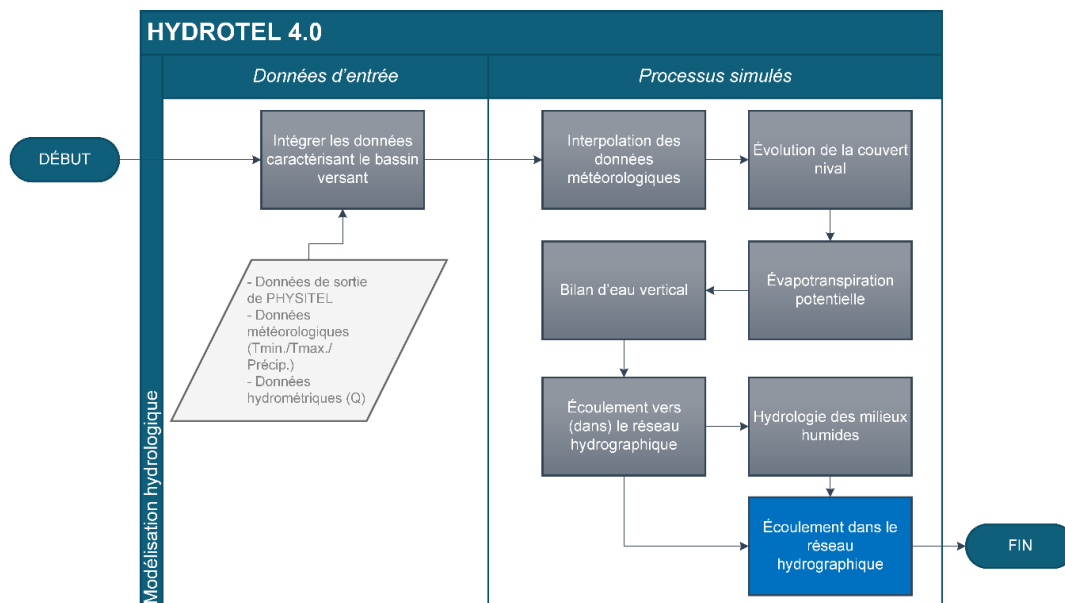


Figure 9. Schéma méthodologique d'HYDROTEL 4.0

Tableau 3. Ensemble de sous-modèles hydrologiques disponibles dans HYDROTEL 4.0

Processus hydrologiques	Algorithmes disponibles
1. Interpolation des données météorologiques	Polygones de Thiessen Moyenne pondérée aux trois stations plus proches Grille de données météorologique
2. Évolution du couvert nival	Degré-jour modifié Degré-jour bande
3. Évapotranspiration potentielle	Hydro-Québec Mc-Guinness Linacre Priestlay-Taylor Thorhtwaite Penman-Monteith
4. Bilan d'eau vertical	Bilan d'eau vertical en trois couches (BV3C) CEQUEAU
5. Écoulement vers le réseau hydrographique	Onde cinématique
6. Écoulement dans le réseau hydrographique	Onde cinématique modifiée
7. Hydrologie des milieux humides	Milieux humide isolés Milieux humide riveraines

2.1.2.2 Stations météorologiques et hydrométriques en support à la modélisation

L'intégration du bassin versant dans HYDROTEL est bonifiée par l'incorporation de données météorologiques (températures minimale et maximale, précipitation) et de données hydrométriques (*i.e.*, débit journalière). Tout d'abord, les données météorologiques ont été récupérées des stations identifiées dans un rayon de 50 km par rapport au village de Saint-Basile-de-Portneuf en utilisant le logiciel statistique R version 4.0.5 (R Core Team, 2020) et le module *weathercan* développé par Environnement et Changement climatique Canada (Lazerte & Sam Albers, 2018). Le Tableau 4 présente les cinq stations météorologiques sélectionnées pour le bassin versant de la rivière Portneuf.

Les critères de sélection étaient : (i) la proximité aux limites du bassin versant, (ii) la disponibilité des données jusqu'à l'année 2021, et (iii) le nombre d'années disponibles (+10 ans). Les données hydrométriques ont été récupérées des données historiques des débits produits par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) du MELCC dans la région hydrographique 05-Saint-Laurent nord-ouest (https://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/historique_donnees/default.asp). La station Portneuf (050702) est la seule station hydrométrique localisée à l'intérieur du bassin versant de la rivière Portneuf. Les débits journaliers de la station étaient disponibles du 30 mai 2002 (2002/05/30) jusqu'au 29 juillet 2021 (2021/07/29).

Étant donné que seulement une station météorologique se trouvait à l'intérieur des limites du bassin versant de la rivière Portneuf, des estimations de précipitation sur une période de 24 heures ont été récupérées d'une analyse générée par le système de l'Analyse Canadienne de Précipitations (CaPA) (Fortin et al., 2015; Mahfouf et al., 2007). Cette approche a été considérée afin d'augmenter la distribution spatiale des précipitations en faisant l'hypothèse d'une meilleure caractérisation des précipitations. À noter que les données de précipitation issues de CaPA sont des estimations basées sur les données observées aux stations météorologiques.

Les estimations de précipitation découlent d'une grille superposée sur le bassin versant à une résolution de 10 km. Trente (30) points d'estimation de précipitation du 2002 à 2017 ont été ajoutés aux données météorologiques dans le cadre de ce projet. Ces données ont servi ultérieurement au calage du modèle hydrologique HYDROTEL. La Figure 10 montre la localisation des cinq (5) stations météorologiques, la station hydrométrique, ainsi que la grille issue de CaPA considérées pour le bassin versant de la rivière Portneuf.

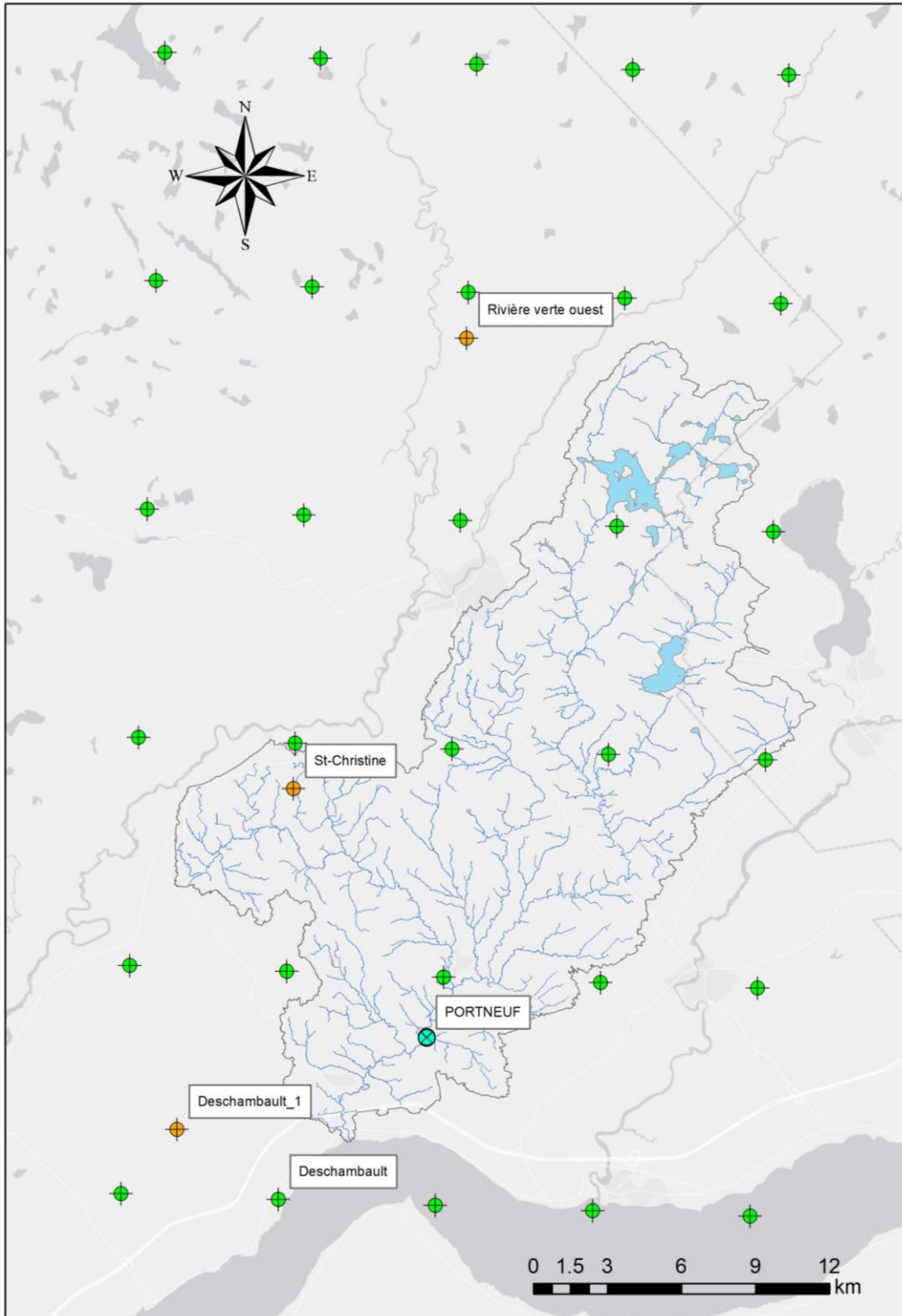


Figure 10. Localisation des cinq (5) stations météorologiques, la station hydrométrique de Portneuf (050702) et la grille de points issue de CaPA pour le bassin versant de la rivière Portneuf

Tableau 4. Stations météorologiques à un rayon de 50 km du Saint-Basile-de-Portneuf.

Station	ID	Latitude	Longitude	Intervalle d'années		Nombre d'années
				Début	Fin	
Ste-Christine	7017000	46°49'00" N	71°55'00" W	01/01/1951	30/06/2021	70
Deschambault	7011982	46°40'00" N	71°55'00" W	01/01/1972	30/06/2021	49
Deschambault1	7011983	46°41'27" N	71°58'18" W	01/01/1998	02/08/2021	23
St-Alban	7016800	46°43'00" N	72°05'00" W	01/01/1950	30/06/2021	71
Rivière vert ouest	7016675	46°59'00" N	71°50'00" W	01/01/1966	30/06/2021	55

2.1.2.3 Approche de modélisation

Le Tableau 5 présente les sous-modèles et les algorithmes utilisés lors de la modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Portneuf. Dans le cadre de ce projet, quatorze (14) paramètres ont été ajustés lors du calage du modèle. Ces paramètres peuvent être identifiés au Tableau 5 (caractères en italique) avec le sigle et les unités associées.

Tableau 5. Processus simulés, algorithmes utilisés et paramètres de calage pour la modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Portneuf

Processus hydrologiques	Algorithmes disponibles
1. Interpolation des données météorologiques	Polygones de Thiessen <ul style="list-style-type: none"> - <i>Gradient vertical de la température (GT, °C/100m)</i> - <i>Gradient vertical des précipitations (GP, mm/100m)</i> - <i>Température de passage de la pluie-en neige (PPN)</i>
2. Évolution de la couvert nival	Degré-jour modifié <ul style="list-style-type: none"> - <i>Seuil de température de fonte dans le milieu de conifères (SFC, °C)</i> - <i>Seuil de température de fonte dans le milieu de feuillus (SFF, °C)</i> - <i>Seuil de température de fonte dans le milieu non-forestier (SFD, °C)</i> - <i>Taux de fonte dans l'air dans le milieu de conifères (TFC, mm/jour °C)</i> - <i>Taux de fonte dans l'air dans le milieu de feuillus (TFF, mm/jour °C)</i> - <i>Taux de fonte dans l'air dans le milieu non-forestier (TFD, mm/jour °C)</i>
3. Évapotranspiration potentielle	Mc-Guinness <ul style="list-style-type: none"> - <i>Coefficient multiplicatif d'optimisation (METP)</i>

4. Bilan d'eau vertical	Bilan d'eau vertical en trois couches (BV3C) <ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur de la couche 1 ($Z1, m$) - Épaisseur de la couche 2 ($Z2, m$) - Épaisseur de la couche 3 ($Z3, m$) - Coefficient de récession ($CR, m/h$)
5. Écoulement vers le réseau hydrographique	Onde cinématique
6. Écoulement dans le réseau hydrographique	Onde cinématique modifiée
7. Hydrologie des milieux humides	Milieux humide isolé Milieux humide riveraine

2.1.2.4 Calage du modèle HYDROTEL

Le calage du modèle HYDROTEL permet de produire un hydrogramme des débits simulés similaire à celui observé à la station hydrométrique choisie pour cet exercice. Il consiste plus précisément à faire varier les valeurs des paramètres du modèle dans un intervalle de valeurs plausibles sur intervalle de plusieurs années (Fournier et al., 2013). Une fois qu'un jeu de valeurs de paramètres optimales est atteint, une simulation avec ce jeu est faite dans un intervalle de temps différent de celui utilisée pour le calage. Cependant, l'étape de validation peut être ignorée en prenant la totalité de la série temporelle de débits pour le calage de modèle. Dans ce cas, l'intérêt porte sur l'inclusion de tous les événements de la série temporelle des données météorologiques dans le processus de calage afin de mieux représenter l'évolution des débits au fil du temps (Arsenault et al., 2018).

Dans le cadre de ce projet, un calage automatique a été effectué en utilisant le logiciel de OSTRICH et l'algorithme de recherche multi-objectifs appelé *Pareto Archived DDS* (PADDS) (Matott, 2016), (Asadzadeh & Tolson, 2009). Pour l'ajustement des 14 paramètres, un nombre de dix (10) lancements et 250 itérations de l'algorithme de recherche ont été réalisés afin de déterminer le meilleur jeu de paramètres menant à un total de 2 500 itérations. Le nombre d'itérations (y) est estimé selon le nombre de paramètres sélectionnés (x) comme suit : $y \approx x^3$.

La qualité de l'ajustement du modèle est quantifiée en utilisant les indicateurs de performance (ou fonctions objectifs) basés sur l'erreur du modèle issue des simulations. Dans ce projet, cinq indicateurs de performances ont été utilisés afin d'évaluer la qualité du calage du modèle, à savoir : le *King-Glupta-efficiency* (KGE), le *Nash-Sutcliffe-efficiency* (NSElog) calculée à partir du logarithme des débits (NSElog), le pourcentage de biais (PBIAS), le coefficient de détermination

(R^2), et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). L'observation de ces indicateurs a été valorisée par un critère visuel portant sur la comparaison de la forme de l'hydrogramme simulé et celui observé avec les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles.

Étant donné la disponibilité des données météorologiques selon deux sources (Environnement Canada et CaPA), cinq scénarios ont été générés en utilisant différents intervalles de temps pour le calage et la validation. Le Tableau 6 regroupe les scénarios utilisés lors du calage du modèle HYDROTEL pour le bassin versant de la rivière Portneuf. À noter que les intervalles de temps du calage ont été définies selon deux critères, à savoir : (i) la proximité aux années où la carte d'occupation de sol a été produite, c'est-à-dire, 2017 à 2019, et (ii) la disponibilité des données météorologiques et hydrométriques. La sélection du meilleur scénario de calage a été basée sur les métriques de performances, c'est-à-dire le KGE sur les débits l'absence d'un couvert de glace sur la rivière, ainsi que le NSElog pour les débits d'étiage sur le bassin.

Tableau 6. Scénarios lors du calage du modèle HYDROTEL

Scénario	Source	Intervalle du temps	
		Calage	Validation
1	CaPA	2007 – 2017	2002 – 2006
2		2003 – 2017	
3	EnvCan*	2007 – 2017	2002 – 2006
4		2003 – 2017	2018 – 2020
5		2003 - 2020	

*EnvCan : Données issue d'Environnement et changement climatique Canada

2.2 Caractérisation des plaines d'inondation alluviales

Dans le cadre de ce projet, une approche conceptuelle a été appliquée pour caractériser les plaines d'inondation alluviales du bassin versant de la rivière Portneuf et ce afin d'identifier les sites potentiellement érosifs sur le territoire. La caractérisation des plaines alluviales est basée sur la relation entre la puissance fluviale et la composition sédimentaire du lit mineur de chaque tronçon de rivière (Nanson & Croke, 1992). La relation de ces deux facteurs permet un suivi de l'évolution morphologique des rivières et ainsi acquérir en première approximation une connaissance sur la formation ou l'érosion des plaines d'inondation alluviales du bassin.

La section suivante décrit les processus de calculs pour déterminer la puissance fluviale d'une rivière, ainsi que le classement utilisé pour identifier les types de plaines d'inondations alluviales.

2.2.1 Puissance fluviale

La capacité de transport sédimentaire d'un cours d'eau peut être estimée à l'aide de la puissance fluviale. Cette puissance permet d'estimer la transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique de l'écoulement dans un cours d'eau (Gordon et al., 2004; Schmitt et al., 2001). Dans ce sens, la puissance fluviale est souvent utilisée pour prédire divers aspects hydromorphologiques, à savoir : les seuils d'érosion, la migration des canaux, la déposition ou transport des sédiments, ainsi que le type de lit mineur (Nanson & Croke, 1992). L'équation 1 présente l'expression mathématique de la puissance fluviale (Ω) en $W m^{-1}$.

$$\Omega = \rho g Q S_e \quad (1)$$

Où,

ρ = densité de l'eau ($1\ 000\ kg\ m^{-3}$)

g = accélération gravitationnelle ($9,8\ m\ s^{-2}$)

Q = débit de plein bord ($m^3\ s^{-1}$)

S_e = pente du cours d'eau ($m\ m^{-1}$)

2.2.2 Puissance spécifique fluviale

La puissance spécifique fluviale (ω) en $W\ m^{-2}$ permet la comparaison du comportement morphodynamique de différents tronçons de rivière ayant une composition sédimentaire similaire (Schmitt et al., 2001). La puissance spécifique est calculée en divisant la puissance fluviale (Ω) par la largeur du lit (Équation 2).

$$\omega = \frac{\Omega}{w} = \frac{\rho g Q S_e}{w} \quad (2)$$

Où,

Ω = Puissance fluviale ($W\ m^{-1}$)

w = Largeur du lit mineur (m)

2.2.3 Débit de plein bord

La notion de débit de plein bord est utilisée pour calculer la puissance fluviale des tronçons délimités par les écoulements et cours d'eau permanents du réseau hydrographique des lits d'écoulements potentiels (<https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/lits-d-ecoulements-potentiels-issus-du-lidar>). Ce débit correspond à la capacité maximale transitant par un tronçon donné avant de déborder dans la plaine d'inondation (Mulvihill et al., 2009). Il est considéré comme le débit d'une rivière qui induit des modifications morphologiques, c'est-à-dire que c'est à ce stade que les seuils de mouvement de la charge de fond du lit mineur ont le plus d'importance (Gob et al., 2014; Mulvihill et al., 2009). C'est pourquoi, le débit de plein bord est utilisé dans le calcul de puissance d'une rivière.

Selon les études, le débit de plein bord peut avoir une récurrence de 1,5 à 5 ans selon le site d'étude, néanmoins, la période de récurrence la plus observée est de 2 ans (Lagacé, 2014; Mulvihill et al., 2009; Wolman & Leopold, 1957). Cela étant, une analyse fréquentielle du débit maximal annuel de plusieurs années doit être faite pour estimer une période de retour quelconque (Équation 3), autrement dit, à une fréquence moyenne d'occurrence de 1,5 à 5 ans.

$$T[x_{(N)}] = \frac{1}{1 - P_N} \quad (3)$$

N = Nombre d'années observées

P_N = Probabilité au non-dépassement

2.2.3.1 Analyse fréquentielle des extrêmes : approche empirique

Dans ce projet, la formule de Cunnane (Équation 3) a été utilisée pour l'analyse selon les débits annuels des années observées (≈ 10 ans) dans la chronique de données hydrométriques (Direction de l'expertise hydrique, 2018). La procédure de calcul est présentée à la Figure 11. Tout d'abord, le débit journalier maximal de chaque année (x_k) a été identifié. Ensuite, ces débits ont été classés par ordre croissant. Une probabilité empirique de Cunnane a été calculée pour chaque extrême selon son rang dans la chronique résultant en une fonction de distribution cumulée dont les axes X et Y correspondent aux probabilités de non-dépassement et aux débits journaliers maximaux en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, respectivement (Figure 12). Une fois que les probabilités empiriques ont été calculées, la probabilité au non-dépassement associé à une période de retour

peut être identifiée, par exemple $T[x_{(N)}] | x_{(N)} = 2 \text{ ans}$, a été calculée à l'aide de l'équation (4) ($P_N = 0,5$). Finalement, le débit journalier maximal annuel d'une période de retour déterminée a été obtenu pour la valeur $P_N = P_k$. Dans le cas où la valeur n'est pas exacte, une interpolation a été appliquée afin d'établir le débit recherché.

$$P_k = \frac{k - 0,4}{N + 0,2} \quad (4)$$

k = Position de l'évènement extrême selon un ordre croissant

P_k = Probabilité empirique au non-dépassement associée à un évènement extrême à une position déterminée (x_k)

N = Nombre d'années observées

Dans le cadre de ce projet, cinq indicateurs hydrologiques ont été ciblés afin de caractériser les débits de plein bord des tronçons du bassin versant de la rivière Portneuf: Les débits journaliers maximaux de périodes de retour de 1,5 ans ($Q_{1,5}$), deux ans (Q_2), trois ans (Q_3), quatre ans (Q_4) et cinq ans (Q_5).

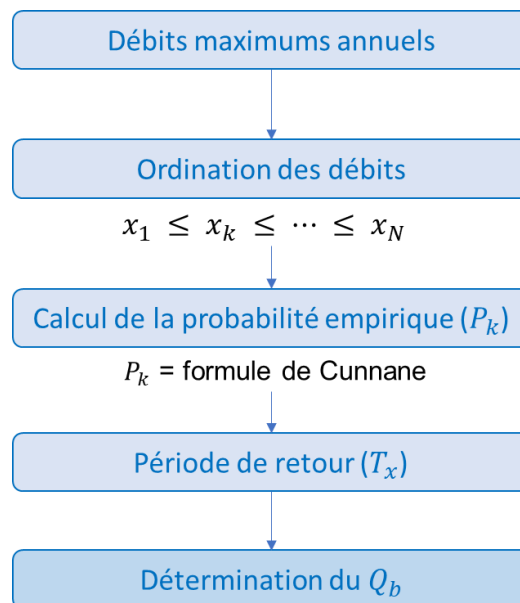


Figure 11. Procédure de calcul des indicateurs hydrologiques de différentes périodes de retour

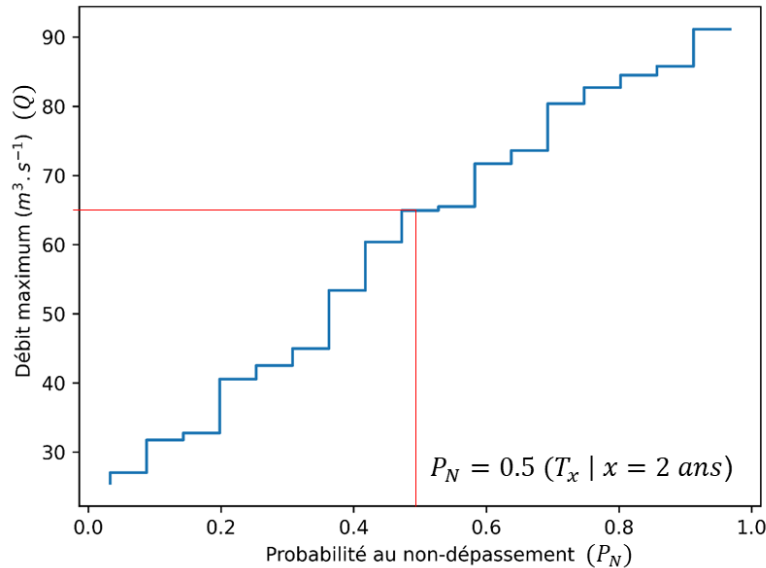


Figure 12. Fonction de distribution cumulée selon la probabilité empirique de Cunnane

2.2.4 Classement des types des plaines d'inondation alluviales

La classification des plaines alluviales varie selon la région, ainsi que selon les critères utilisés. Dans ce projet, une classification des plaines inondables basée sur l'énergie proposé par Nanson and Croke (1992) a été utilisée pour le bassin versant de la rivière Portneuf (Tableau 7). Cette classification comprend deux étapes. Tout d'abord, les plaines inondables sont classifiées selon l'énergie de transport ou déposition sédimentaire, à savoir : (i) les plaines non cohésives à énergie élevée, (ii) les plaines non cohésives à énergie modérée, et (iii) les plaines cohésives à énergie faible. Par la suite, les plaines inondables sont discrétisées selon la composition sédimentaire du lit mineur, ainsi que la valeur de la puissance fluviale spécifique.

Comme la composition sédimentaire du lit mineur n'était pas disponible, nous avons dû faire l'hypothèse que cette composition est, probablement, similaire au type de sol sous-jacent, c'est-à-dire celui des UHRH adjacentes.

Tableau 7. Classification des plaines inondables basée sur l'énergie du cours d'eau. Adapté de Nanson and Croke (1992) et Besnard (2016)

Classe	Composition sédimentaire	Ordre	Description
Non cohésive à énergie élevée (Type A) $(\omega \geq 300 W m^{-2})$	Rochers et gravier mal triés, <i>Buried soils</i> $(\omega \geq 1000 W m^{-2})$	A1	Confinée à texture grossière
	Gravier basal et du sable abondant avec recouvrement limoneux $(300 \leq \omega \leq 1000 W m^{-2})$	A2	Confinée à accrétion verticale sableuse
	Boues intercalées de strates sableuses $(300 \leq \omega \leq 600 W m^{-2})$	A3	Non confinée à accrétion verticale sableuse
	Sable, limon, et sols organiques $(\omega \approx 300 W m^{-2})$	A4	Avec recouvrements et comblements de méandres
Non cohésive à énergie modérée (Type B) $(10 \leq \omega \leq 300 W m^{-2})$	Gravier, sable, et limon $(50 \leq \omega \leq 300 W m^{-2})$	B1	Avec rivière à tresses
	Gravier, sable, limon et sols organiques $(30 \leq \omega \leq 200 W m^{-2})$	B2	Avec rivière divagante à lit de graviers
	Gravier, sable, limon $(10 \leq \omega \leq 60 W m^{-2})$	B3	Avec rivière à méandres et migration latérale
Cohésive à énergie faible (Type C) $(\omega \leq 10 W m^{-2})$	Limon abondant et de l'argile avec sols organiques	C1	Avec chenal unique latéralement stable
	Gravier et sable avec du limon et de l'argile abondants	C2	Avec rivière anastomosée

3 Résultats et discussions

Cette section présente l'ensemble des résultats issus de la modélisation hydrologique et la caractérisation des plaines inondables du bassin versant de la rivière Portneuf.

3.1 Débits observés à la station Portneuf

Les débits journaliers moyens observés à la station Portneuf (050702) avec les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles caractérisant la période de 2003 à 2020 sont présentés à la Figure 13. Notamment, l'hydrogramme montre le régime hydrologique du bassin versant de la rivière Portneuf, un bassin dans une région neigeuse. Le bassin est caractérisé par deux types de crues, typique d'une région du Québec méridionale, une crue printanière arrivant vers la mi-mars, et des crues estivales avec moins d'intensité tout au long de l'été et l'automne jusqu'au début de l'hiver. La pointe de la crue printanière est arrivée en moyenne vers la mi-avril dont le débit moyen est de l'ordre de $32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, alors que les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles atteignent $18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et $68 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivement. Par ailleurs, les crues estivales et automnales sont plutôt intermittentes débutant vers la mi-mai jusqu'au début de la session hivernale avec des débits moyens entre $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Pendant cette période, les débits observés à la station Portneuf ont atteint un minimum de $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et un maximum de $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se produisant en octobre.

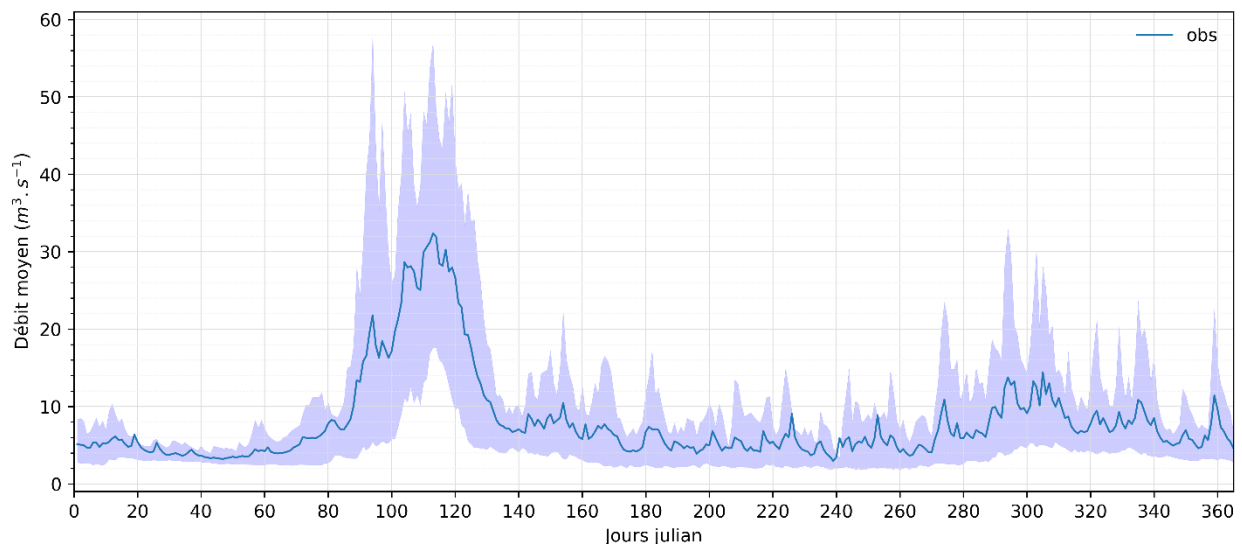


Figure 13. Hydrogramme des débits journalier moyens observés à la station Portneuf (050702) avec les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles (toile mauve) de l'année 2003 à 2020.

3.2 Calage du modèle

Le Tableau 8 regroupe le sommaire des indicateurs de performances utilisés dans le calage du modèle hydrologique dans HYDROTEL selon cinq scénarios. Pendant l'étape du calage, les résultats montrent que les valeurs du KGE et du NSElog ont été supérieures à 0.70 mettant en évidence un ajustement du modèle satisfaisant par rapport aux débits journaliers moyens et d'étiage observés à la station Portneuf. Le pourcentage du biais du modèle dans le calage a varié de 0.053% à 3.41%, illustrant une faible surestimation des débits simulés. Le coefficient de détermination a été supérieur à 0.80, ce qui indique une bonne représentation de la variabilité des débits observés. De même, le RMSE a varié de 15.5% à 29.3% par rapport aux débits moyens observés.

Les périodes de validation du modèle ont permis une évaluation plus critique du meilleur scénario pour la modélisation hydrologique selon les données météorologiques d'entrée. Dans le cas où les données d'entrée de précipitation ont été issues de CaPA, la validation du modèle entre les années 2002 à 2006 est caractérisée par une surestimation du modèle avec un PBIAS de 6.22% par rapport à celle obtenue pendant le calage (+3%). Néanmoins, un bon compromis entre les indicateurs de performance KGE (0.87) et NSElog (0.89) a été atteint en utilisant toute la chronique d'années disponibles pour les estimations des précipitations (CaPA). Le PBIAS, le R^2 et le RMSE caractérisent également de bons résultats.

Par ailleurs, les périodes de validation en utilisant les données d'entrée de précipitation issues d'Environnement et changement climatique Canada (EnvCan) ont montré des valeurs inférieures à la moyenne avec un KGE de 0.69 et 0.64, et un NSElog de 0.73 et 0.79. Cependant, un bon compromis entre le KGE (0.90) et le NSElog (0.92) a été observé en utilisant toute la chronique d'années disponibles. Pour ce scénario, les valeurs du PBIAS, R^2 et RMSE correspondent à des valeurs très satisfaisantes. Notamment, les périodes du calage et de validation en utilisant les données d'Environnement et changement climatique Canada n'ont pas été les mêmes étant donné le manque des données hydrométriques à la station Portneuf pendant certaines périodes.

Dans le cadre de ce projet, il a été déterminé que l'utilisation des données météorologiques issues d'Environnement et changement climatique Canada en considérant toute la chronique d'années du 2003 à 2020 (scénario 5) permettait d'obtenir le meilleur calage du modèle hydrologique HYDROTEL pour le bassin versant de la rivière Portneuf.

Tableau 8. Qualité de l'ajustement du modèle selon cinq scénarios par rapport aux débits journaliers observés à la station hydrométrique de Portneuf

Données	Scénario	Étape ^a	N	Intervalle	KGE	NSElog	PBIAS (%)	R ²	RMSE (m ³ s ⁻¹)	\bar{X} ^b
CaPA	1	C	11	2007-2017	0.788	0.880	3.414	0.828	2.735	9.345
		V	5	2002-2006	0.878	0.847	6.226	0.838	3.055	8.650
EnvCan	2	C	15	2003-2017	0.872	0.896	0.759	0.876	2.298	9.260
	3	C	11	2007-2017	0.968	0.907	0.053	0.942	1.589	9.345
		V	5	2002-2006	0.694	0.733	-1.036	0.722	4.007	8.650
	4	C	15	2003-2017	0.927	0.875	4.382	0.909	1.971	9.260
		V	3	2018-2020	0.645	0.797	-15.318	0.834	4.393	10.011
5	C	18	2003-2020	0.909	0.929	2.947	0.957	1.459	9.387	

^a C : étape de calage, V : étape de validation

^b \bar{X} : La moyenne de débits observés

3.3 Portrait hydrologique du bassin versant de la rivière Portneuf

Une fois le modèle calé, il est possible de faire différentes analyses à partir de l'hydrogramme de débits journaliers moyens simulés, le régime de précipitations, le rapport entre les précipitations et le ruissellement total d'une aire drainée dans le bassin, ainsi que le bilan hydrologique cumulatif moyen de différentes variables hydrologiques.

3.3.1 Hydrogramme des débits journaliers moyens

L'hydrogramme de débits journaliers moyens observés et simulés, ainsi que les 10^{ème} et 90^{ème} percentiles des débits observés à la station Portneuf (050702) de l'année 2003 à 2020 sont présentés à la Figure 14. Les lignes rouge pointillées indiquent l'intervalle des mois sans couvert de glace sur la rivière durant laquelle le modèle a été calé (du mois d'avril au mois de novembre). Ainsi, la période hivernale a été enlevée du calage étant donnée les incertitudes des données hydrométriques observées de cette période. Les indicateurs de performance pour l'hydrogramme simulé ont été présentées à la section 3.2. Le graphique montre que le modèle reproduit très bien les étiages hivernaux et ce même si cette période n'a pas servi au calage, la crue printanière débutant vers le mois de mars, ainsi que les crues estivales jusqu'au mois de septembre. En général, les débits journaliers moyens simulés sont similaires à ceux observés, et ils sont tous observés à l'intérieur des 10^{ème} et 90^{ème} percentiles des débits observés.

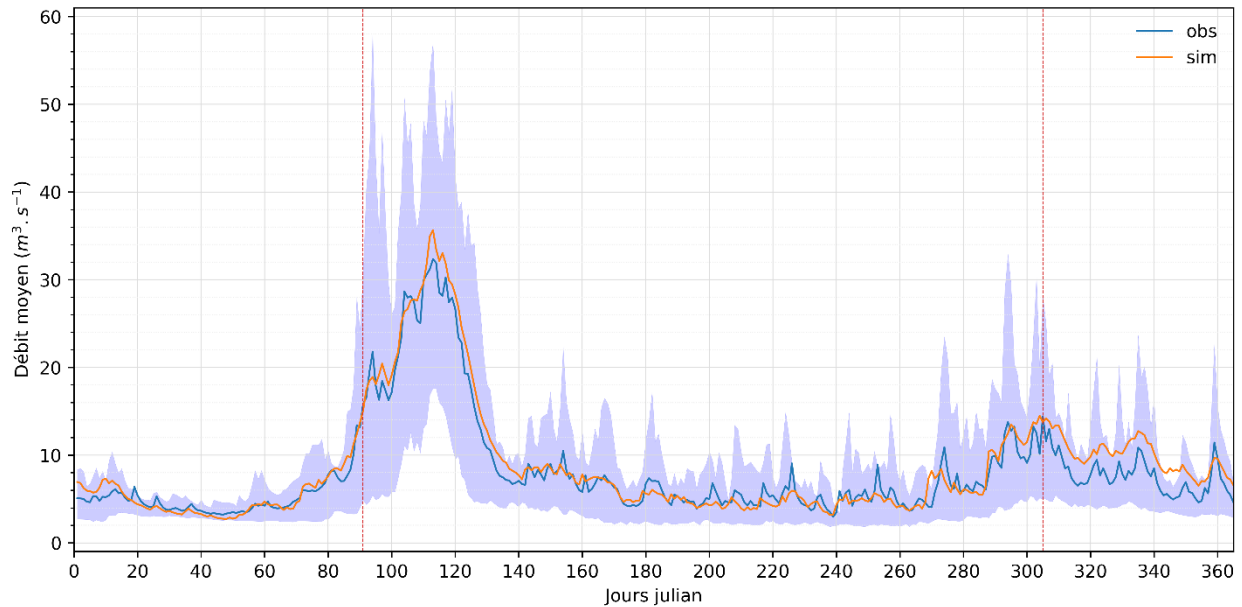


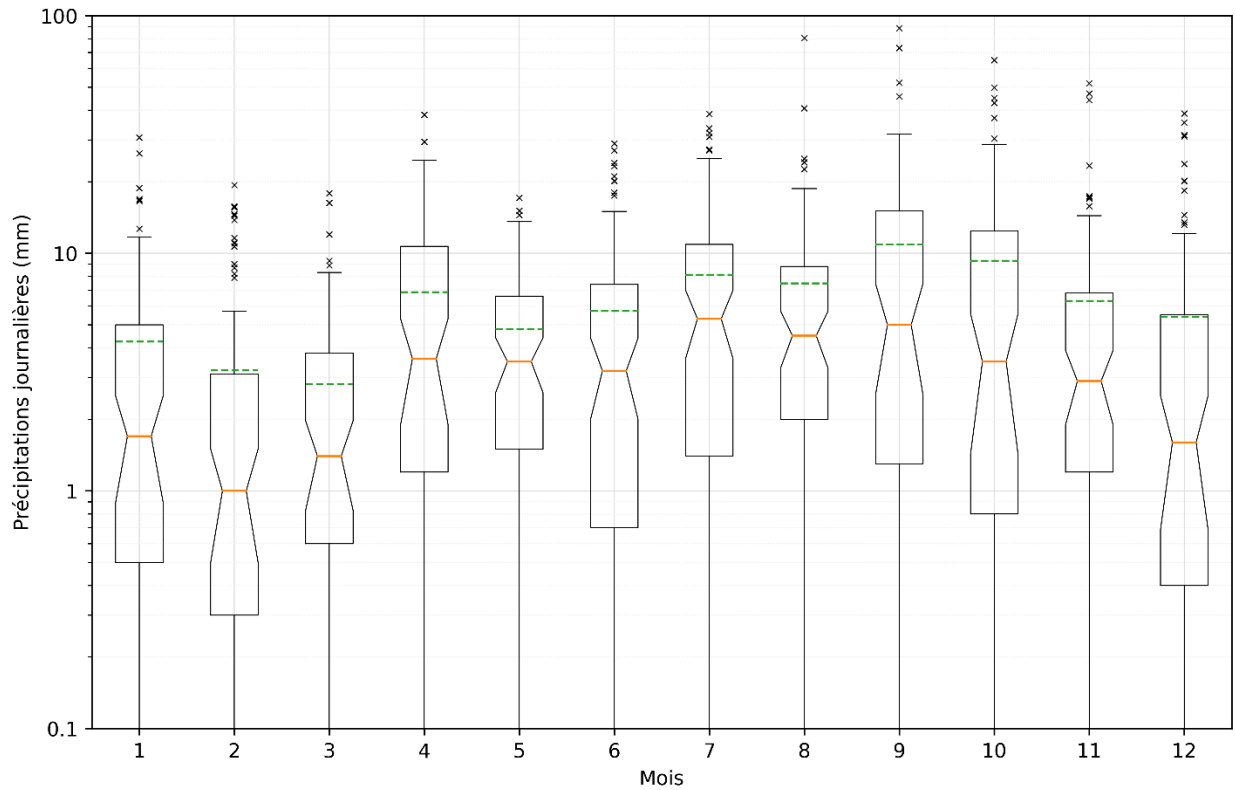
Figure 14. Hydrogramme des débits moyens observés (ligne bleue) et simulés (ligne orange) pour la station Portneuf (050702) avec les 10ème et 90ème percentiles observés (tuile bleu pâle) de l'année 2003 au 2020.

3.3.2 Régime de précipitations

La Figure 15 et Figure 16 présentent les distributions des précipitations journalières et totales mensuelles sur le bassin versant de la rivière Portneuf délimité par la station hydrométrique Portneuf (050702). Les précipitations ont été estimées pour une aire drainée d'environ 331 km² à partir de la modélisation hydrologique, c'est-à-dire en ayant pour exutoire la station hydrométrique. Dans les deux figures, les boîtes à moustaches présentent la médiane (ligne orange), les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles (p25 et p75), la distance entre les deux percentiles, les valeurs minimales et maximales, les valeurs singulières au-delà des moustaches, ainsi que la moyenne (ligne verte pointillée).

Le régime de précipitations met en évidence la variabilité interannuelle des précipitations dont les valeurs sur une base journalière peuvent varier grandement d'un mois à l'autre et à l'intérieur d'un mois, par exemple de 0.1 mm jusqu'à 30 mm au mois de janvier. En termes de précipitations journalières maximales à l'échelle du bassin selon 17 ans de données, les mois d'août à octobre ont été identifiés comme les mois avec les précipitations plus importantes de l'ordre de 70 à 90 mm. Certes, la période estivale est souvent influencée par la queue des ouragans remontant le nord-est américain; contribuant parfois aux conditions extrêmes dans le bassin.

Au niveau des précipitations totales mensuelles, il est pertinent de mentionner que les plus faibles (~ 30 à 40 mm) sont observées durant les mois de décembre à mars. La période hivernale est caractérisée par une atmosphère ayant une plus faible capacité de stocker de la vapeur d'eau, diminuant les précipitations pendant cette période. Par ailleurs, des précipitations moyennes les plus importantes sur le bassin (~ 130 à 150 mm) sont observées dès le mois de juin jusqu'au mois de septembre avec des valeurs supérieures à 200 mm dans certains mois.



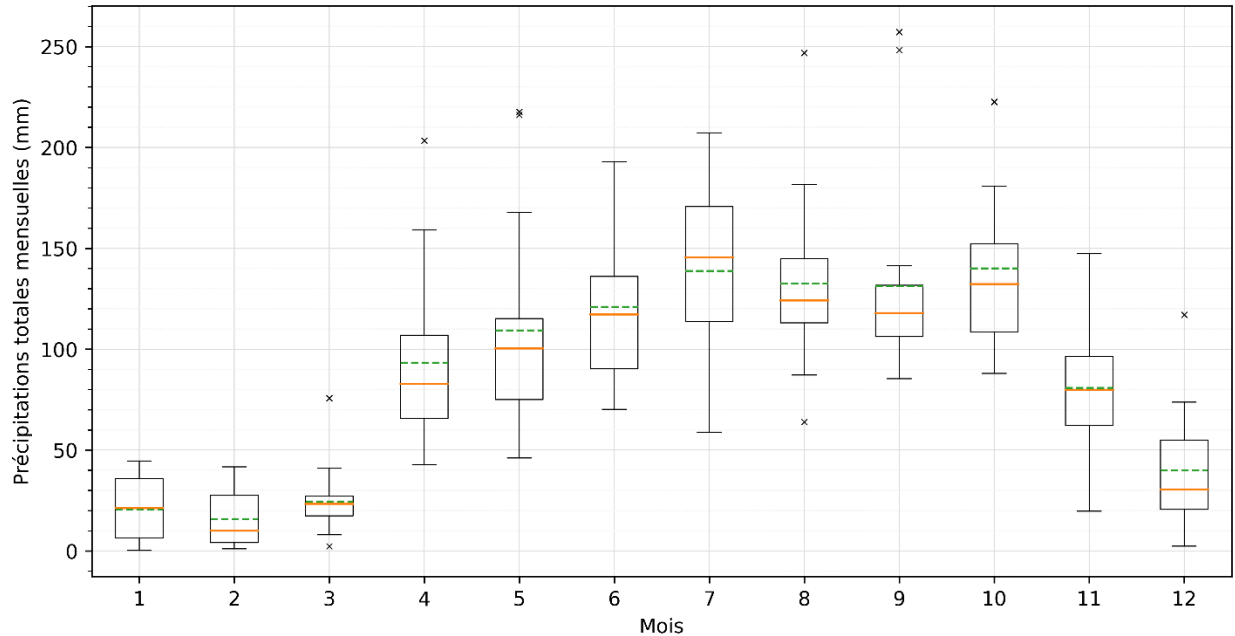


Figure 16. Régime de précipitation totale mensuelle

3.3.3 Coefficient de ruissellement (K)

Le coefficient de ruissellement (K) annuelle permet d'estimer globalement la réponse du bassin face aux précipitations. Cette analyse demeure pertinente dans la mesure où cela donne un aperçu du bilan d'eau à l'échelle du bassin. Ce coefficient est tout simplement le quotient de l'écoulement total annuel mesuré à la station hydrométrique de Portneuf sur la précipitation annuelle en amont. Dans le cadre de ce projet, les coefficients de ruissellement par année (k_i), ainsi que sa distribution au fil des années, ont été calculés pour le bassin de la rivière Portneuf (Figure 17).

Un coefficient de ruissellement moyen de 0.6 a été calculé pour le bassin versant de la rivière Portneuf, autrement dit 60% de la précipitation qui tombe en amont s'est retrouvé à l'exutoire du bassin. C'est ainsi que la précipitation restante peut participer à d'autres processus hydrologiques à l'échelle du bassin comme l'évaporation ou le stockage de l'eau dans le bassin. D'ailleurs, l'existence des différentes classes d'occupation du sol dans le bassin (voir section 2.1.1.3) expliquent la variabilité interannuelle observée du coefficient de ruissellement.

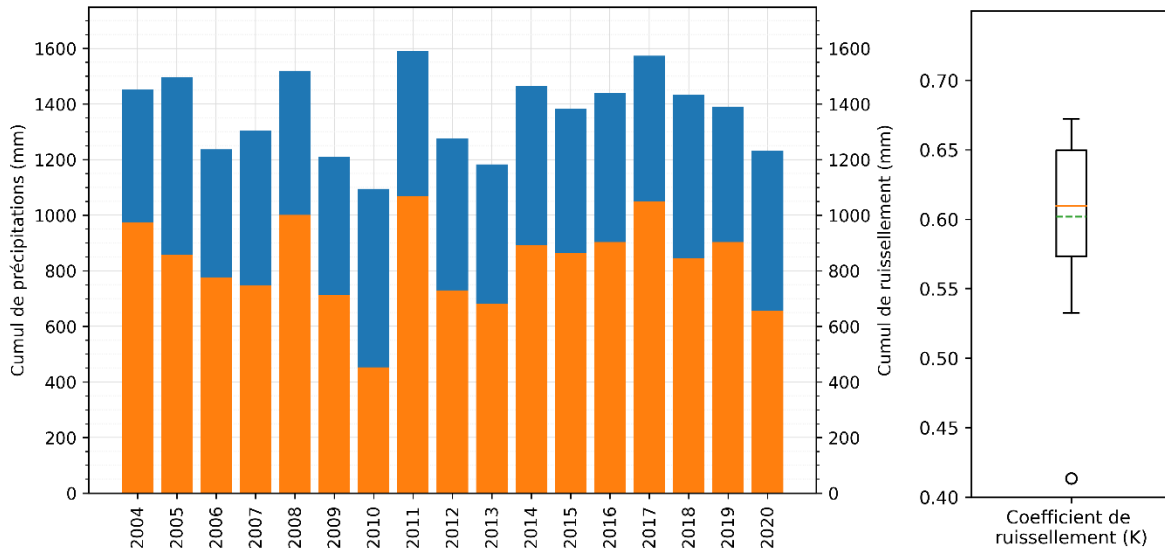


Figure 17 Quotient de l'écoulement annuel moyen (bars en orange) et la précipitation annuelle moyenne en amont (bars en bleu), ainsi que le coefficient de ruissellement du bassin versant de la rivière Portneuf.

3.3.4 Bilan hydrologique cumulatif moyen

La Figure 18 présente le bilan hydrologique cumulatif moyen à l'échelle du bassin de la rivière Portneuf. Le bilan illustre l'évolution de divers variables hydrologiques représentant la dynamique du bassin dans une année hydrologique (du 1^{er} octobre au 30 septembre). L'année hydrologique est utilisée parce que celle-ci permet une meilleure visualisation de l'accumulation de la neige au sol pendant la période hivernale.

Le graphique met en évidence la fluctuation intra-journalière et intra-annuelle des températures moyennes minimales et maximales à l'échelle du bassin. D'un part, des températures moyennes minimales en dessous de 0 °C sont observées du mois de novembre jusqu'au mois d'avril; alors que la température moyenne minimale la plus basse est observée à la mi-janvier avec des températures d'environ -22 °C, toujours à l'échelle du bassin et non en une localisation donnée où elle pourrait être plus basse encore. D'autre part, les températures moyennes maximales au-dessus de 0 °C sont observées du mois de mars jusqu'à la fin du mois de novembre; la valeur la plus élevée étant atteinte au mois de juillet avec des valeurs d'environ 26 °C. Ces températures sont représentatives du climat tempéré du Québec méridionale.

Par ailleurs, le bilan hydrologique annuel moyen à l'échelle du bassin délimité par la station hydrométrique de Portneuf illustre l'évolution des précipitations totales (PPT : liquide et solide) du 1^{er} octobre jusqu'au 30 septembre avec une valeur cumulative respective de 1361 mm. Une évapotranspiration réelle et un écoulement à l'échelle du bassin indique une augmentation progressive atteignant une valeur cumulative respective d'environ 558 mm et 764 mm à la fin de l'année. L'accumulation de la neige au sol débute au mois de novembre, atteignant un sommet à la mi-mars d'environ 250 mm. À partir de ce point, les températures maximales au-dessus de 0 °C permettent d'initier la fonte printanière. Par conséquent, une augmentation accélérée de l'écoulement à l'exutoire du bassin, ainsi qu'une augmentation progressive de l'évapotranspiration réelle s'amorcent; mettant en évidence l'activité hydrologique du bassin du printemps jusqu'à l'automne.

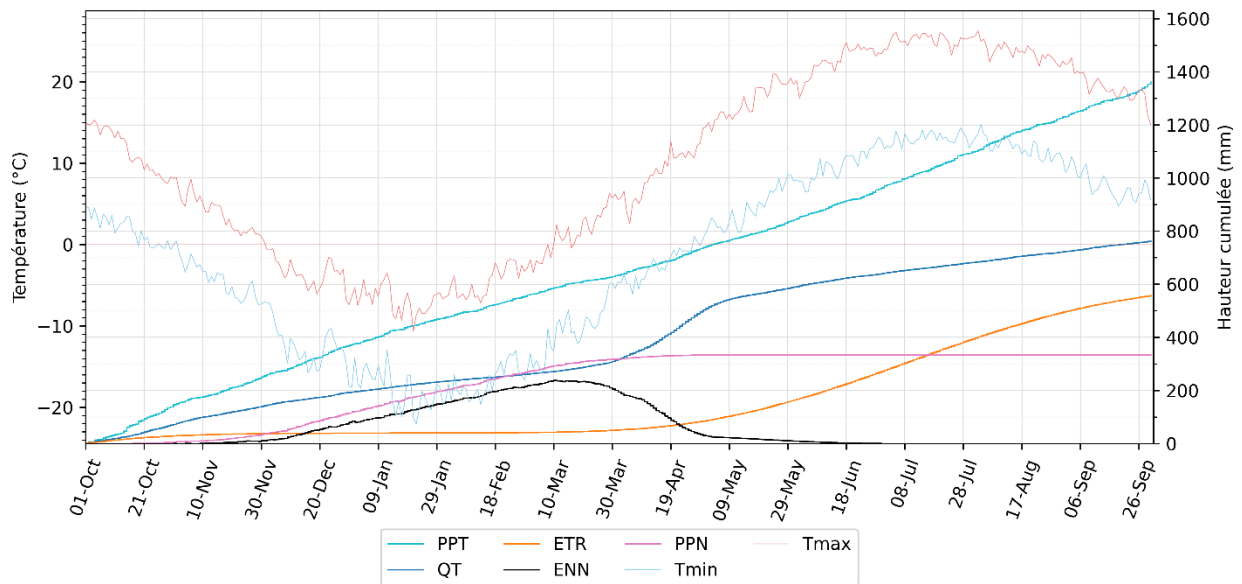


Figure 18. Bilan hydrique cumulatif moyen selon une année hydrologique (1^{er} octobre au 30 septembre) à l'échelle du bassin versant de la rivière Portneuf. (PPT : Précipitation liquide et solide, ETR : Evapotranspiration réelle, QT : Écoulement observé, ENN : Équivalent en eau de la neige, PPN : Précipitation solide, Tmin : Température minimale, Tmax : Température maximale)

3.4 Classement de la plaine d'inondation alluviale

Les données issues de la modélisation hydrologique, ainsi que les résultats du classement de la plaine inondable alluviale sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Portneuf sont disponibles dans le fichier Excel « *Floodplains classification BV Portneuf* » à l'onglet « *Floodplains* ». Le fichier inclut l'index du tronçon (*Id_river*), la pente (*slope*), la longueur du tronçon (*length*), la largeur du tronçon (*width*), les débits de plein bord selon cinq périodes de retour différentes (*Q*), la puissance fluviale (Ω), la puissance fluviale spécifique (ω), l'index des classes des plaines inondables (*Classes*) où l'index 1 correspond aux plaines de type C, l'index 2 aux plaines inondables de type B, et les index 3 et 4 aux plaines inondables de type A; ainsi que les sous-classement des plaines inondables (*Subclass*) sur l'ensemble du bassin.

Cette section présente l'analyse de ces données d'un point de vue générale, ainsi que certaines remarques issues de la classification des plaines inondables.

3.4.1 Débits de plein bord

Dans le cadre de ce projet, 746 cours d'eau ont été identifiés à l'aide de la modélisation hydrologique. Les débits de plein bord calculés pour cinq périodes de retour ($Q_{1,5}$, Q_2 , Q_3 , Q_4 , et Q_5) sur l'ensemble des tronçons de rivière dans le bassin versant de la rivière Portneuf sont présentés à la Figure 19 selon une échelle logarithmique. La boîte à moustache montre la médiane (ligne orange) et la moyenne (ligne verte pointillée) des débits de plein bord, le 25^{ème} et le 75^{ème} percentiles (p25 et p75), la distance entre les deux percentiles, les valeurs minimales et maximales, les valeurs singulières au-delà des moustaches de débit de plein bord pour chaque période de retour.

Les résultats montrent que les débits de plein bord varient énormément. La moyenne des débits de plein bord pour les périodes de retour de 1.5 ans, 2 ans, 3 ans, 4 ans et 5 ans varient respectivement de $3.007 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $4.038 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $4.886 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $5.228 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et de $5.553 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les valeurs maximales calculées pour chaque période de retour suivant le même ordre ont été de $43.528 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $61.682 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $72.500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $80.378 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, et $82.714 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivement. Des différences significatives n'ont pas été observées entre les périodes de retour de 2 ans, 3 ans, 4 ans et 5 ans. Néanmoins, les débits de plein bord d'une période de retour de 1.5 ans semblent être légèrement inférieurs par rapport aux autres périodes de retour.

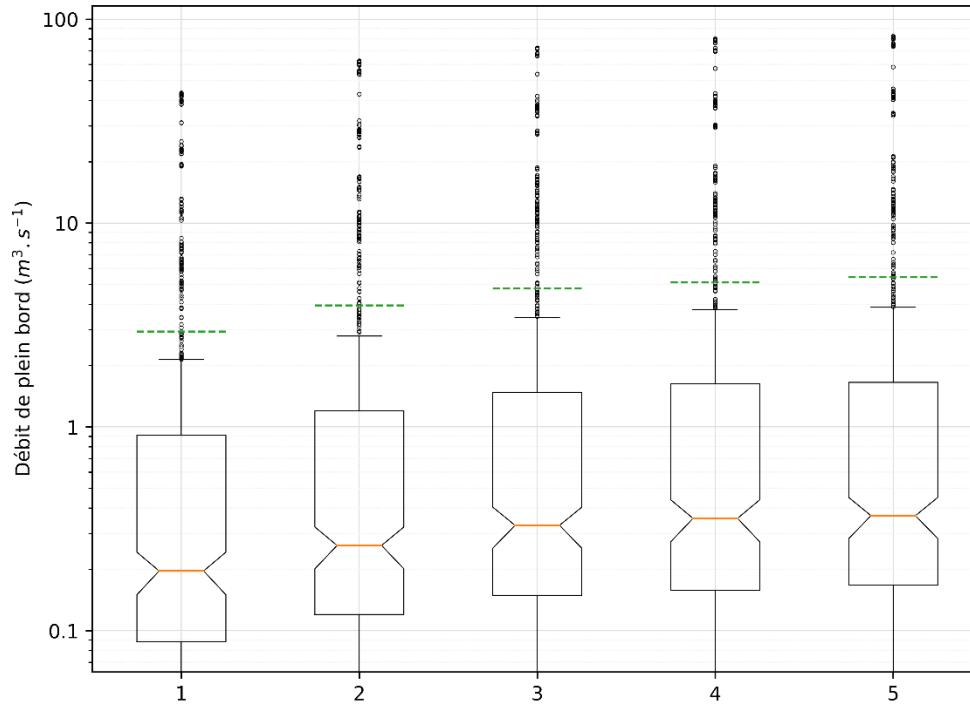


Figure 19. Distribution des débits de plein bord à une période de retour 1.5 ans, 2 ans, 3 ans, 4 ans et 5 ans dans le bassin versant de la rivière Portneuf

3.4.2 Puissance fluviale spécifique

Les distributions de la puissance fluviale spécifique à différentes périodes de retour (1.5 ans, 2 ans, 3 ans, 4 ans et 5 ans) sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Portneuf sont présentées à la Figure 20 sur une échelle logarithmique. Les puissances spécifiques fluviales calculées varient de 0.11 W. m^{-2} à $1439.99 \text{ W. m}^{-2}$. Les valeurs moyennes des puissances spécifiques pour les périodes de retour de 1.5 ans, 2 ans, 3 ans, 4 ans et 5 ans sont respectivement de 71.93 W. m^{-2} , 93.86 W. m^{-2} , 113.78 W. m^{-2} , 122.90 W. m^{-2} et 129.92 W. m^{-2} . Il est pertinent mentionner que le patron des distributions selon les différentes périodes de retour est similaire à celui observé pour les débits de plein bord; illustrant que les puissances spécifiques avec un débit de plein bord d'une période de retour de 1.5 ans sont inférieures à celles des autres périodes.

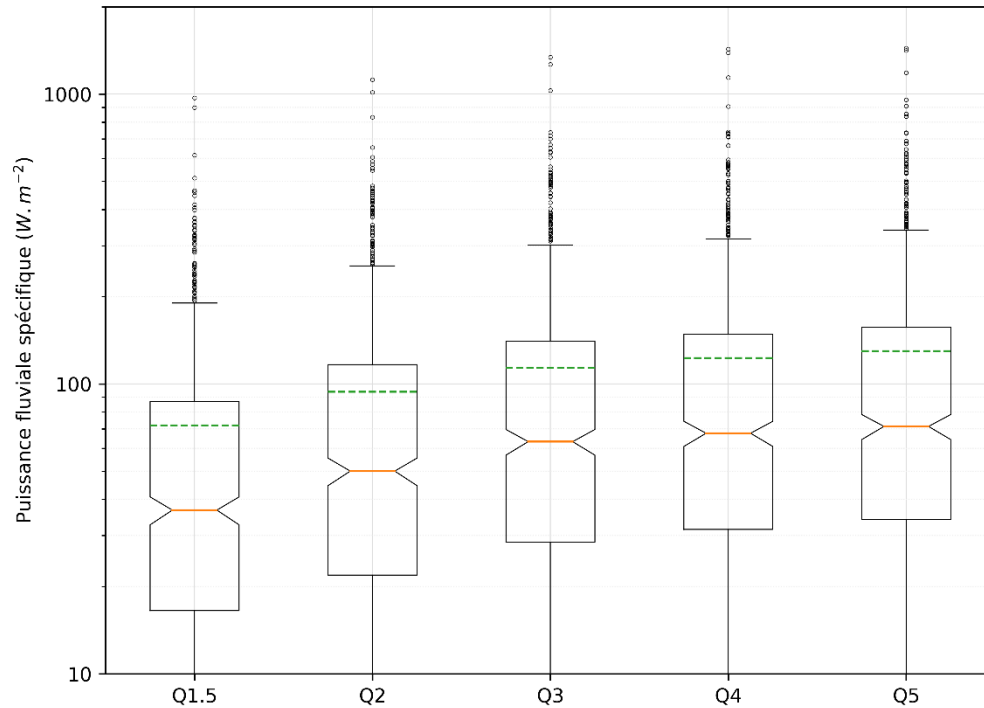


Figure 20. Distribution des puissances fluviales spécifiques avec un débit de plein bord d'une période de retour de 1.5 ans, 2 ans, 3 ans, 4 ans et 5 ans dans le bassin versant de la rivière Portneuf

3.4.3 Type de plaines d'inondation alluviale

Une classification pour chaque débit de plein bord ($Q_{1.5}$, Q_2 , Q_3 , Q_4 , et Q_5) a été effectuée sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Portneuf. La Figure 21 présente le nombre de tronçons de rivière assignés aux classes de type A, B ou C selon le débit de plein bord utilisé pour calculer la puissance spécifique sur une échelle logarithmique. Le nombre de tronçons de type A a eu une corrélation linéaire positive avec la période de retour utilisée pour calculer le débit de plein bord. Tandis qu'environ 30 tronçons ont été classifiés de type A avec un débit de plein bord de période de retour de 1.5 ans, le nombre de tronçons a été plus que le double avec un débit de plein bord de période de retour de 5 ans (78 tronçons). Le cas inverse est observé pour le nombre de tronçons classés de type C. Dans ce cas, une corrélation linéaire négative est observée; le nombre de tronçons passant de 124 tronçons en utilisant le débit de plein bord de période de retour de 1.5 ans, à 67 tronçons avec un débit de plein bord de période de retour 5 ans. Par contre, un classement plutôt stable est observé pour les tronçons de type avec un nombre de tronçons autour de 600.

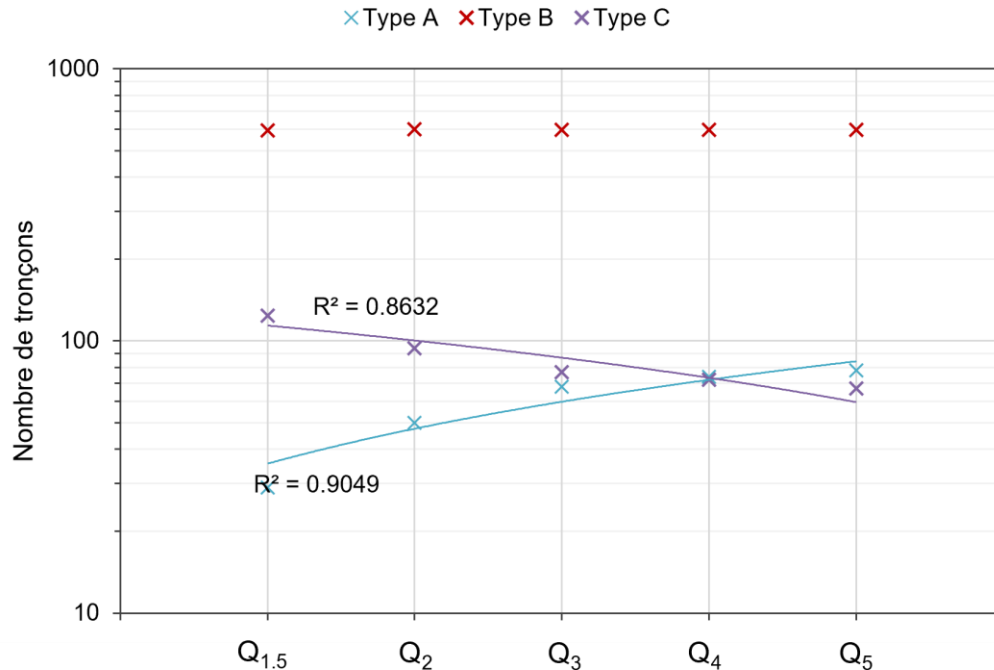


Figure 21. Évolution des classes des plaines inondables du bassin versant de la rivière Portneuf selon le débit de plein bord utilisé pour calculer la puissance spécifique du tronçon de rivière.

Dans le cadre de ce projet, la puissance spécifique avec un débit de plein bord d'une période de retour de 2 ans a été utilisée pour faire la classification des plaines inondables; la période de retour la plus souvent mentionnée dans la littérature.

Les résultats de la classification indiquent que 7% des tronçons sont de type A, plaine d'inondation non cohésive à énergie élevée; 80% de type B, plaine d'inondation non cohésive à énergie modérée; et 13% de type C, plaine d'inondation cohésive à énergie faible (Figure 22). La Figure 23 présente la cartographie des plaines d'inondation alluviales sur le bassin versant de la rivière Portneuf. Celle-ci est cohérente avec les descriptions proposés par Nanson and Croke (1992); c'est-à-dire que l'on retrouve les plaines inondables de type A dans les parties amont du bassin, souvent en présence d'un relief plus accidentée (voir section 2.1.1.1). Alors que les plaines inondables de type B se situent pour la plupart dans les régions où l'on retrouve selon toute vraisemblance un équilibre dynamique avec l'activité hydrologique du bassin. Dans ce cas, l'occurrence d'évènements extrêmes n'est pas susceptible de modifier la morphologie des chenaux étant donné la présence de larges plaines inondables plus apte à dissiper l'énergie.

Dans la classe de type A, 2 tronçons sont selon toute vraisemblance bordés par des plaines inondables confinées à texture grossière (type A1), 3 tronçons par des plaines inondables

confinées à accrétion verticale sableuse (type A2), et 47 tronçons par des plaines inondables non confinées à accrétion verticale sableuse (type A3) (Figure 24).

Des 600 tronçons de type B, 321 tronçons sont selon toute vraisemblance de type B1, c'est-à-dire bordés par une plaine d'inondation typique d'une rivière à tresses ; 7 tronçons de type B2, c'est-à-dire bordés par une plaine d'inondation avec rivière divagante à lit de graviers ; et 272 tronçons de type B3, c'est-à-dire bordés par une plaine d'inondation avec rivière à méandres et migration latérale (Figure 25).

Dans le cas de la classe de type C, 18 tronçons sont selon toute vraisemblance bordés par une plaine inondable typique d'un chenal unique latéralement stable (type C1), et 76 tronçons bordés par une plaine inondable avec rivière anastomosée (type C2) (Figure 26).

Il est pertinent mentionner que l'érosion ou les modifications morphologiques du lit mineur des plaines d'inondation de types A et B sont liées à la composition sédimentaire *in-situ*, pas seulement de la puissance fluviale. Dans le cadre de ce projet, le classement a été fait en utilisant les caractéristiques du type du sol de l'UHRH associé à chaque tronçon de rivière.

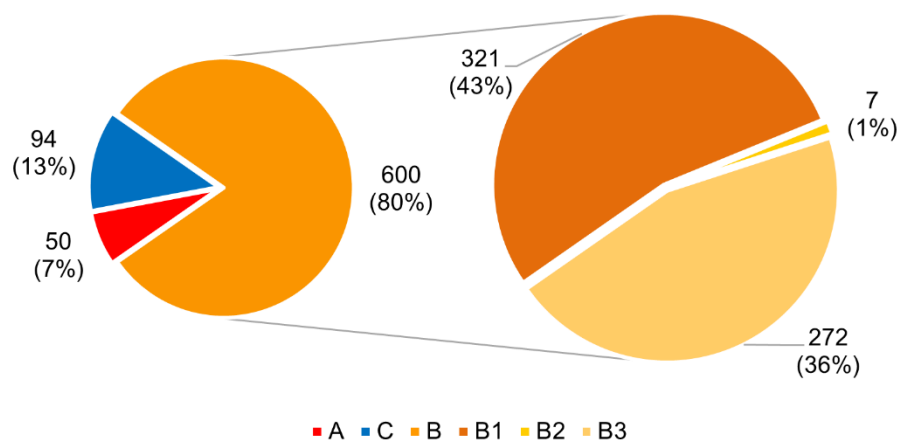


Figure 22. Diagramme des pourcentages des différentes classes de plaines d'inondation alluviales générale, et détaillé pour les tronçons de type B dans le bassin versant de la rivière Portneuf en utilisant un débit de plein bord d'une période de retour de 2 ans (Q_{2ans}).

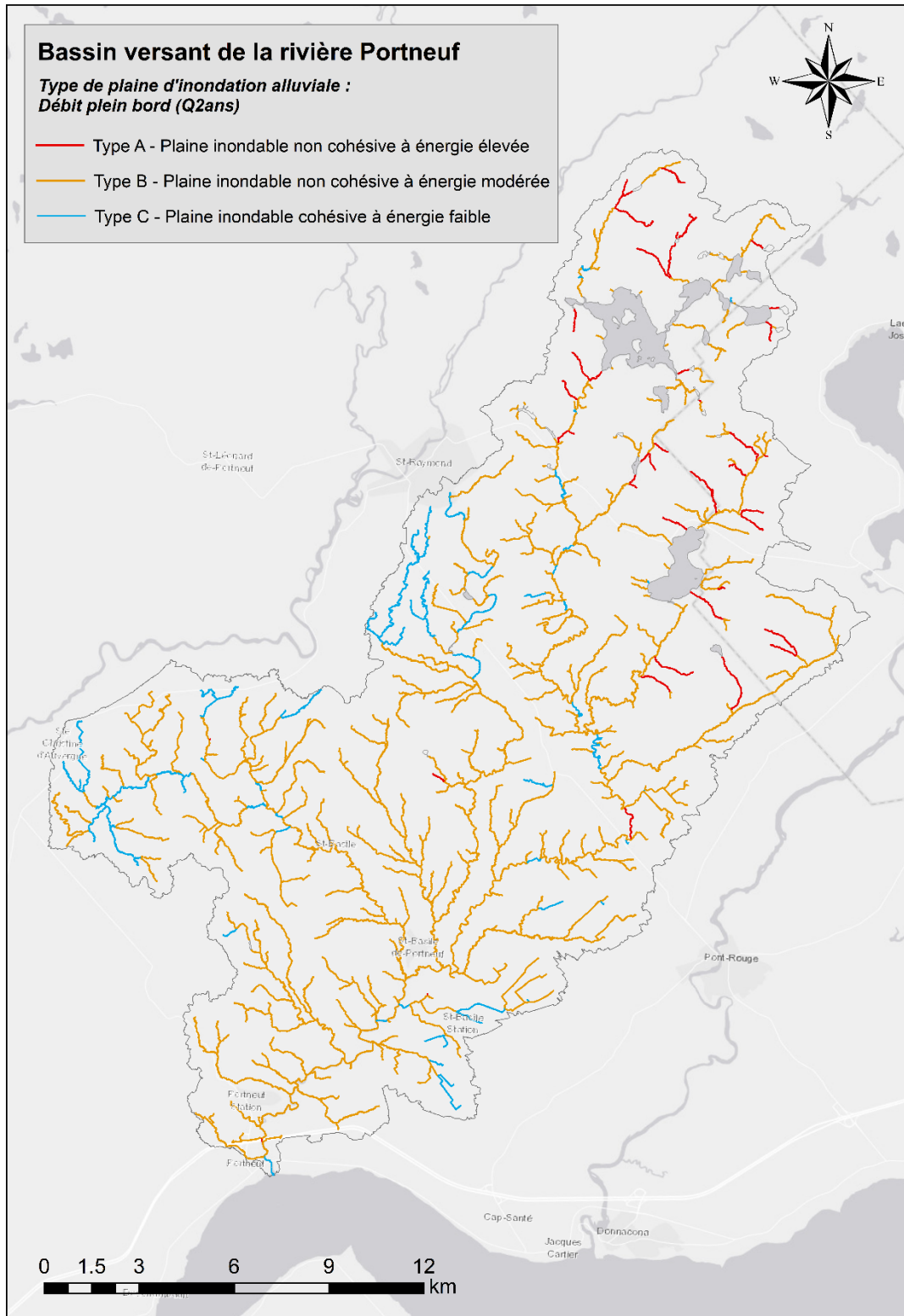


Figure 23. Carte de classement des plaines d'inondation alluviales (types A, B et C) sur le bassin versant de la rivière Portneuf.

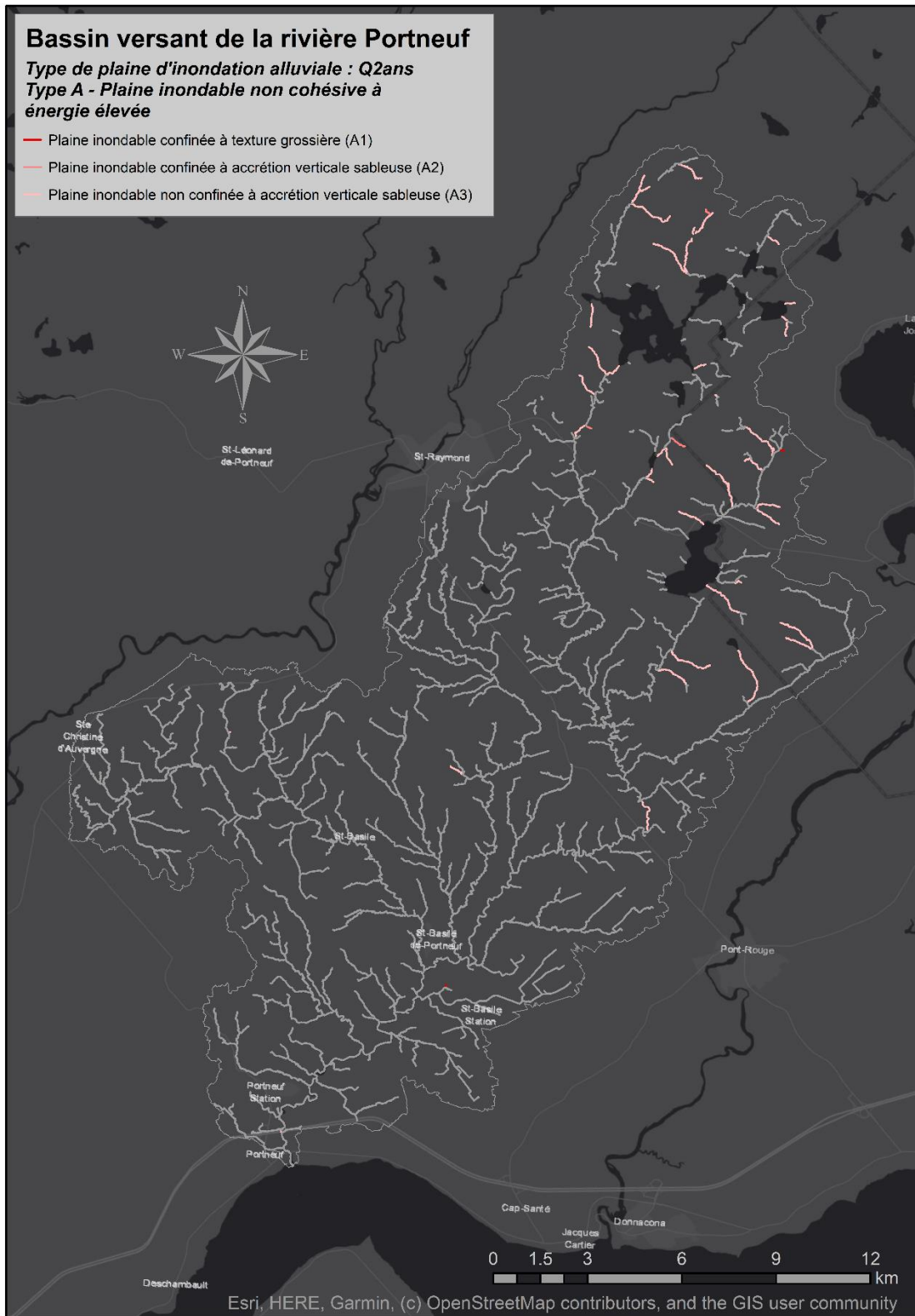


Figure 24. Carte de plaines d'inondation alluviales de type A du bassin versant de la rivière Portneuf.

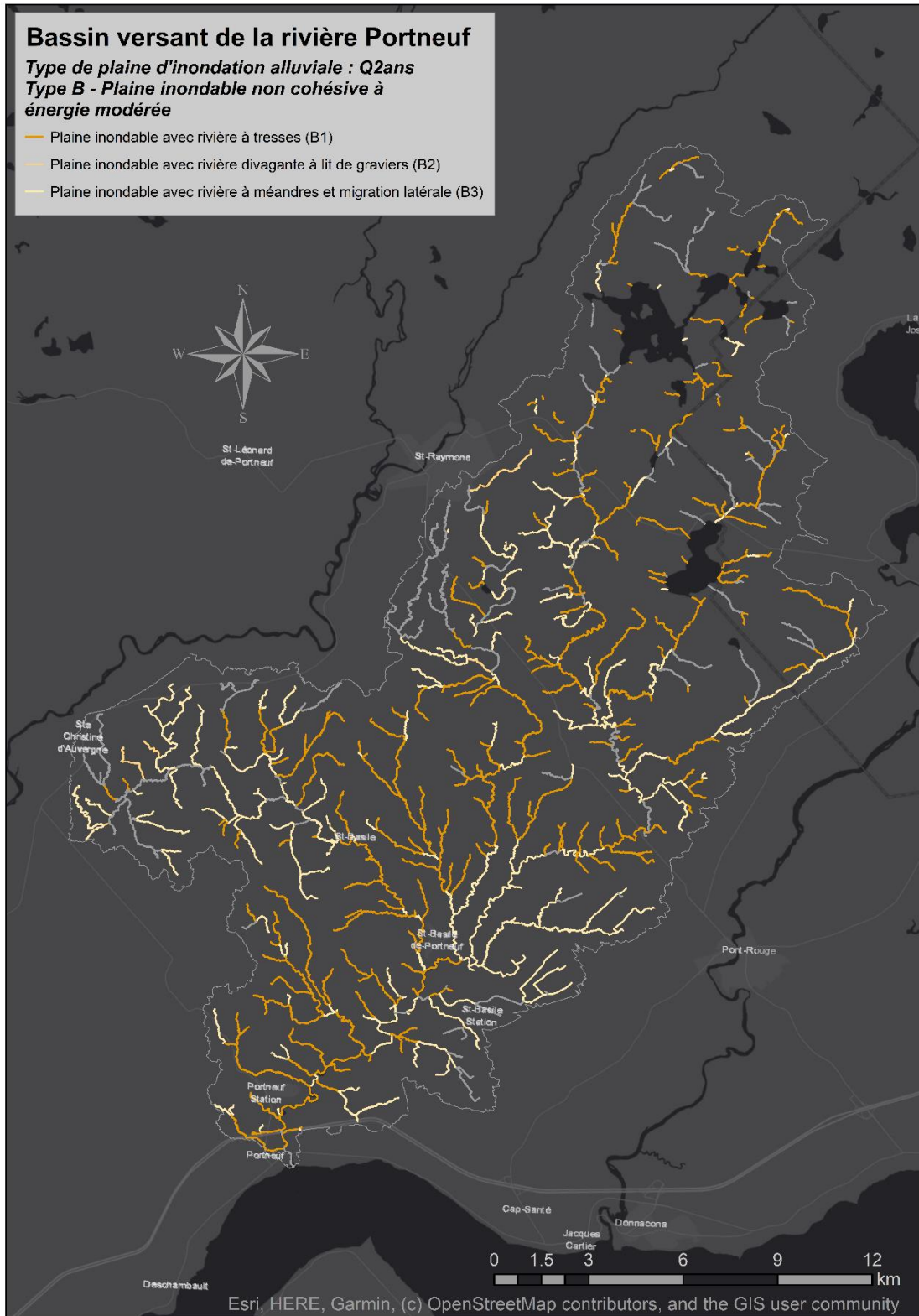


Figure 25. Carte de plaines d'inondation alluviales de type B du bassin versant de la rivière Portneuf.

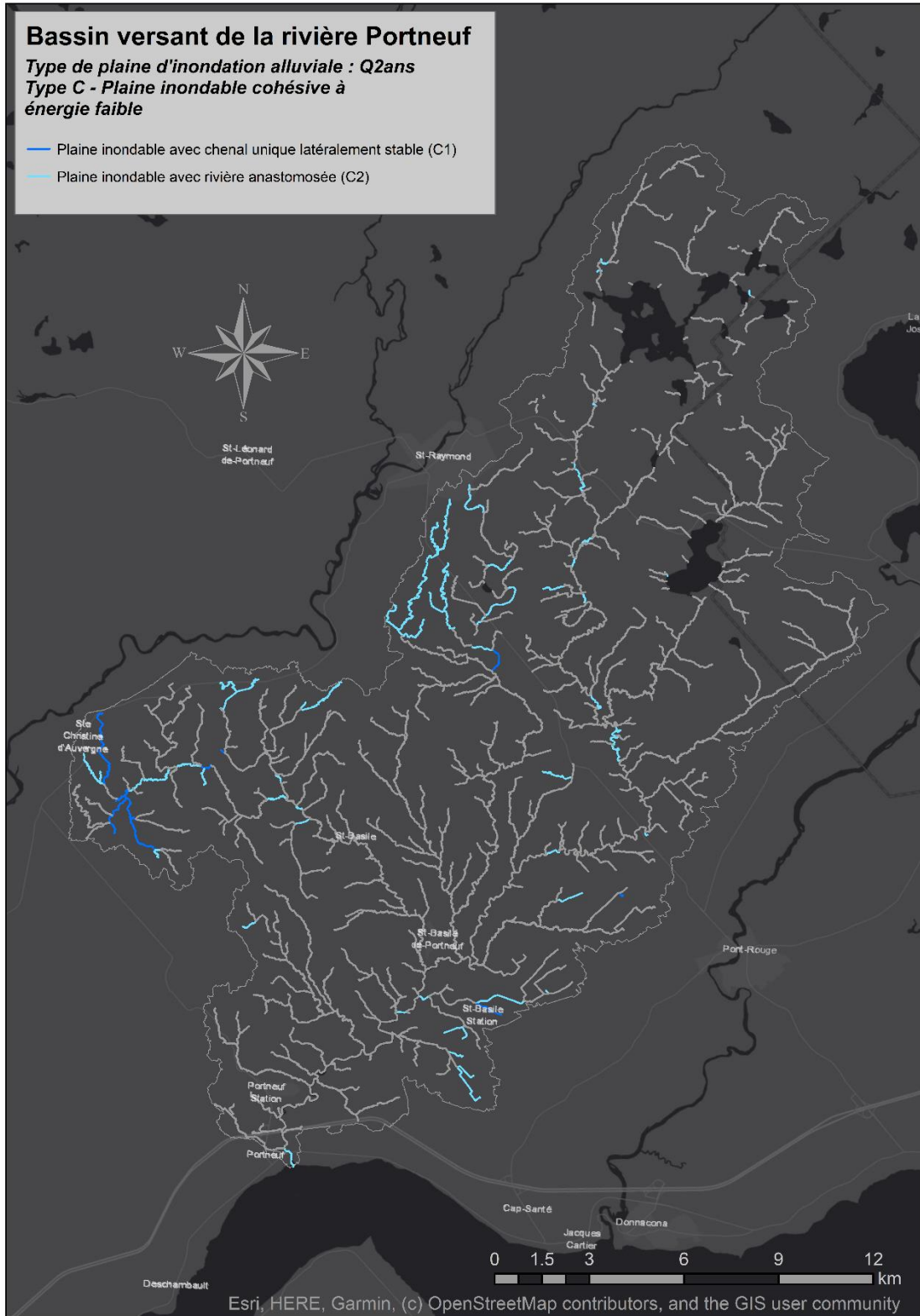


Figure 26. Carte de plaines d'inondation alluviales de type C du bassin versant de la rivière Portneuf.

4 Conclusions

L'acquisition des connaissances sur l'hydrologie du bassin versant de la rivière Portneuf a été possible en utilisant les outils de modélisation hydrologique, plus spécifiquement, la plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL.

Le portrait hydrologique observé pour le bassin versant de la rivière Portneuf a illustré un comportement typique d'un bassin versant situé dans une région tempérée avec des conditions neigeuses. Les travaux de modélisation ont permis l'estimation des débits journaliers pour l'ensemble des tronçons de rivière identifiés en tant que cours d'eau permanents du réseau hydrographique des lits d'écoulements potentiels. L'observation des crues printanières, des crues estivales, ainsi que des étiages hivernaux et estivaux a permis de mieux caractériser le régime hydrologique; mettant en évidence la dynamique des eaux dans le bassin versant au cours de l'année. Une compréhension de cette dynamique demeure essentielle à une réflexion sur la gestion des eaux de surface du bassin.

La modélisation hydrologique a été mise en valeur par la caractérisation du régime hydrologique, ainsi que la classification théorique des plaines d'inondation alluviales à l'échelle du bassin versant. L'estimation de la puissance spécifique de chaque tronçon modélisé à partir du débit de plein bord de 2 ans a permis d'illustrer les secteurs du bassin plus propices à la sédimentation et à l'érosion. Cela représente aussi une opportunité de corroborer les connaissances actuelles sur ces secteurs et également d'aller valider sur les terrains d'autres tronçons jusqu'à maintenant moins suspectés. En parallèle, l'utilisation de données issue des méthodes de télédétection offrent une opportunité de concrétiser nos connaissances sur l'hydromorphologie des cours d'eau du bassin de la rivière Portneuf. À ce niveau, il serait possible de calculer les valeurs d'indices de qualité hydromorphologiques tel que le « *Remote Morphological Quality Index (RMQI)* » (Lemay et al., 2021) et afin d'évaluer le niveau de dégradation du bassin. L'application combinée de la modélisation hydrologique semi-distribuée et de données issues de la télédétection pour caractériser les plaines d'inondation alluviales représente une opportunité à saisir dans un contexte d'adaptation au changement climatique. Ainsi, il serait sans doute opportun d'anticiper si la puissance spécifique de certains tronçons pouvait s'accroître et vraisemblablement affecter la morphologie fluviale du territoire. Cela pourra se faire en intégrant des scénarios de projections climatiques dans la modélisation hydrologique.

Enfin, il est important de souligner que les résultats préliminaires de ce projet ont été présentés le 9 décembre 2021 lors d'une formation (Rousseau et al., 2021). Cela dit, l'Annexe I de ce rapport présente une version à jour de notre présentation, bonne lecture !

5 Références bibliographiques

- Arsenault, R., Brissette, F., & Martel, J.-L. (2018). The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of Hydrology*, 566, 346-362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.027>
- Asadzadeh, M., & Tolson, B. A. (2009). A new multi-objective algorithm, Pareto archived DDS. Proceedings of the 11th annual conference companion on genetic and evolutionary computation conference: Late breaking papers,
- Besnard, C. (2016). *Application et développement de l'approche hydrogéomorphologique aux plaines alluviales du Québec méridional*. Université du Québec à Rimouski]. Rimouski, Québec.
- CAPSA. (2012). *Bassin versant de la rivière Portneuf*. Retrieved 29 septembre from <https://www.capsa-org.com/le-territoire/bassin-versant-riviere-portneuf>
- Direction de l'expertise hydrique. (2018). *Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional*. Québec
- Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., & Villeneuve, J.-P. (2001). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. *Journal of hydrologic engineering*, 6(2), 91-99.
- Fortin, V., Roy, G., Donaldson, N., & Mahidjiba, A. (2015). Assimilation of radar quantitative precipitation estimations in the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *Journal of Hydrology*, 531, 296-307. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.003>
- Fournier, R., Poulin, M., Revéret, J.-P., Rousseau, A. N., & Théau, J. (2013). Outils d'analyses hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses terres du Saint-Laurent: adaptations aux changements climatiques.
- Gob, F., Bilodeau, C., Thommeret, N., Tamisier, V., Albert, M.-B., & Jérôme, B. (2014). *Vers la construction d'indicateurs hydromorphologiques soutenant la biologie à partir de la base de données nationale CARHYCE. Valorisation des données CARHYCE*.
- Gordon, N. D., McMahon, T. A., Finlayson, B. L., Gippel, C. J., & Nathan, R. J. (2004). *Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists*. Wiley. <https://books.google.ca/books?id= PJHw-hSKGgC>

- Lagacé, R. (2014). *GAE-3005 Aménagement des cours d'eau et conservation des sols: Géomorphologie des cours d'eau*.
http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Documents/Notes_A2011/CH_05_Geomorpho.pdf
- Lazerte, S., & Sam Albers. (2018). *weathercan: Download and format weather data from Environment and Climate Change Canada*. In *The Journal of Open Source Software* 3(22):571.
- Lemay, J., Biron, P. M., Boivin, M., Stämpfli, N., & Foote, K. (2021). Can the Morphological Quality Index (MQI) be used to determine the ecological status of lowland rivers? *Geomorphology*, 395, 108002. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108002>
- Mahfouf, J. F., Brasnett, B., & Gagnon, S. (2007). A Canadian precipitation analysis (CaPA) project: Description and preliminary results. *Atmosphere-ocean*, 45(1), 1-17.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3137/ao.v450101>
- Matott, L. S. (2016). OSTRICH—An Optimization Software Toolkit for Research Involving Computational Heuristics Documentation and User's Guide. *Center for Computational Research, State University of New York at Buffalo, New York, USA*.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, D. L. F. E. D. P. (2021). *Cartographie du cinquième inventaire écoforestier du Québec méridional — Méthodes et données associées*.
- Mulvihill, C. I., Baldigo, B. P., Miller, S. J., DeKoskie, D., & DuBois, J. (2009). *Bankfull discharge and channel characteristics of streams in New York State* (Report 2009–5144, Issue.
- Nanson, G., & Croke, J. (1992). A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, 4(6), 459-486.
- Orlandini, S., Moretti, G., Franchini, M., Aldighieri, B., & Testa, B. (2003). Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. *Water Resources Research*, 39(6).
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. In (Version 4.0.0)
<https://www.R-project.org/>
- Rousseau, A. N., Fortin, J.-P., Turcotte, R., Royer, A., Savary, S., Quévy, F., Noël, P., & Paniconi, C. (2011). *PHYSITEL, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models*
- Rousseau, A. N., Gonzalez, A., & Savary, S. (2021, 9 décembre 2021). Régime hydrologique de la rivière Portneuf - Modélisation du bassin versant. Formation donnée dans le cadre de notre projet "Hydro-logique du bassin versant de la rivière Portneuf". Formation des acteurs municipaux organisée par la CAPSA, En présentiel à l'Édifice Caron, ville de saint-Basile (disponible simultanément en ligne).

- Rousseau, A. N., Savary, S., Tremblay, S., Caillouet, L., Doumbia, C., Augas, J., Foulon, É., & Abbasnezhadi, K. (2020). *A distributed hydrological modelling system to support hydroelectric production in northern environments under current and changing climate conditions* (Documents scientifiques et techniques, Issue).
- Schmitt, L., Maire, G., & Humbert, J. (2001). La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-géomorphologique de rivières.
- Turcotte, R., Fortin, J.-P., Rousseau, A. N., Massicotte, S., & Villeneuve, J.-P. (2001). Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240(3-4), 225-242. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00342-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00342-5)
- Turcotte, R., Rousseau, A., Fortin, J.-P., & Villeneuve, J.-P. (2003). A process-oriented, multiple-objective calibration strategy accounting for model structure. In (pp. 153-163). <https://doi.org/10.1029/WS006p0153>
- Wolman, M. G., & Leopold, L. B. (1957). *River flood plains: some observations on their formation* (2330-7102).

6 ANNEXE I. Formation des acteurs municipaux organisée par la CAPSA

Hydro-*logique* du bassin versant de la rivière Portneuf:

Évaluation de la puissance fluviale

Alain N. Rousseau, ing., Ph. D.

Andrés Gonzalez, M. Sc.

Stéphane Savary, ing. jr., M. Sc.

09 décembre 2021

Photo: ©CAPSA «La rivière Portneuf_crdit CAPSA.jpg »

Québec 

 CAPSA

 INRS
Institut national
de la recherche
scientifique

Deux grands objectifs

Établir le portrait hydrologique du bassin versant

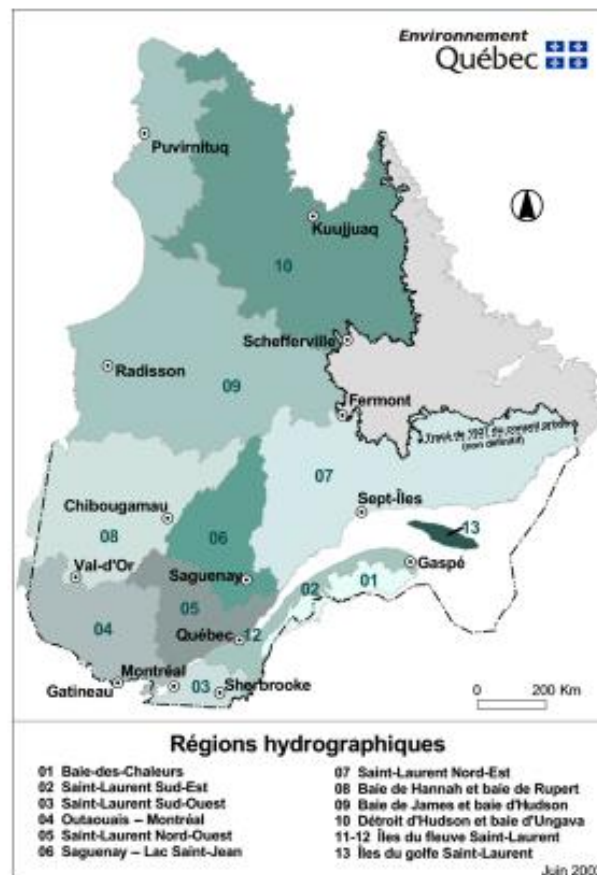
- *Régime de précipitations*
- *Hydrogramme des débits journaliers moyens*

Caractériser la plaine alluviale

- *Débit de plein bord et puissance fluviale*

BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF

Bassin d'environ 366 km² situé dans la région hydrographique 05
 • Saint-Laurent Nord-Ouest



BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE PORTNEUF

Recoupant sept municipalités

- Lac-Sergent, Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier,
- Saint-Raymond, Sainte-Christine-d'Auvergne,
- Saint-Basile, Pont-Rouge et Portneuf

Rivière Portneuf (~50 km)

- Exutoire sur le fleuve Saint-Laurent

Deux lacs principaux

- Sept-Îles & Sergent

INRS

Institut national
de la recherche
scientifique

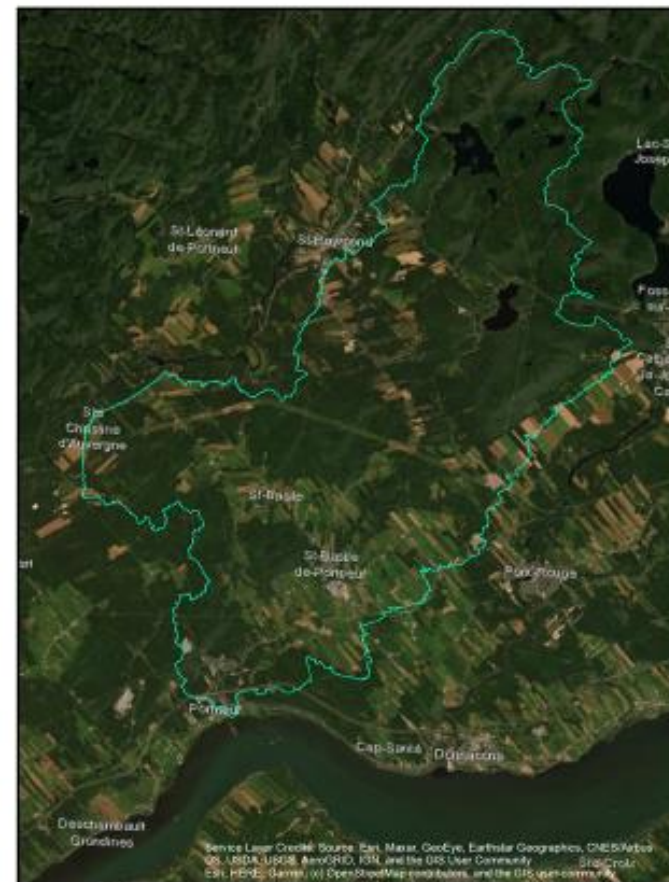
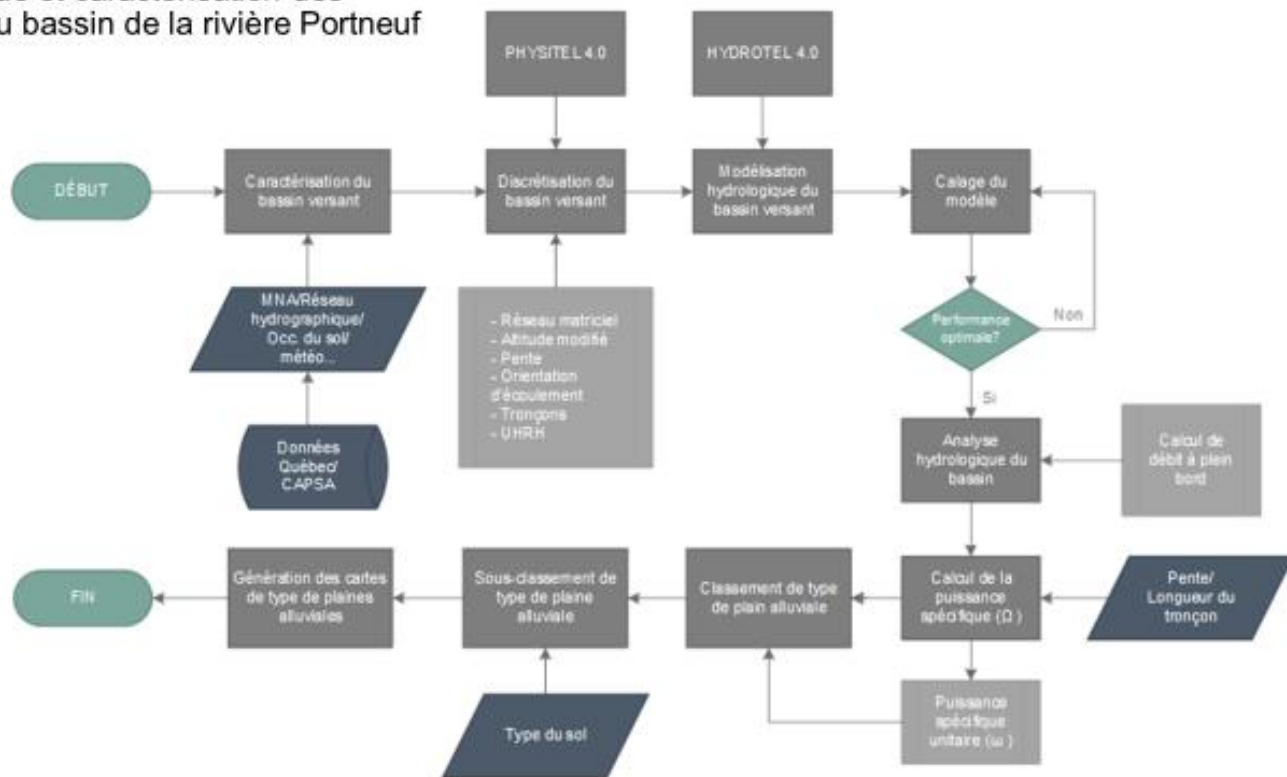


SCHÉMA MÉTHODOLOGIQUE

Régime hydrologique et caractérisation des plaines alluviales du bassin de la rivière Portneuf



© Institut de la recherche scientifique, 2014

SCHÉMA MÉTHODOLOGIQUE

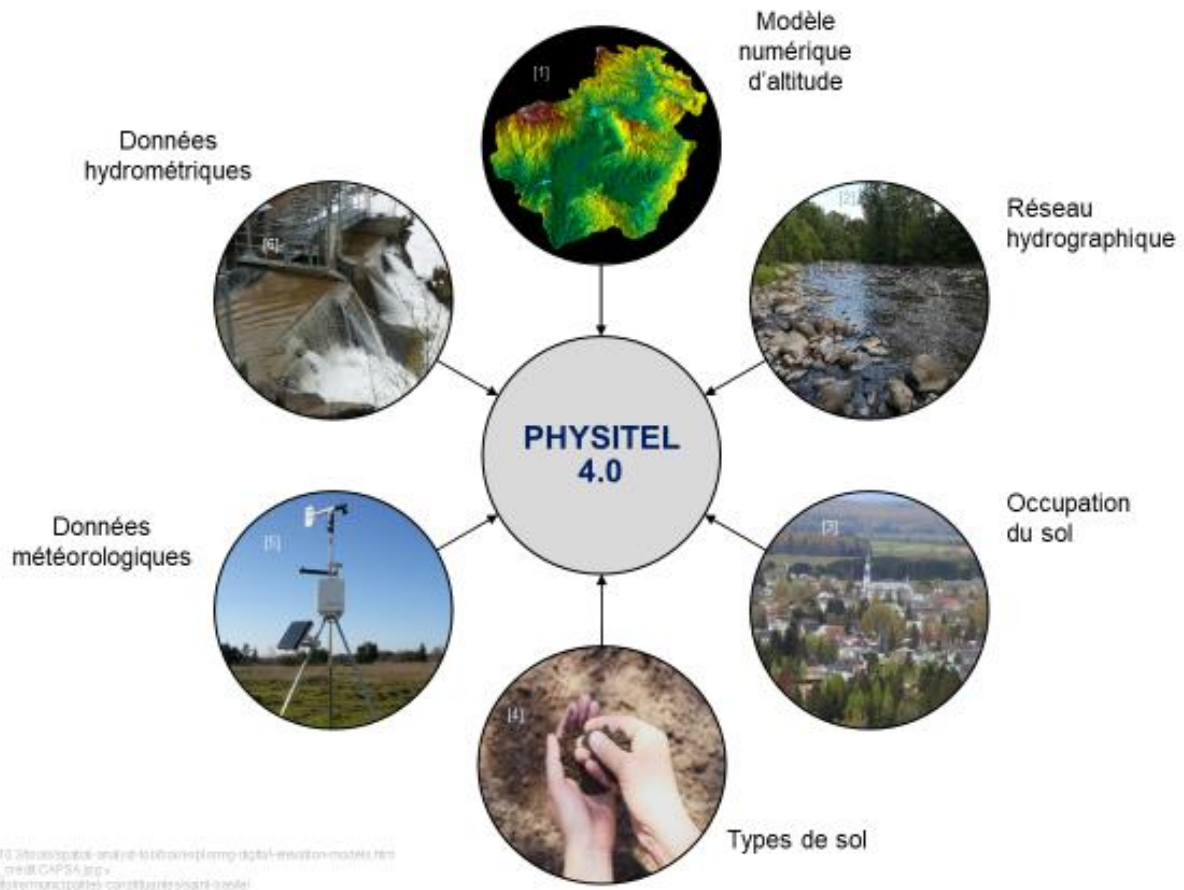
Régime hydrologique et caractérisation des plaines alluviales du bassin de la rivière Portneuf



PHYSITEL et HYDROTEL (INRS)

Plateforme de modélisation hydrologique distribuée derrière

- Système de prévision hydrologique de la DEH du MELCC
- Système de prévision hydrologique du Yukon Energy
- Atlas Hydroclimatique du Québec
- Distributions commerciale et communautaire
 - + 60 licences, ex.: ÉTS, UdeSherbrooke, IMTA (Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua), Universidad Veracruzana (Mexique), ULaval, UQTR, UQÀM, UQAC, INRA de Montpellier (France), ...
 - Allocation de prélèvements en eau de communautés mexicaines l'IMTA
 - Détermination des temps de parcours de l'eau et des temps d'intervention pour protéger la source d'eau potable Château d'Eau de la Ville de Québec



1. <https://es.hip.org/cn/forcomp/3/3/area/spati-analyse-et/analyse-geom-digital-revision-models.htm>
2. Photo: SCAPSA «La rivière Patrouil»_pre@CAPSA.jpg»
3. <https://oahneil.ca/ameasg/mel-fer/tekemond/potes/corollasre/le/ari-ozole/>
4. https://www.caratma.de/kal_educat/edf_formation/hap_2_2019e.htm
5. <https://www.jrc.it/consorzio/110-45-32-Packaged-Weather-Station-p1143.htm>
6. Photo: SCAPSA «Barrage de charge du lac St-Eustache»_pre@CAPSA.jpg»

SOURCES DE DONNÉES

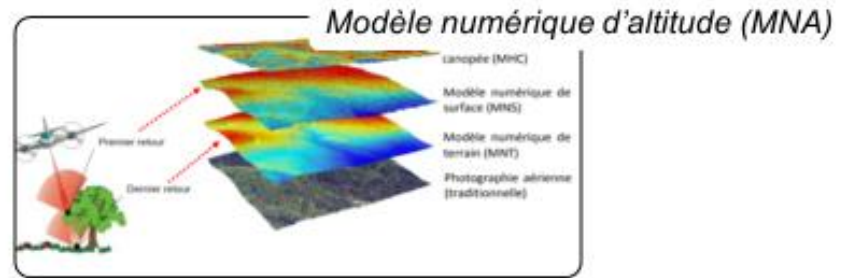
Forêt ouverte et service de cartographie web (WMS)

Feuillet 1 : 20 000
Résolution spatiale de 4 m



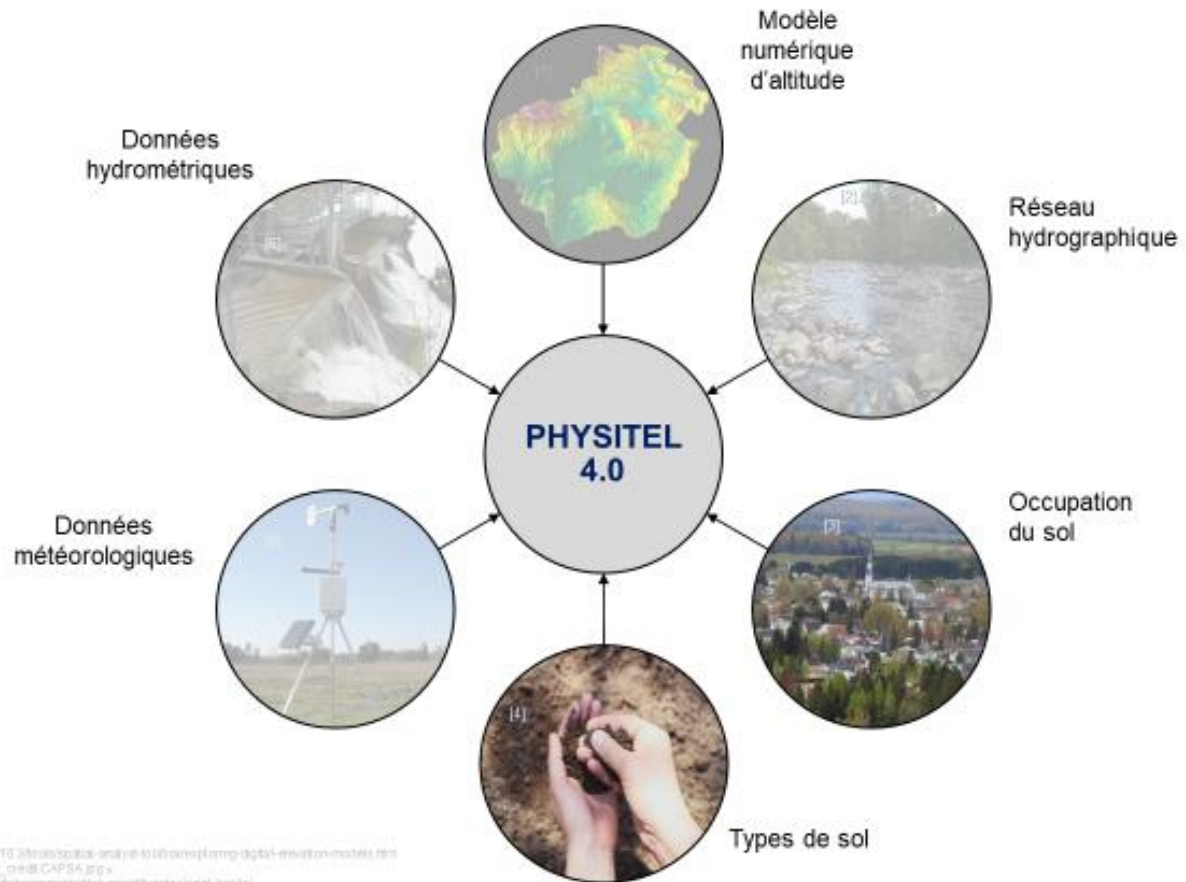
SOURCES DE DONNÉES

Forêt ouverte et service de cartographie web (WMS)



foretouverte.gouv.qc.ca

11



1. <https://esri.com/products/arcgis.com/arcgis/10.1/arcgis/spatial-analysis-to-terrain/using-digital-elevation-models.htm>
 2. Photo: ©CAPSA «L'air et le Patrimoine», www.capasa.org
 3. <https://online.illinois.gov/registries/land/land/monopoly/conditions/land/online/>
 4. https://www.carleton.ca/education/education/formation/ocp/_ocp/ocp.htm
 5. <https://www.jrc.com/arcgis/110-105-32-Packages/Weather-Station-p1142.htm>
 6. Photo: ©CAPSA «Barrage de charge du lac Beauport», www.capasa.org

SOURCES DE DONNÉES

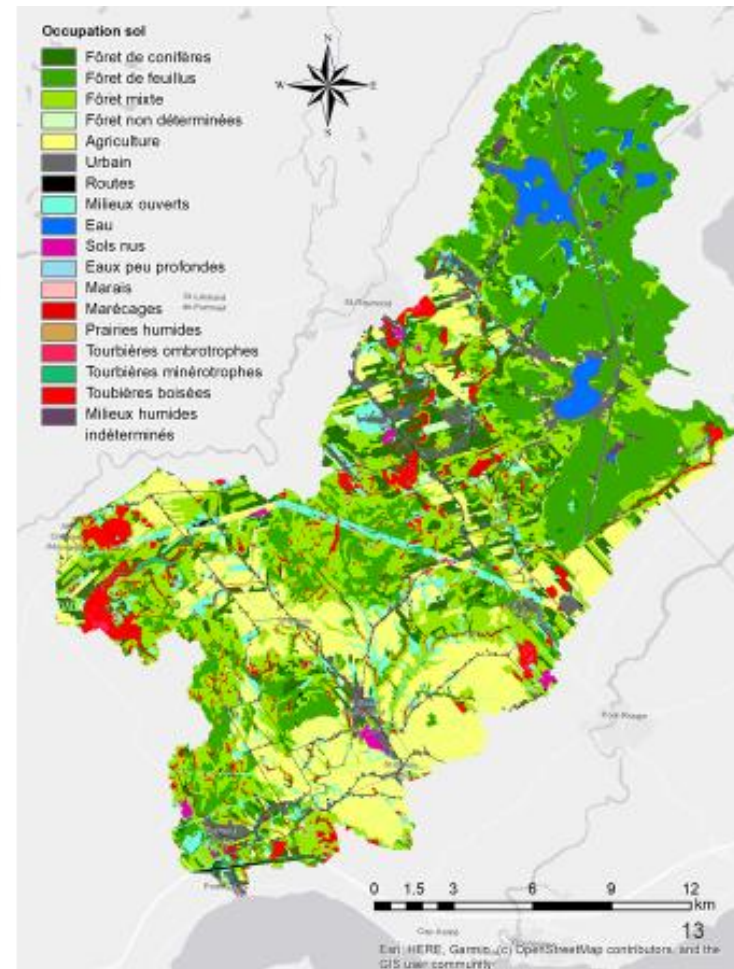
Occupation du sol 2017/2019

- Utilisation du territoire de l'année 2017^[1]
- Cartographie de l'occupation du sol des Basses-terres du Saint-Laurent^[2]
- 5^{ème} inventaire écoforestier du Québec méridional (Peuplement écoforestier)^[3]

Classement d'occupation sol	Aire (km ²)	%
Forêts de conifères	31.48	8.58
Forêts de feuillus	99.80	27.20
Forêts mixtes	84.92	23.15
Forêts non déterminées	4.98	1.36
Agriculture	64.42	17.56
Urbain	22.17	6.04
Routes	3.29	0.90
Milieux ouverts	21.43	5.84
Eau	9.05	2.47
Sols nus	1.72	0.47
Eaux peu profondes	0.07	0.02
Marais	0.04	0.01
Marécages	10.13	2.76
Prairies humides	0.16	0.04
Tourbières ombrotrophes (BOG)	0.49	0.13
Tourbières minérotrophes (FEN)	0.87	0.24
Tourbières boisées	9.82	2.68
Milieux humides indéterminés	2.03	0.55
TOTAL	366.88	100.00



1. MELCC (2017). Utilisation du territoire. Données Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/utilisation-du-territoire>
2. Environnement et Changement climatique Canada & MELCC (2019). Cartographie de l'occupation du sol des Basses-terres du Saint-Laurent. Données Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/cartographie-de-l-occupation-du-sol-des-basses-terres-du-saint-laurent>
3. MINISTÈRE DES FORÊTS, D.L.F., D.P., Cartographie du cinquième inventaire écoforestier du Québec méridional – Méthodes et données associées. 2021. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers. p. 129 p.



SOURCES DE DONNÉES

Type du sol

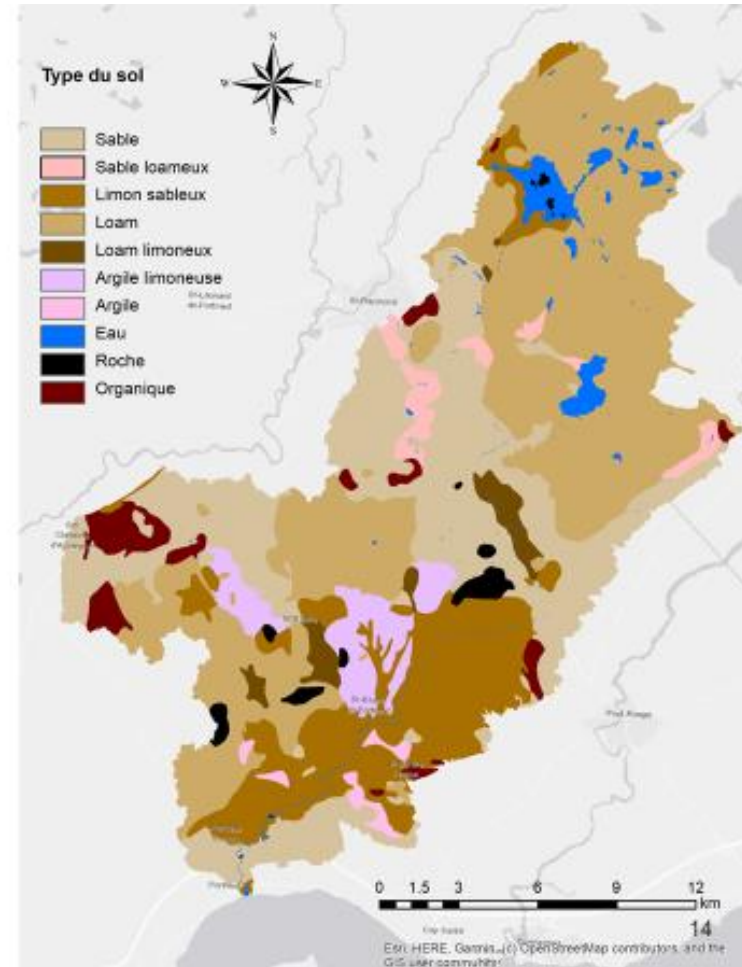
Études pédologiques^[1] dans la région 03-Capitale-Nationale

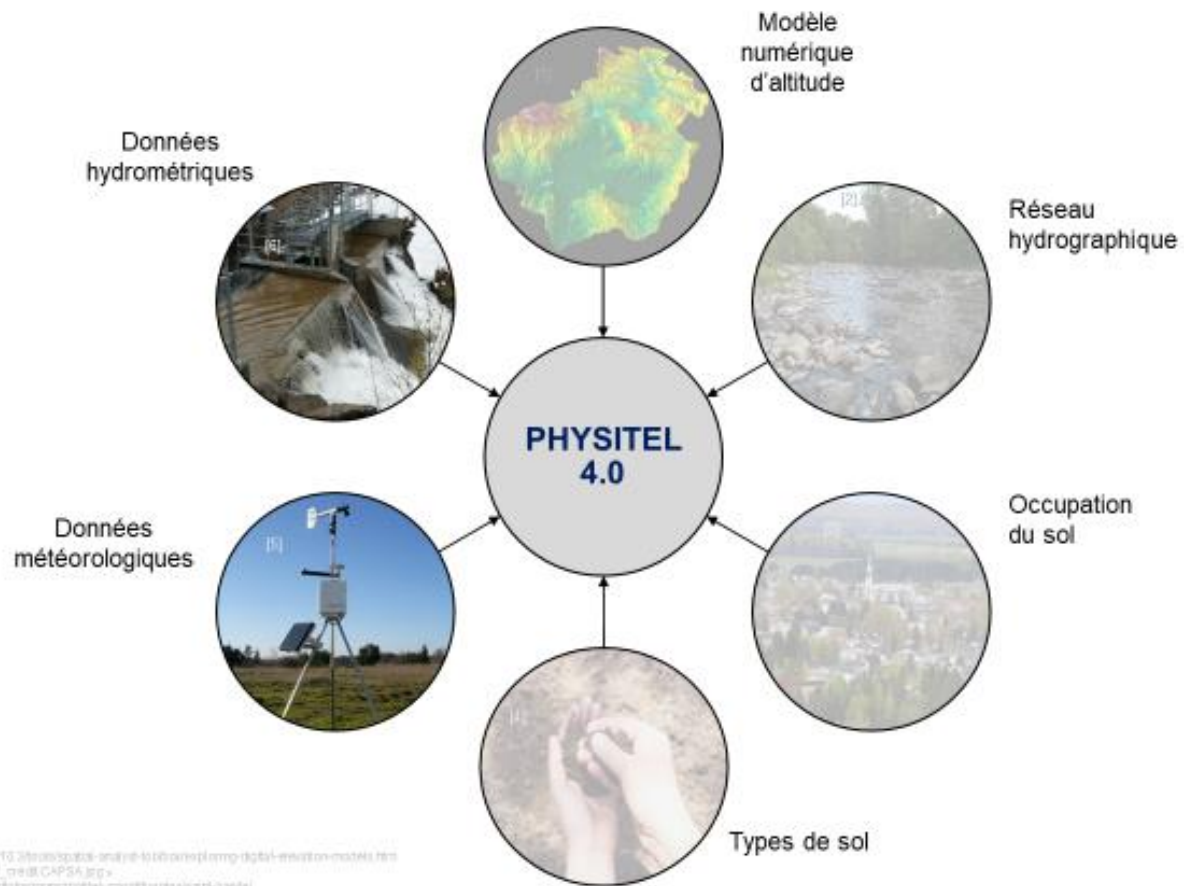


Type du sol	%
Sable	28.05
Sable loameux	2.11
Limon sableux	18.00
Loam	39.37
Loam limoneux	2.11
Limon	0.00
Loam sablo-argileux	0.00
Loam argileux	0.00
Loam limono-argileux	0.00
Argile sableuse	0.00
Argile limoneuse	4.78
Argile	0.55
Eau	1.41
Urbain	0.85
Organique	2.77



1. <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-resources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/>





SOURCES DE DONNÉES

Données météorologiques et hydrométriques

30

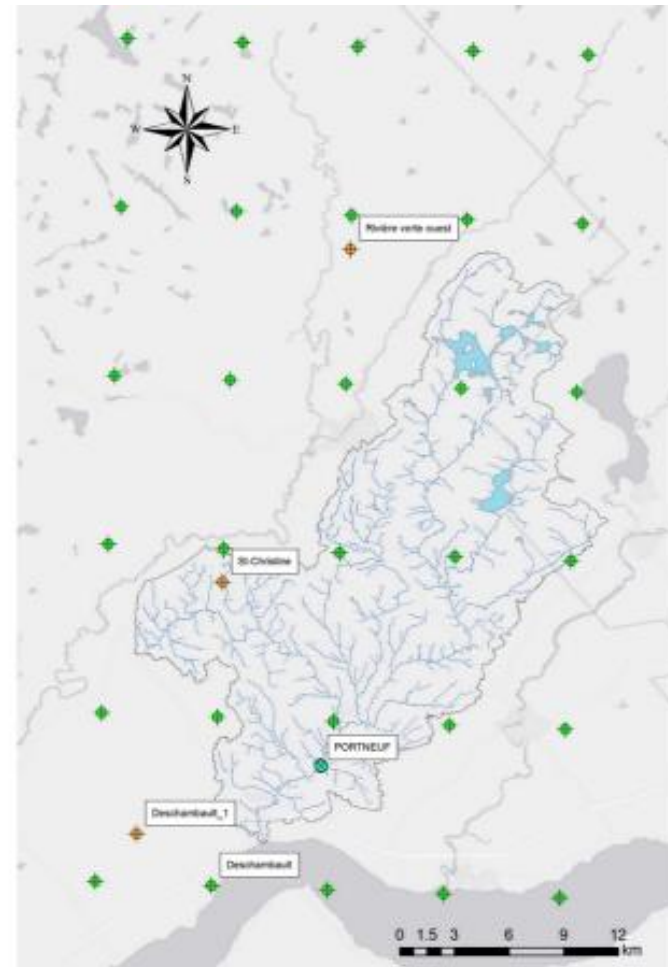
Points d'une grille de données de précipitation issue de l'analyse Canadienne de Précipitations (CaPA) avec précipitations de 2000 à 2017

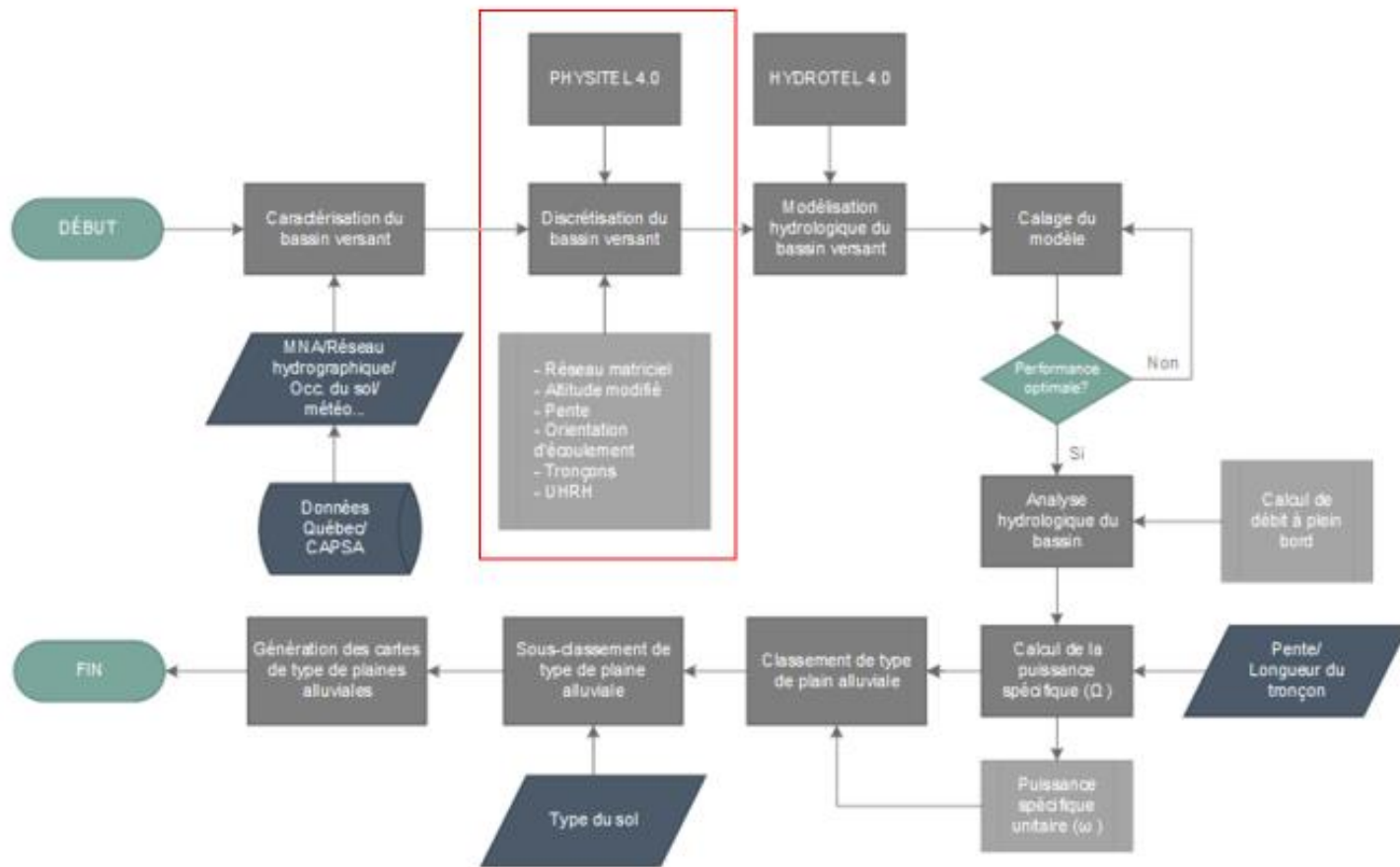
5

Stations météorologiques d'Environnement et Changement Climatique Canada, avec plus de 10 ans de données météorologiques (Tmin/Tmax/Precip.)

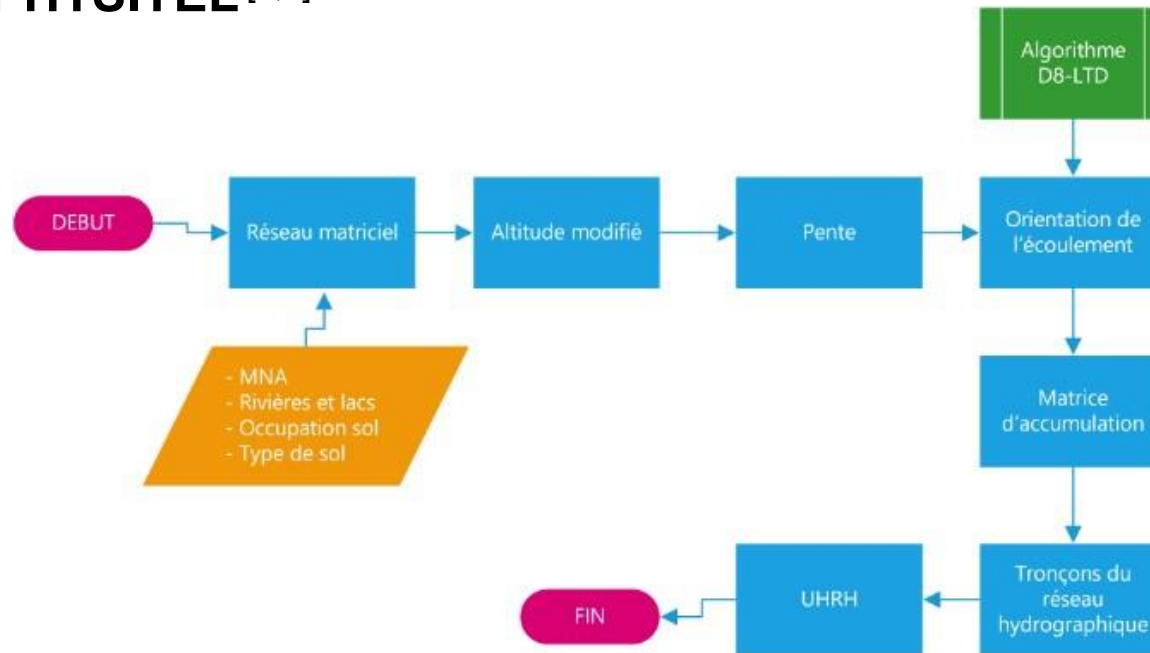
1

Station hydrométrique (050702 - Portneuf) à 7.5 km de l'exutoire avec données journalières de débit de 2002 à 2021.



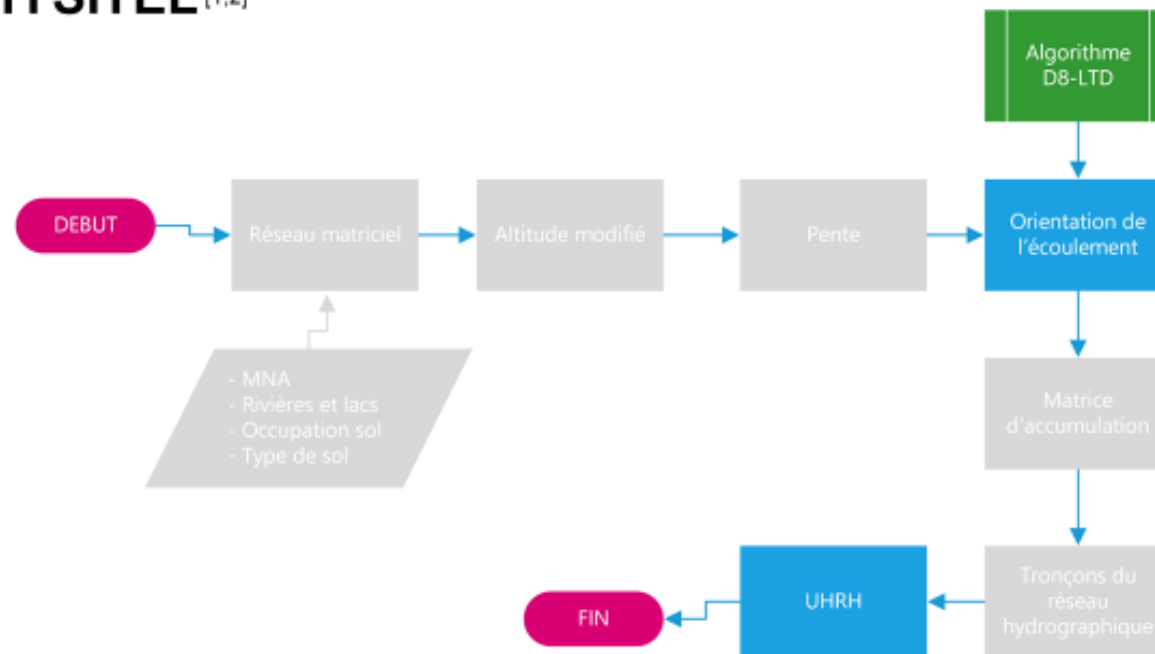


Intégration du bassin versant avec PHYSITEL [1,2]



1. Fortin, J.-P., et al. *Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model*. *Journal of hydrologic engineering*, 2006(12): p. 9-19.
2. Rousseau, A.N., et al. *PHYSITEL, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models*. *Water Resources Bulletin*, 2008(44): p. 208-218.

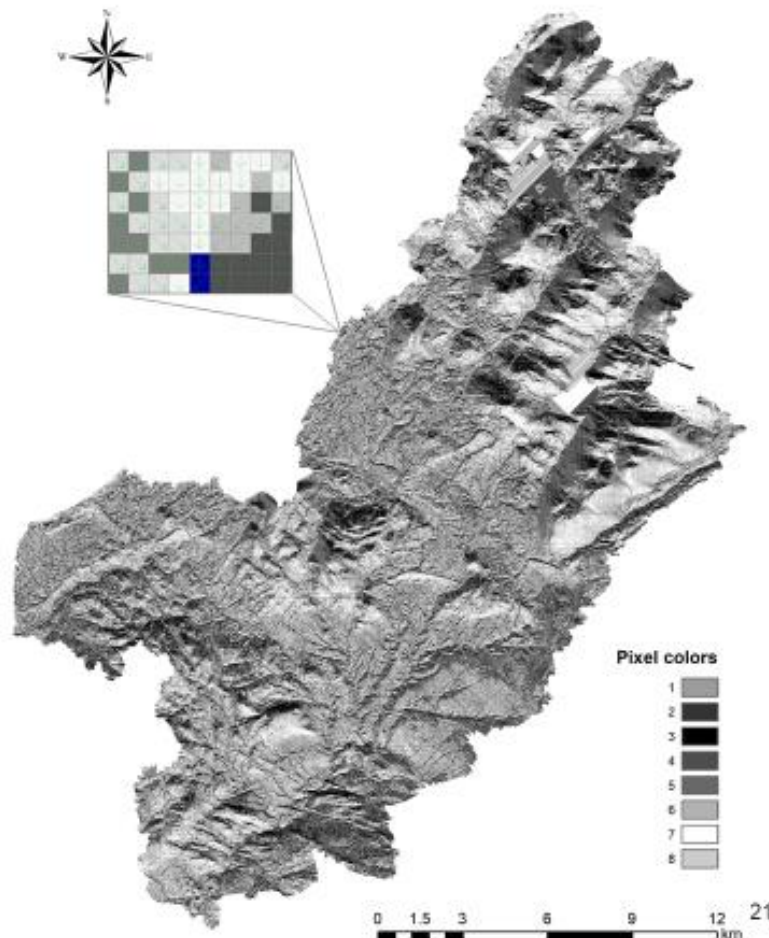
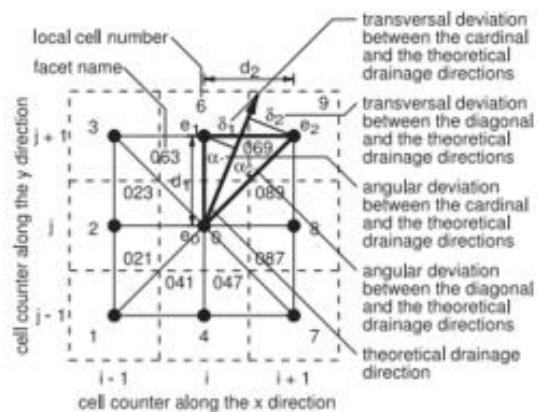
Intégration du bassin versant sur PHYSITEL ^[1,2]



Discrétisation du bassin versant avec PHYSITEL

Orientation d'écoulement

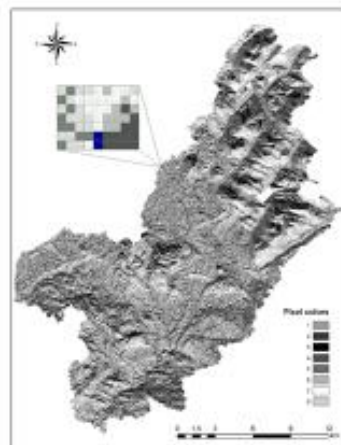
Schéma du système de calcul élémentaire utilisé dans l'algorithme D8-LTD^[1].



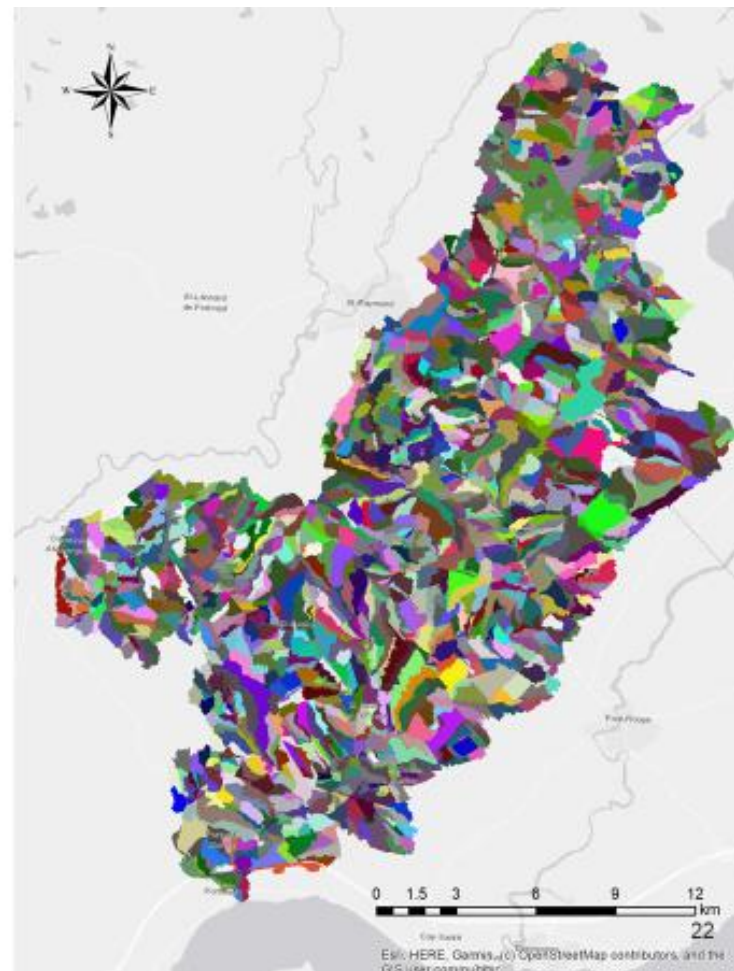
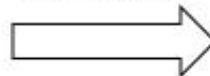
Discrétisation du bassin versant avec PHYSITEL

Segmentation en versants

Utilisation de l'orientation d'écoulement pour générer les unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) du bassin versant de la rivière Portneuf



1989 UHRH

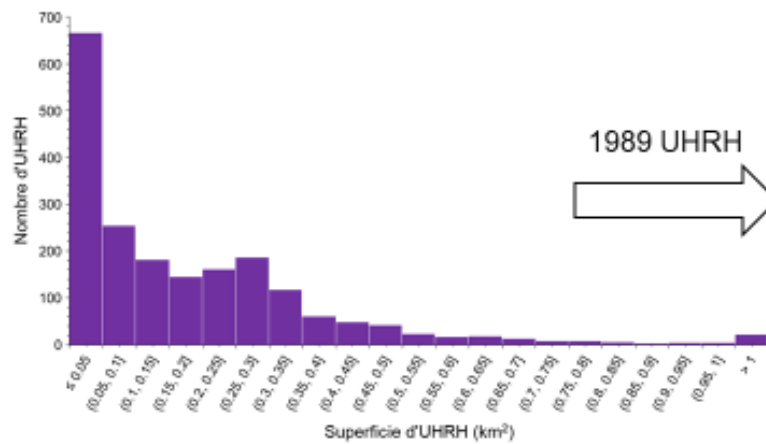


Discrétisation du bassin versant avec PHYSITEL

Segmentation en versants

UHRH: Unités de calcul des processus hydrologiques terrestres d'HYDROTEL

- Limiter le temps de calcul lors de la simulation
- Garantir un bon niveau d'intégration des cours d'eau^[1]



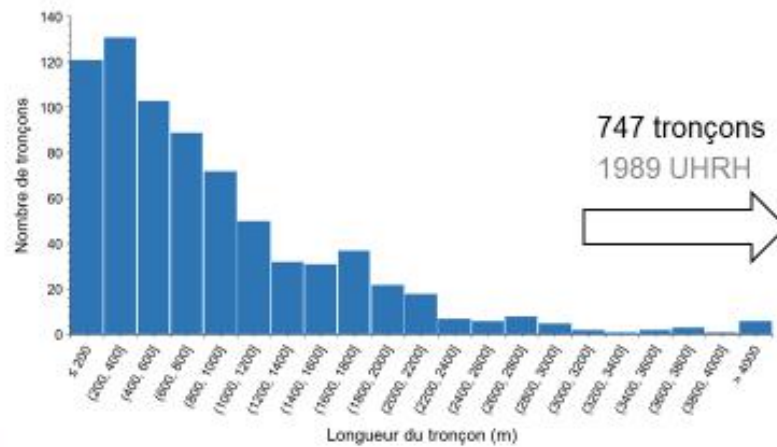
1. Fournier, R., et al., Outils d'analyses hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses terres du Saint-Laurent: adaptations aux changements climatiques. 2015.



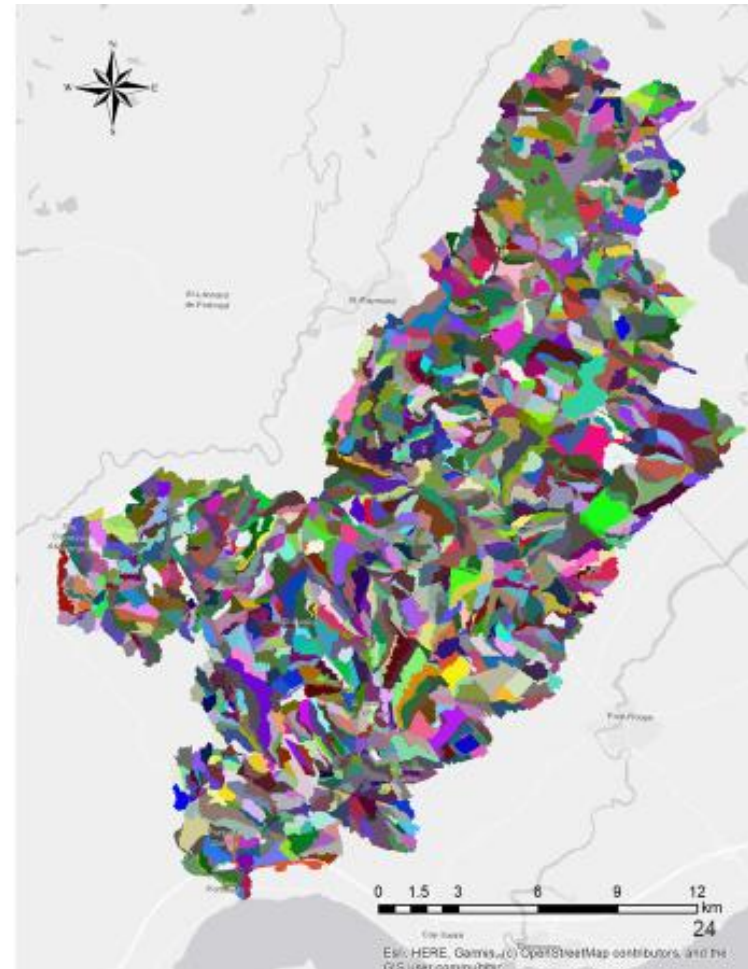
Discrétisation du bassin versant avec PHYSITEL

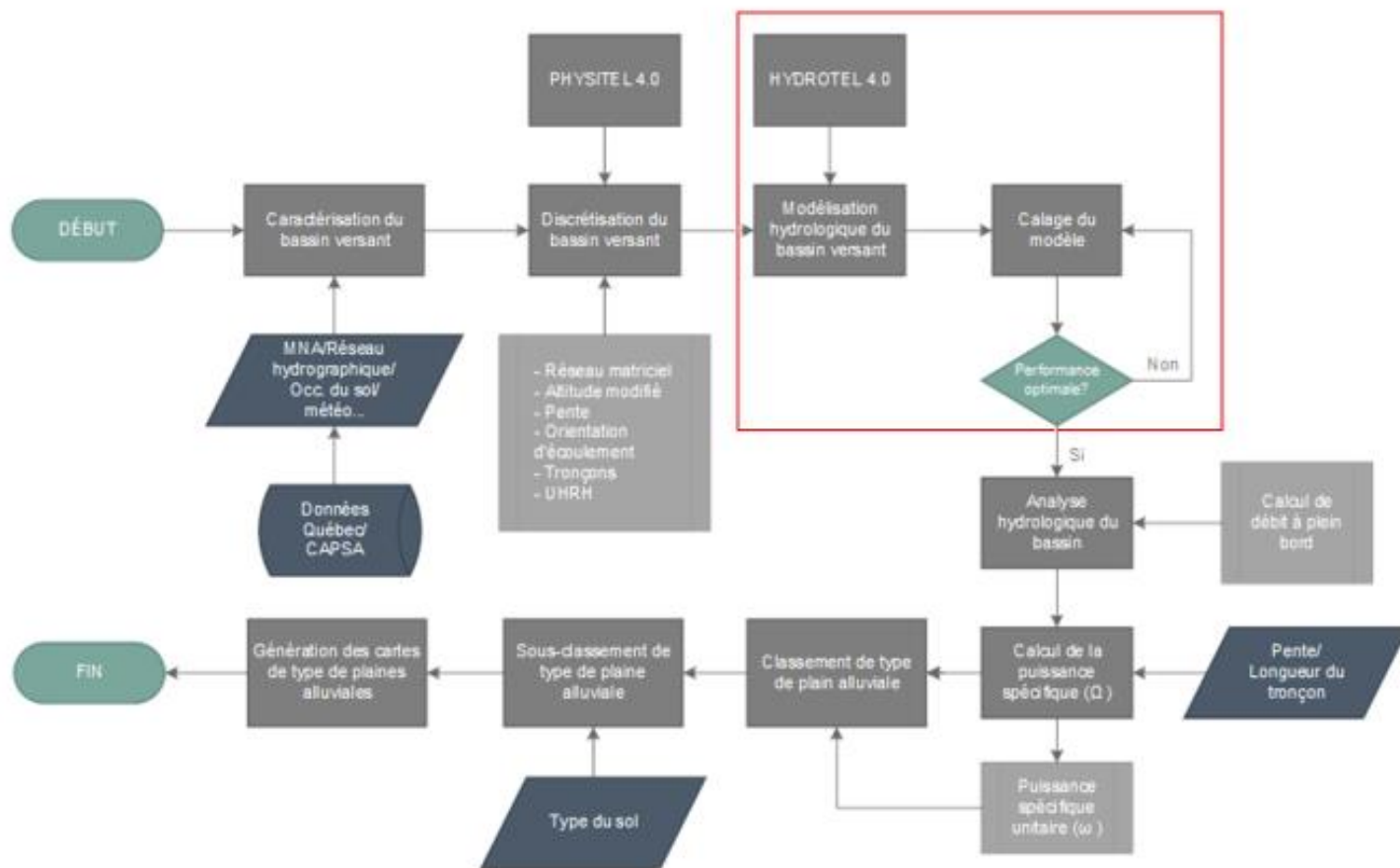
Segmentation en versants

UHRH: Unités de calcul des processus hydrologiques terrestres d'HYDROTEL

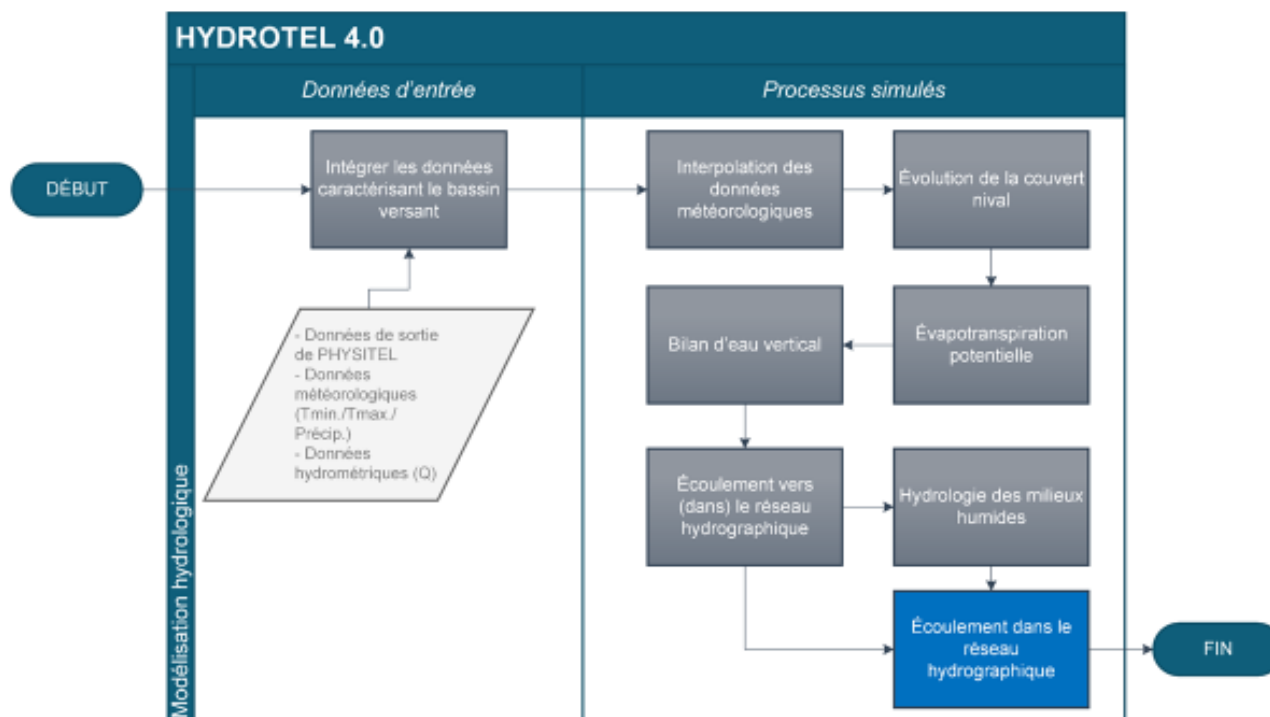


1. Pournier, R., et al., Outils d'analyse hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses terres du Saint-Laurent: adaptations aux changements climatiques, 2015.





Intégration du bassin versant dans HYDROTEL

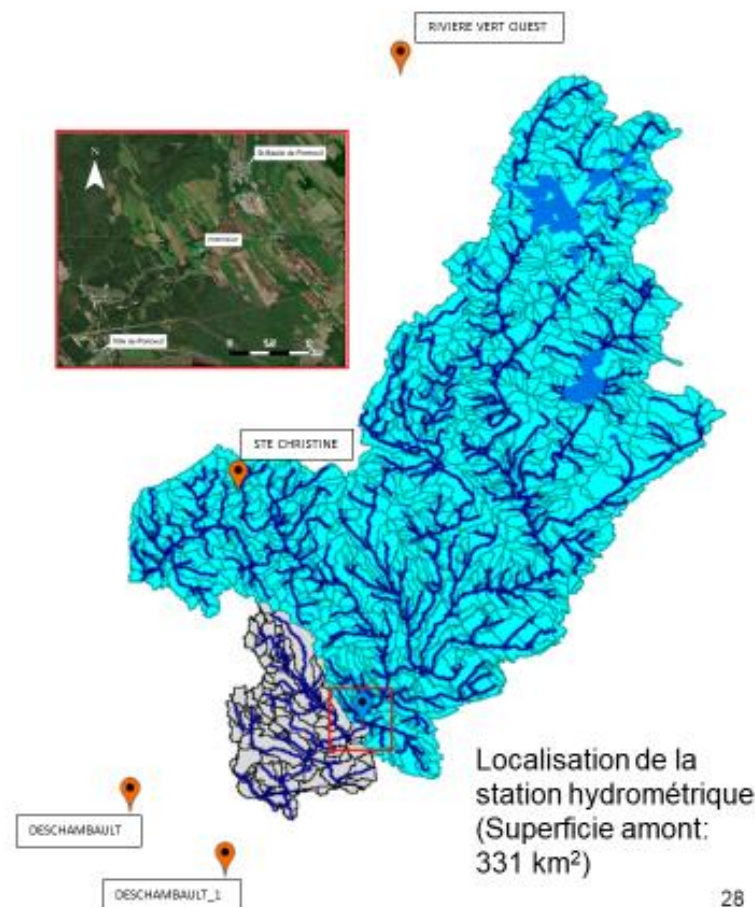


Intégration du bassin versant dans HYDROTEL

Calage du modèle

14 paramètres à ajuster afin de simuler les débits mesurés à la station hydrométrique du MELCC (050702 - Portneuf)

Processus hydrologiques	Sous-modèle utilisé
1. Interpolation des données météorologiques	Polygones de Thiessen (GT; GP; PPN)
2. Évolution de la couvert nival	Approche degré jour modifié (SFC; SFF; SFD; TFC; TFF; TFD)
3. Évapotranspiration potentielle	Mc-Guinness (METP)
4. Bilan d'eau vertical	Bilan vertical en trois couches (BV3C) (Z1; Z2; Z3; CR)
5. Écoulement vers le réseau hydrographique	Onde cinématique
6. Écoulement dans le réseau hydrographique	Onde cinématique modifiée
7. Hydrologie des milieux humides	Milieu humide isolé Milieu humide riveraine



Données
météorologiques



CaPA
(2000 - 2017)

Environnement
Canada
(~1950/70/98 - 2021)

Intégration du bassin versant dans HYDROTEL

Calage du modèle

Sources de données météorologiques



**IN
RS**

Institut national
de la recherche
scientifique

a. <https://hydrolync.com/store/pc/110-WS-32-Packaged-Weather-Station-p1143.htm>
b. Cette photo d'un auteur inconnu est sous licence CC BY-ND

29

Intégration du bassin versant dans HYDROTEL

Calage du modèle à la station 050702 - Portneuf

	SOURCES	CALAGE	VALIDATION
SCÉNARIOS	1 CaPA	2007 - 2017	2002 - 2006
	2 CaPA	2003 - 2017	
	3 EnvCan	2007 - 2017	2002 - 2006
	4 EnvCan	2003 - 2017	2018 - 2020
	5 EnvCan	2003 - 2020	

Intégration du bassin versant dans HYDROTEL

Calage du modèle à la station 050702 - Portneuf

Indicateurs de performance (Critères)

1. *Kling-Gupta efficiency score* (KGE)
2. *Nash-Sutcliffe efficiency with logarithmic values* (NSElog)
3. *Percentage bias* (PBIAS)
4. *Coefficient of determination* (R^2)
5. *Root mean squared error* (RMSE)

Kling-Gupta efficiency score (KGE)
(Évaluation des débits simulés)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

r = Corrélation linéaire entre débits observé et simulé
 α = Mesure de la variabilité relative
 β = Biais

Nash-Sutcliffe efficiency with logarithmic values (NSElog)
(Évaluation des débit d'étiage)

$$NSElog = 2 \cdot \alpha_{log} \cdot r_{log} - \alpha_{log}^2 - \beta_{log n}^2$$

α_{log} = Coefficient de corrélation linéaire
 r_{log} = Mesure de la variabilité relative
 $\beta_{log n}$ = Biais normalisé des logarithmes des débits

$KGE \rightarrow 1.0$

Bon compromis entre les
débits observés et simulés

$NSElog \rightarrow 1.0$

Intégration du bassin versant dans HYDROTEL

Calage du modèle – Indicateurs de performance

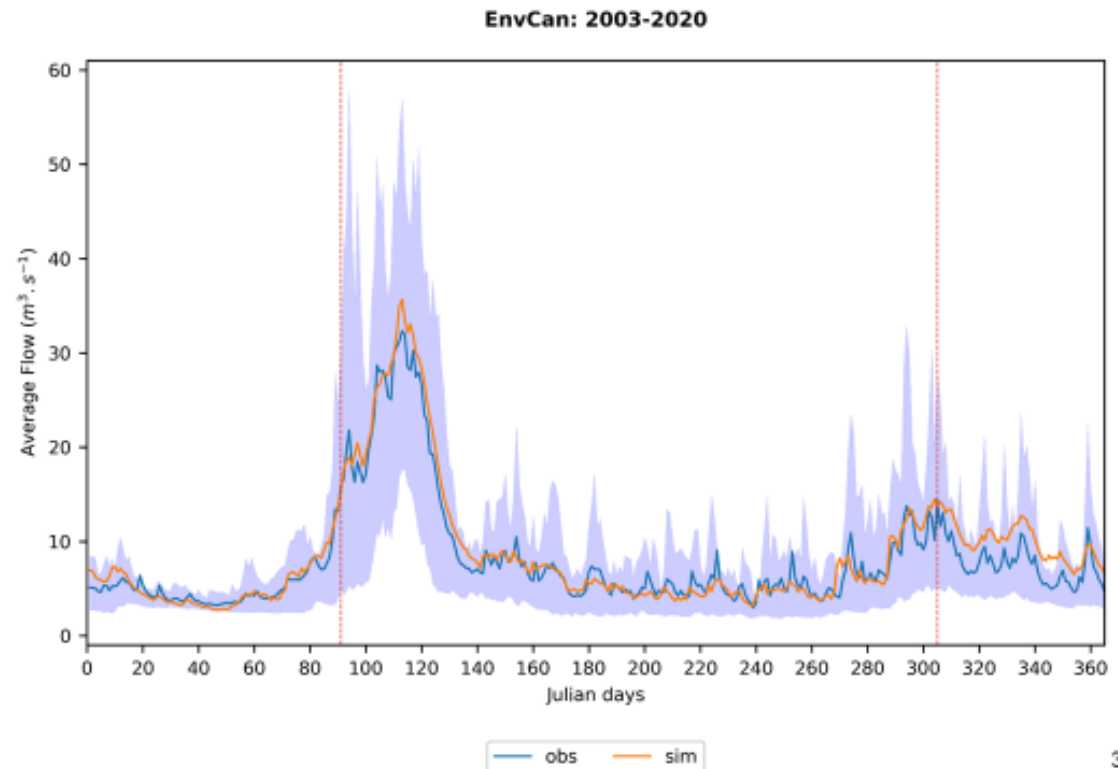
10 x 250 itérations (2 500) d'ajustements des paramètres avec la plateforme de calage automatique OSTRICH^[1,2]

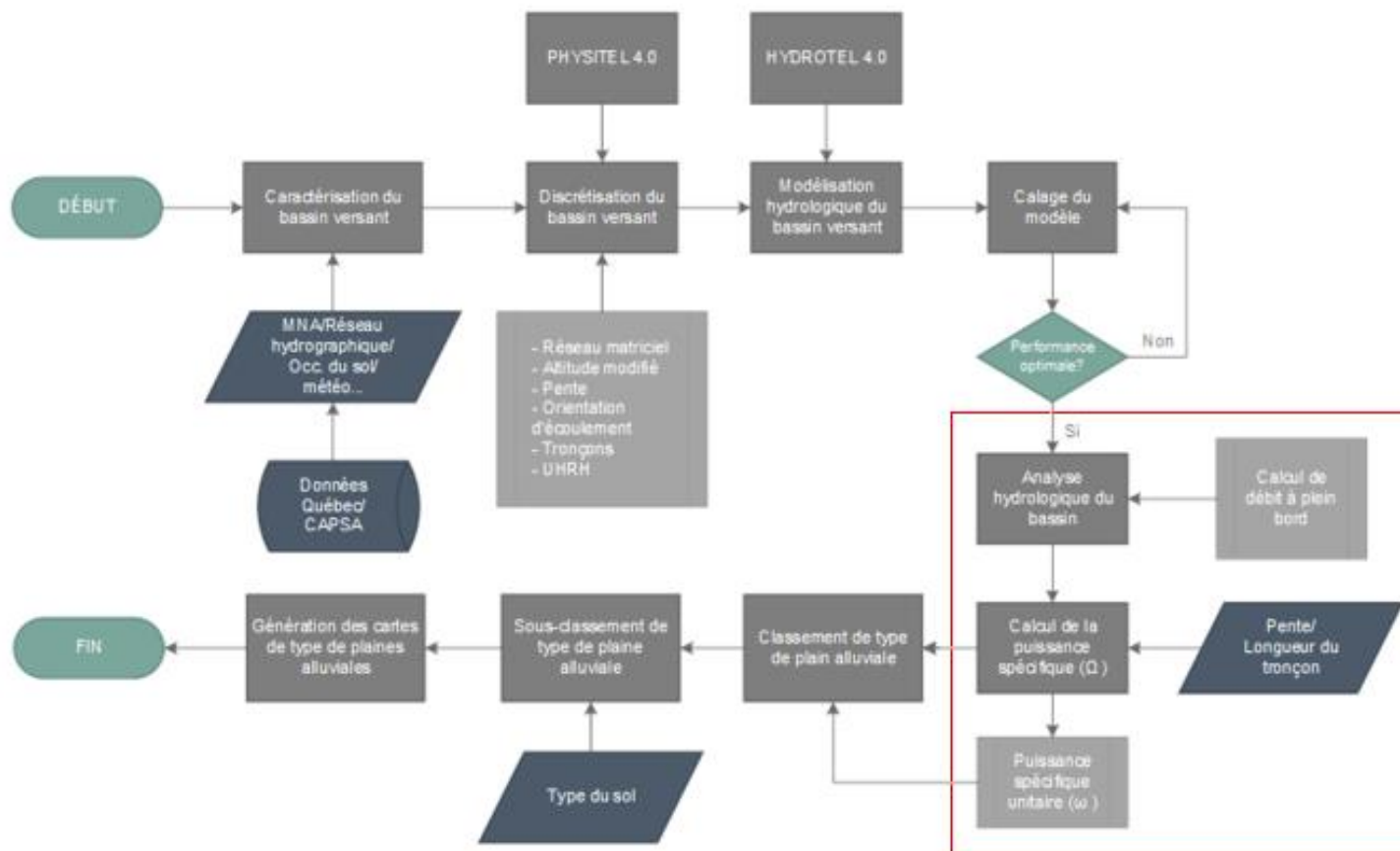
Données	Étape	N	Intervalle	KGE	NSElog	PBIAS	R ²	RMSE	\bar{Q}_{sim}
CaPA	C	11	2007-2017	0.788	0.880	3.414	0.828	2.735	9.345
	V	5	2002-2006	0.878	0.847	6.226	0.838	3.055	8.650
	C	15	2003-2017	0.872	0.896	0.759	0.876	2.298	9.260
EnvCan	C	11	2007-2017	0.968	0.907	0.053	0.942	1.589	9.345
	V	5	2002-2006	0.694	0.733	-1.036	0.722	4.007	8.650
	C	15	2003-2017	0.927	0.875	4.382	0.909	1.971	9.260
	V	3	2018-2020	0.645	0.797	-15.318	0.834	4.393	10.011
	C	18	2003-2020	0.909	0.929	2.947	0.957	1.459	9.387

Intégration du bassin versant de la rivière Portneuf dans HYDROTEL

Calage du modèle

Critère	Valeur
KGE	0.909
NSElog	0.929
PBIAS	2.947
R ²	0.957
RMSE (m ³ .s ⁻¹)	1.459
\bar{Q}_{sim} (m ³ .s ⁻¹)	9.387

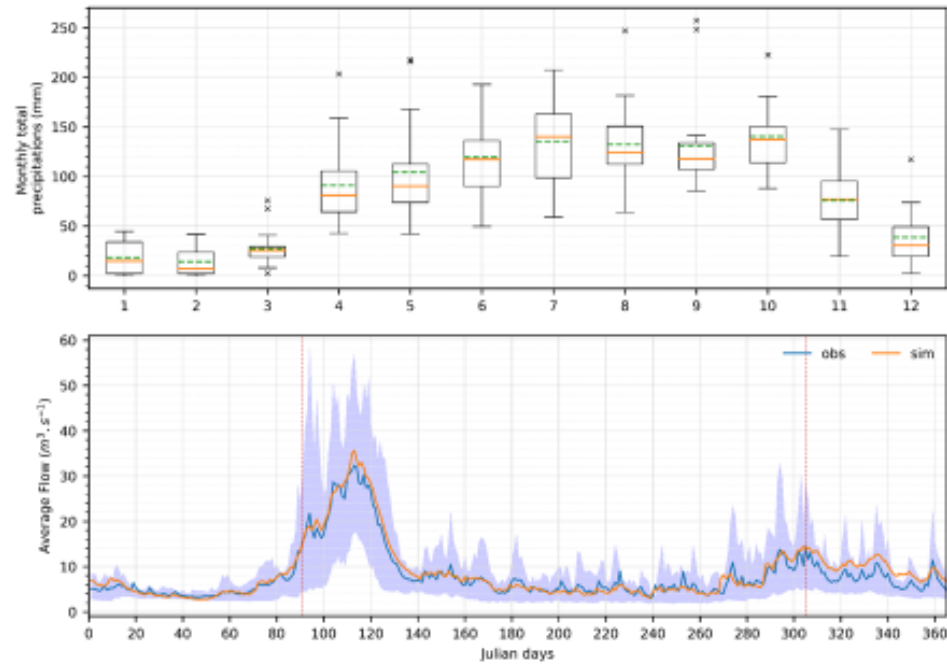
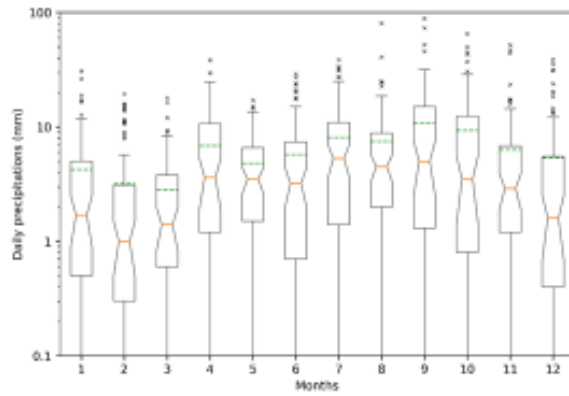




Bassin versant de la rivière Portneuf

Analyse hydrologique: Hydrogramme annuel et précipitations journalière et mensuelle

Variabilités interannuelles des précipitations journalières et totales mensuelles



Bassin versant de la rivière Portneuf

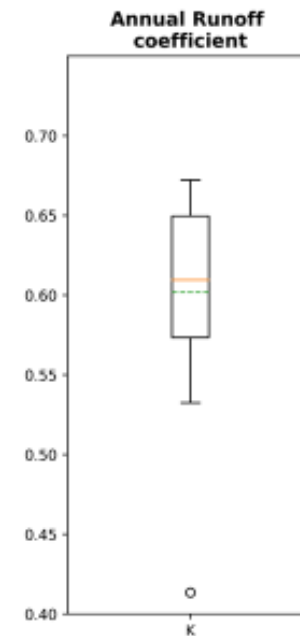
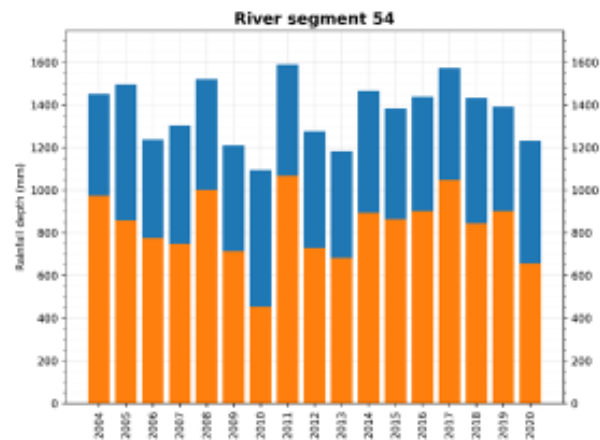
Analyse hydrologique: Coefficient de ruissellement (K)

Quotient de l'écoulement (ruissellement) annuel moyen à la station hydrométrique de Portneuf sur la précipitation annuelle moyenne en amont^[1]

Facteurs d'influence

- Type du sol
- Couverture végétale
- Pente et taille du bassin versant
- Conditions météorologiques

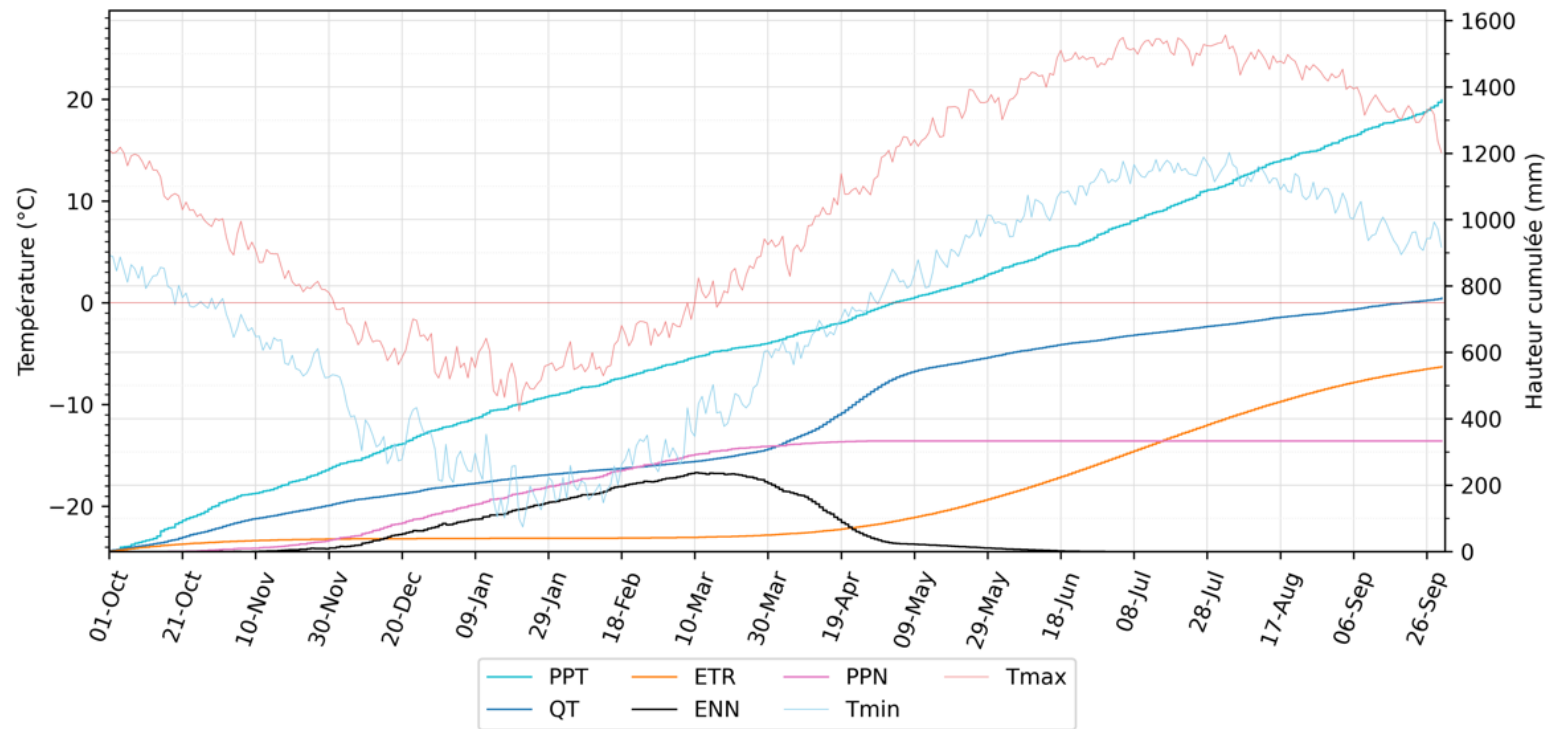
$$K = \frac{\text{Écoulement (mm)}}{\text{Précipitation (mm)}}$$



1. Critchley & Siergent (1991) Water harvesting: A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production – Rainfall-runoff analysis. FAO, Rome

Bassin versant de la rivière Portneuf

Bilan hydrologique cumulatif moyen selon l'année hydrologique
(1^{er} octobre au 30 septembre)



Bassin versant de la rivière Portneuf

Puissance fluviale

Estimer la capacité de transport sédimentaire d'un cours d'eau^[1]

$$\Omega = \rho \cdot g \cdot Q_b \cdot S$$

Ω = puissance fluviale (W m^{-1})

ρ = masse volumique de l'eau (1000 kg m^{-3})

g = accélération gravitationnelle ($9,8 \text{ m s}^{-2}$)

Q_b = débit à plein bord ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)

S = pente du cours d'eau (m m^{-1})

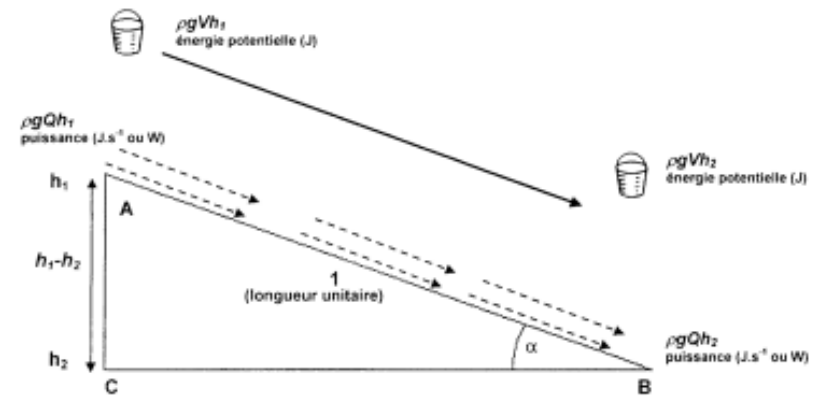
$$\omega = \frac{\Omega}{L}$$

ω = puissance spécifique fluviale (W m^{-2})

L = largeur du tronçon (m)

INRS

Institut national
de la recherche
scientifique



Perte d'énergie potentielle d'un écoulement d'eau sur un tronçon^[2]

1. Lagacé R. (2014) GAE-3005 Aménagement des cours d'eau et conservation des sols: Géomorphologie des cours d'eau. http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Documents/Notes_A2011/CH_05_Geomorpha.pdf
2. Schmitt, L., G. Maine, and J. Humbert. La puissance fluviale : définition, intérêt et limites pour une typologie hydro-géomorphologique de rivières. 2001.

Bassin versant de la rivière Portneuf

Débit de plein bord (*bankfull discharge*)

Débit ayant une récurrence de 1 à 5 ans^[1]

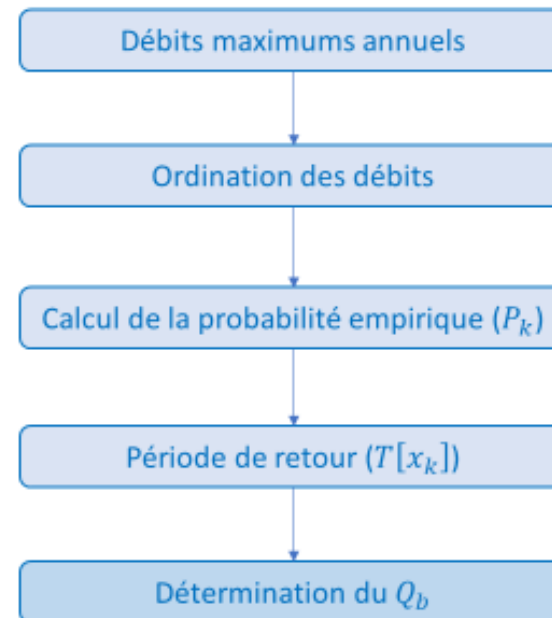
- Mise en mouvement de la charge de fond
- Modifications morphologiques du lit mineur



Débit de plein bord (comblement du lit mineur avant le débordement dans la plaine d'inondation)^[2]

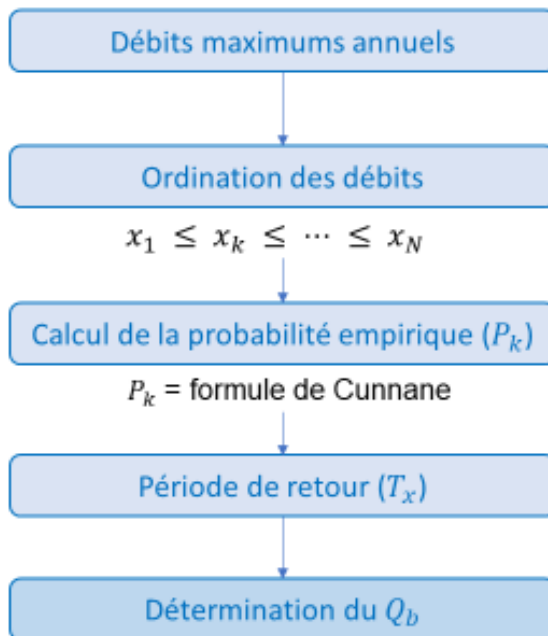


1. Lagacé R. (2014) GAE-3005 Aménagement des cours d'eau et conservation des sols: Géomorphologie des cours d'eau. http://www.grr.ulaval.ca/gae_3005/Documents/Notes_A2011/CH_05_Geomorpha.pdf
2. Gob, F., et al., Vers la construction d'indicateurs hydromorphologiques soutenant la biologie à partir de la base de données nationale CARHYCE. Valorisation des données CARHYCE. 2014.

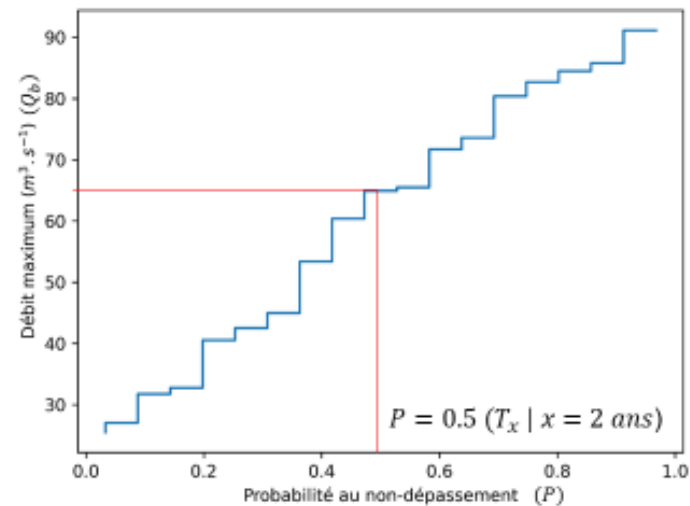


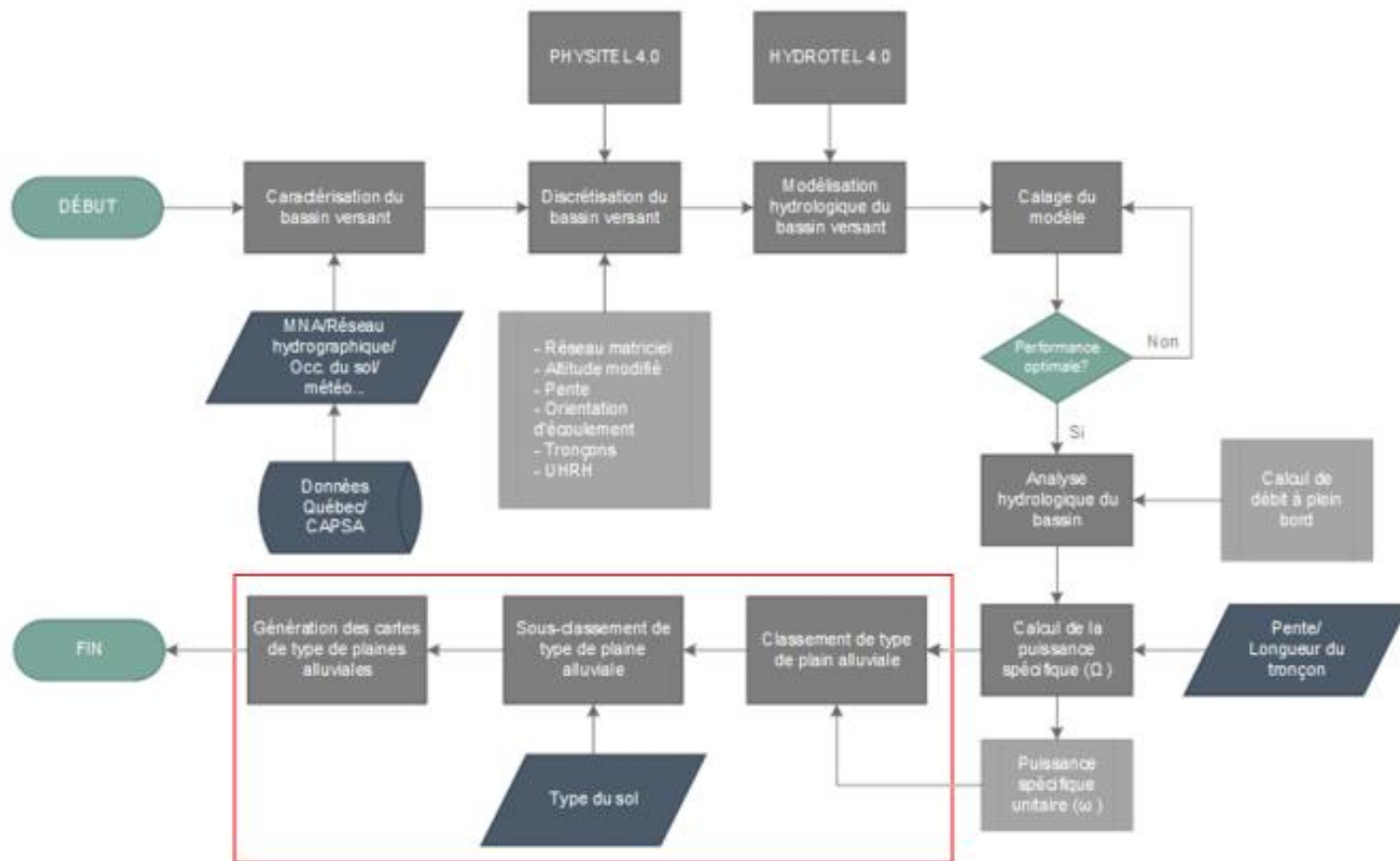
Bassin versant de la rivière Portneuf

Analyse fréquentielle pour l'obtention du débit de plein bord



$$P_k = \frac{k - 0,4}{N + 0,2} \quad T_x = \frac{1}{1 - P}$$



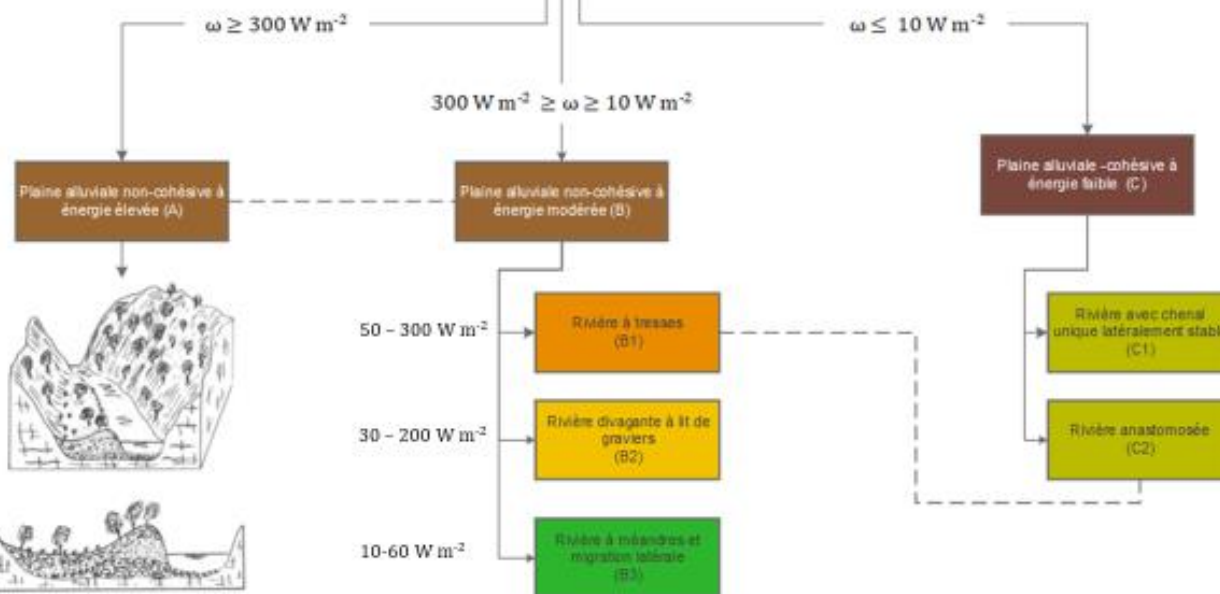




Calcul de la pente et du débit à plein bord

Calcul de la puissance spécifique unitaire (ω)

Classement de la plaine alluviale



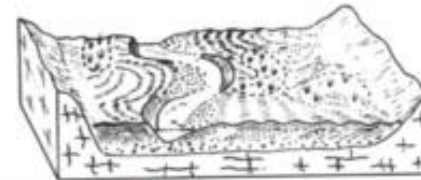
Types de plaines alluviales

Plaine alluviale non cohésive à énergie modérée^[1]

B1 – Rivière à tresses
 $\omega = 50 - 300 \text{ W m}^{-2}$



B3 – Rivière à méandres et migration latérale
 $\omega = 10 - 60 \text{ W m}^{-2}$



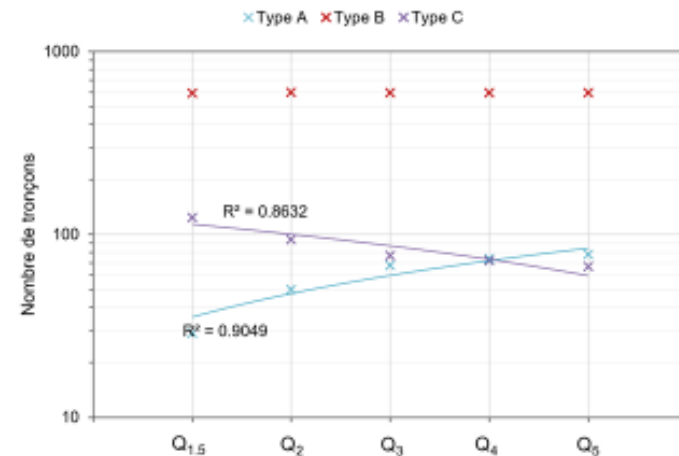
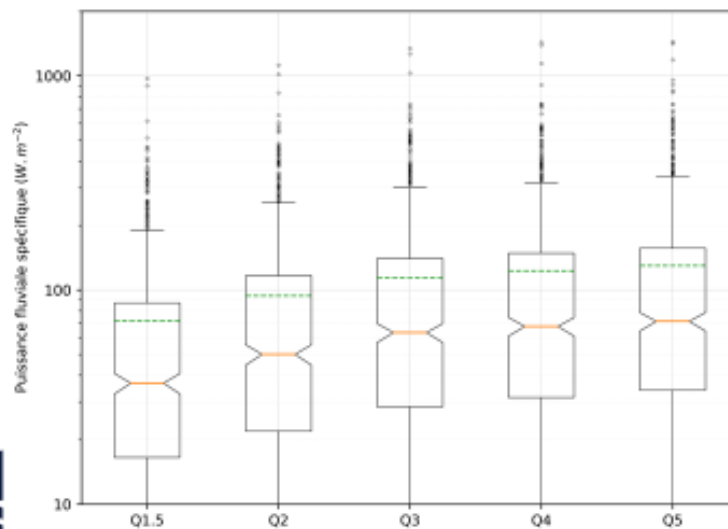
L'érosion du lit mineur directement corrélée avec la composition sédimentaire^[1]



Bassin versant de la rivière Portneuf

Types de plaines alluviales

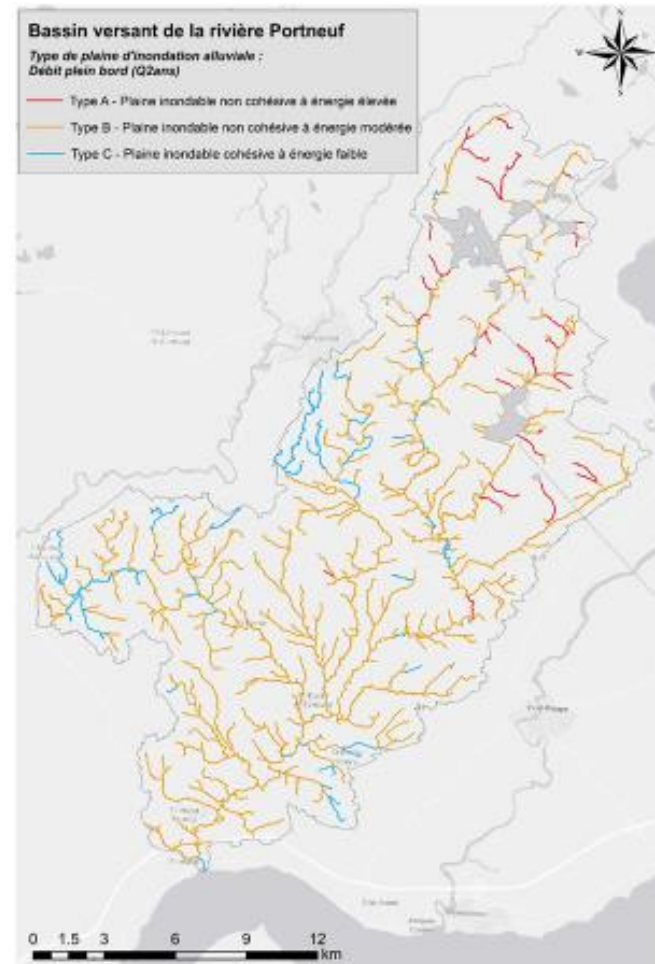
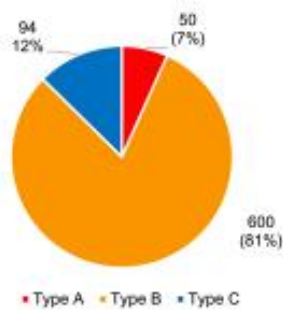
Puissance fluviale unitaire similaire pour les débits de périodes de retour de 3 à 5 ans



- Augmentation du nombre de tronçons ayant un classement type A (*non cohésive à énergie élevée*) avec l'augmentation de la période de retour (1,5 à 5 ans).
- Le cas inverse est observé pour le nombre de tronçons classés de type C.
- Un classement plutôt stable est observé pour les tronçons de type avec un nombre de tronçons autour de 600

Bassin versant de la rivière Portneuf

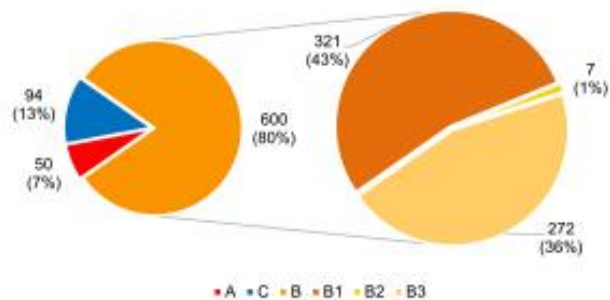
Types de plaines d'inondation alluviales
Débit de plein bord (Q_{2ans})



Bassin versant de la rivière Portneuf

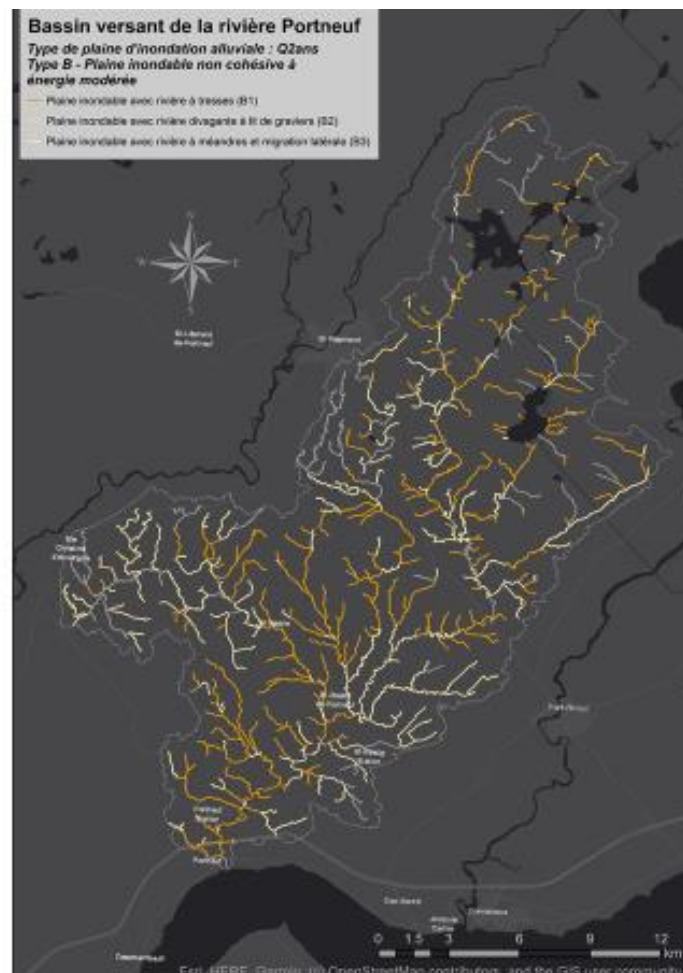
Types de plaines d'inondation alluviales
Débit de plein bord (Q_{2ans})

Type B – Plaine d'inondation non cohésive à énergie modérée



INRS

Institut national de la recherche scientifique



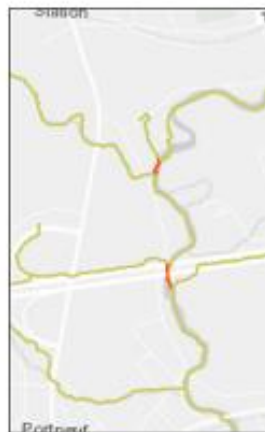
Bassin versant de la rivière Portneuf

Types de plaines alluviales – Débit plein bord (Q_{5ans})

Zone: Aut. 40 Félix-Leclerc (Tronçons 3) et Rue de la rivière (tronçon 8)

Type du sol: Sable loameux

Tronçon	ω	Type
3	309.85 W m ⁻²	A3
8	96.04 W m ⁻²	B1



+



»»»



A3 : Non confinée à accrétion verticale sableuse

B1 : Avec rivière à tresses

Bassin versant de la rivière Portneuf

Types de plaines alluviales – Débit plein bord (Q_{5ans})

Zone: Pont-de-la-Noreau (Tronçons 23)

Type du sol: Loam

Tronçon	ω	Type
23	58.67 $W m^{-2}$	B1/B3

B1 : Avec rivière à tresses

B3 : Rivière à méandre et migration latérale



+



»»»



Bassin versant de la rivière Portneuf

Types de plaines alluviales – Débit plein bord (Q_{5ans})

Zone: Saint-Basile (Tronçons 86 et 89)

Type du sol: Loam

Tronçon	ω	Type
86	97.83 W m ⁻²	B1
89	81.13 W m ⁻²	B1



+



»»»



Bassin versant de la rivière Portneuf

Types de plaines alluviales – Débit plein bord (Q_{5ans})

Zone: Rte Bédard (Tronçons 361)

Type du sol: Loam



Tronçon	ω	Type
361	126.56 W m ⁻²	B1



+



»»»



Bassin versant de la rivière Portneuf

Types de plaines alluviales – Débit plein bord (Q_{5ans})

Zone:

- Rte Bédard (Tronçons 366)
- Boul. Notre Dame – Club Golf Le Grand Portneuf (tronçon 370)

Type du sol: Loam (366), sable loameux (370)

Tronçon	ω	Type
366	191.47 W m ⁻²	B1
370	275.34 W m ⁻²	B1



+



»»»

INRS

Institut national
de la recherche
scientifique

1. Imagery ©2021 CNES / Airbus, Communauté(351 m/351)tropolitaine de Québec, Landsat / Copernicus, Maxar Technologies, Map data ©2021.

Bassin versant de la rivière Portneuf

Types de plaines alluviales – Débit plein bord (Q_{5ans})

Zone: Bourg-Louis-Station (Tronçons 484)

Type du sol: Sable loameux

Tronçon	ω	Type
484	77.52 W m ⁻²	B1

B1 : Avec rivière à tresses



+



»»»



Bassin versant de la rivière Portneuf

Types de plaines alluviales – Débit plein bord (Q_{5ans})

Zone: Lac au Chien (Tronçons 543)

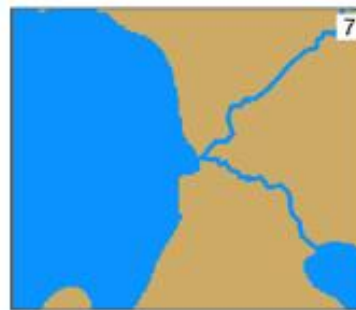
Type du sol: Loam limoneux

Tronçon	ω	Type
543	289.12 W m ⁻²	B1

B1 : Rivière à tresses



+



»»»



Travaux futurs...

L'érosion du lit mineur directement corrélée avec la composition sédimentaire^[1]

- Une validation des résultats du classement du type de plaines alluviales est nécessaire à partir des observations aux points d'intérêts.
- Les résultats de ces campagnes de terrain permettront d'obtenir de l'information plus détaillée sur la composition sédimentaire, ainsi que sur l'entourage écosystémique des tronçons d'étude, et ce afin de mieux cibler le sous-classement des points d'intérêts.

Travaux futurs

Analyse hydromorphologique des rivières

Effectuer une analyse de la qualité écologique et hydro-géomorphologique des rivières du bassin versant de la rivière Portneuf afin d'évaluer le niveau de dégradation du bassin.



Cette photo d'auteur inconnu est sous licence CC BY-NC-ND

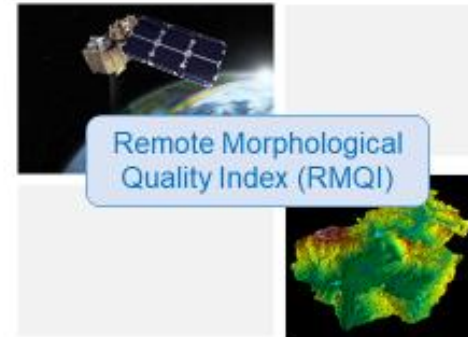
Travaux futurs

Analyse hydromorphologique des rivières

Effectuer une analyse **à distance** de la qualité écologique et hydro-géomorphologique des rivières du bassin versant de la rivière Portneuf afin d'évaluer le niveau de dégradation du bassin.



Cette photo d'auteur inconnu est sous licence CC BY-NC-ND



Cette photo d'auteur inconnu est sous licence CC BY-NC-ND

Travaux futurs

Morphological Quality Index (MQI)

Geomorphology 395 (2021) 108002



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Geomorphology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/geomorph



Can the Morphological Quality Index (MQI) be used to determine the ecological status of lowland rivers?



Johnathan Lemay^a, Pascale M. Biron^{a,*}, Maxime Boivin^b, Nicolas Stämpfli^a, Kyleisha Foote^a

^a Department of Geography, Planning and Environment, Concordia University, 1455 Boulevard de Maisonneuve West, Montreal, Quebec H3G 1M8, Canada

^b Département des sciences humaines et sociales, Université du Québec à Chicoutimi, 555 Boulevard de l'Université, Chicoutimi, Quebec G7H 2B1, Canada

INRS

Institut national
de la recherche
scientifique

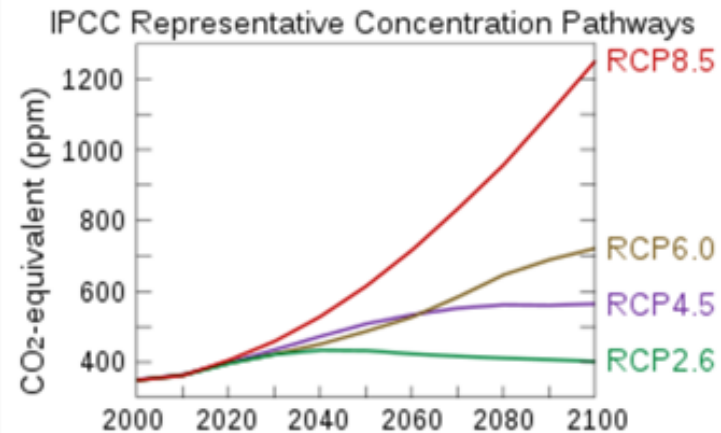
1. Lemay, J., et al., Can the Morphological Quality Index (MQI) be used to determine the ecological status of lowland rivers? Geomorphology, 2021. 395: p. 108002.

Travaux futurs

Modélisation hydroclimatique - *Utilisation des données de sorties des modèles de climat par des modèles hydrologiques*

Expérience climatique future

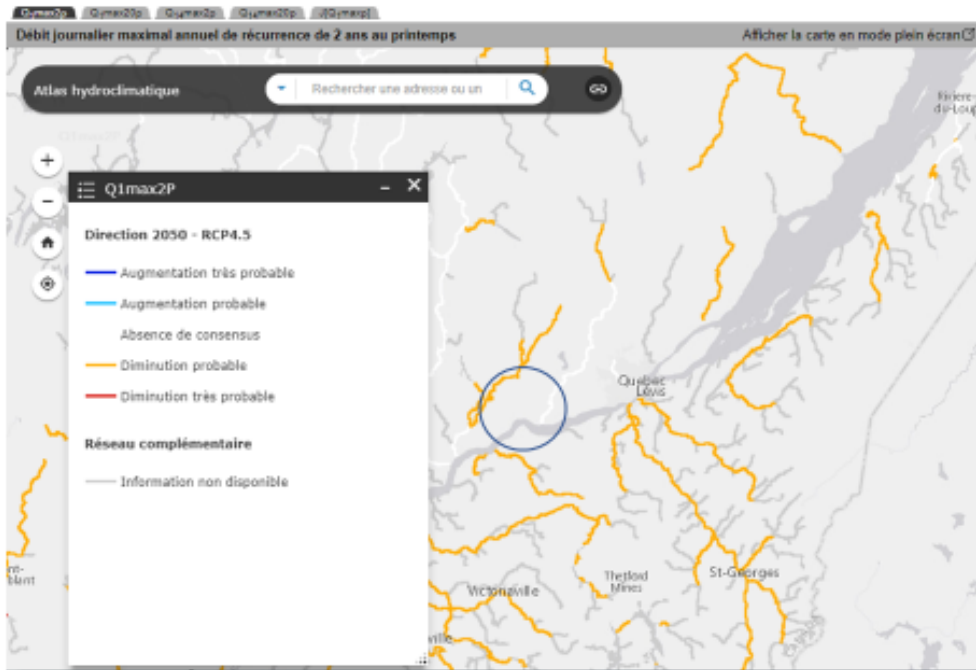
- Scénarios d'émission de GES du GIEC (*Representative Concentration Pathways, RCPs*) basés sur différentes projections
 - Émission de GES
 - Concentrations de polluants atmosphériques (contrôle de la pollution)
 - Changements d'occupations de sol (de la déforestation à la reforestation)



Atlas hydroclimatique du Québec méridional

L'Atlas hydroclimatique décrit le régime hydrique actuel et futur du Québec méridional dans le but de soutenir la mise en œuvre de pratiques de gestion de l'eau résilientes aux changements climatiques. Notez que les résultats relatifs aux horizons 2030 et 2080 sont décrits dans les fiches synthèse associées à chaque tronçon de rivière.

Crues printanières | Crues estivales et automnales | Étiages hivernaux | Étiages estivaux | Hydraulique | Définitions des indicateurs



Atlas hydroclimatique du Québec méridional

L'Atlas hydroclimatique décrit le régime hydrique actuel et futur du Québec méridional dans le but de soutenir la mise en œuvre de pratiques de gestion de l'eau résilientes aux changements climatiques. Notez que les résultats relatifs aux horizons 2030 et 2080 sont décrits dans les fiches synthèse associées à chaque tronçon de rivière.

Cruces printanières **Cruces estivales et automnales** Étages hivernaux Étages estivaux Hydraulique Définitions des indicateurs



Atlas hydroclimatique du Québec méridional

L'Atlas hydroclimatique décrit le régime hydrique actuel et futur du Québec méridional dans le but de soutenir la mise en œuvre de pratiques de gestion de l'eau résilientes aux changements climatiques. Notez que les résultats relatifs aux horizons 2030 et 2080 sont décrits dans les fiches synthèse associées à chaque tronçon de rivière.

Cruces printanières Cruces estivales et automnales Étages hivernaux **Étages estivaux** Hydraulité Définitions des indicateurs





Merci de votre attention

**IN
RS**

Institut national
de la recherche
scientifique

Québec 

