

Institut National de la Recherche Scientifique

Centre Eau Terre Environnement

**ÉVALUATION DE LA VALEUR AJOUTÉE
DES DONNÉES PHYSIOGRAPHIQUES À HAUTE RÉOLUTION
DANS LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DISTRIBUÉE:
CAS D'APPLICATION DE LA PLATEFORME PHYSITEL-HYDROTEL
SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE ST-CHARLES, QUÉBEC, CANADA.**

Par

Eduardo Scarpari Spolidorio Junior

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

Sophie Duchesne
INRS-ETE

Examineur externe

Annie Poulin
Génie de la construction
École de technologie supérieure

Directeur de recherche

Alain N. Rousseau ing. Ph. D.
INRS-ETE

REMERCIEMENTS

J'aimerais dédier mes premiers remerciements au professeur Alain N. Rousseau pour l'opportunité de faire des études de 2^e cycle. Son accompagnement minutieux, sa confiance, sa disponibilité, son esprit d'équipe, et son amitié au cours des deux dernières années m'ont permis de vivre un esprit de famille ici au Canada.

Je tiens également à remercier mon équipe d'hydrologie pour son indispensable support ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire: Marianne Blanchette, Cheick Doumbia, Ralph Dimitri, Yanfeng Wu, Julien Augas, Stéphane Savary, Etienne Foulon et Sébastien Tremblay.

Je dédie ce mémoire également à ma famille et à mes parents : Eduardo Scarpari Spolidorio, Rosana Duarte Spolidorio, Vinicius, Felipe, Willy, Regina et Lorimar pour leurs encouragements et leur support dans les moments où j'en avais le plus besoin au Brésil. Je remercie spécialement, ma femme, Carolina de Almeida Boccio pour son support et sa patience tout au long de ce chemin, appelé rêve.

Je voudrais remercier mes amis : Gilberto Cidreira, Juliano Vincler, Paulo Tabarros, Gabriel Oyan, Charles Gignac et Audrey Moffett pour leur aide soutenue tout au long de la réalisation de ce mémoire.

RÉSUMÉ

L'accès à des données physiographiques à haute résolution spatiale pour supporter la modélisation hydrologique suscite un très grand intérêt, mais peu d'études ont démontré leur valeur ajoutée quant à la simulation des processus d'écoulement. Une évaluation détaillée du comportement du modèle semi-distribué HYDROTEL a été réalisée afin d'explorer les impacts de ces données sur la modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Saint-Charles à Québec. À l'aide du logiciel PHYSITEL, un système d'information géographique (SIG) conçu pour supporter la mise en place de modèles hydrologiques distribués, nous avons construit différents scénarios à partir de données physiographiques à haute résolution tels que : (i) les modèles numériques d'altitude (MNA), (ii) les données pédologiques et (iii) le système de drainage urbain. Parmi ceux-ci, on retrouve trois modèles numériques d'altitude (MNA à des résolutions spatiales de 20, 10 et 5 mètres) dérivés de données LIDAR (*Light Detection and Ranging*), deux cartes pédologiques et deux réseaux hydrographiques avec ou sans système de drainage urbain (*i.e.*, réseau de canalisations principales du système pluvial considéré comme des cours d'eau). Le calage des modèles (*i.e.*, scénarios) a été effectué automatiquement sur les paramètres les plus sensibles du modèle sur chaque sous-bassin en utilisant l'algorithme *Dynamically Dimensioned Search* (DDS). Les différents scénarios ont été évalués à travers l'analyse de leurs hydrogrammes, les valeurs des paramètres de calage et des indicateurs de performance comme : le coefficient de Kling-Gupta (KGE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le pourcentage de biais (PBIAS).

Les résultats de cette étude ont démontré que la résolution des MNA a un impact très significatif sur le découpage du bassin hydrographique en unités de calcul appelées unités hydrologiques relativement homogènes (UHRHs) ainsi que sur leurs attributs topographiques (pente, élévation et superficie), spécialement pour les sous-bassins semi-urbanisés. L'utilisation de résolutions spatiales plus fines a permis d'améliorer la performance d'HYDROTEL, principalement au niveau du comportement des débits de crue et d'étiage. Les résultats ont confirmé que le système de drainage urbain associé à la résolution spatiale la plus fine du MNA augmentait la performance du modèle pour certains sous-bassins de la rivière St-Charles. Cette amélioration est associée à la capacité du modèle à mieux reproduire les processus d'écoulement sur le territoire. En ce qui concerne la valeur ajoutée de la carte pédologique à travers la reclassification des polygones en fonction de la texture du sol, les résultats ne démontrent pas d'impact significatif sur les processus hydrologiques du bassin versant de la rivière Saint-Charles. Cela s'explique en partie par la présence d'un territoire urbanisé dans les zones où il y a les plus grandes différences entre les

deux cartes pédologiques. La forte imperméabilisation de ces zones limite l'impact de la résolution de la carte pédologique.

Mots clés : Modélisation hydrologique ; Bassin versant ; Système de drainage urbain ; Modèles numériques d'altitude ; Données pédologiques

ABSTRACT

Access to high-resolution physiographic data to support hydrological modeling is of great interest, but few studies have demonstrated their added value in simulating flow processes. A detailed evaluation of the behavior of the HYDROTEL semi-distributed model was conducted to explore the effects of these data on the hydrological modeling of the St. Charles River basin in Quebec, Canada. Using PHYSITEL, a geographic information system (GIS) designed to support the implementation of distributed hydrological models, we constructed different scenarios from high-resolution physiographic data such as: (i) digital elevation models (DEMs), (ii) soil data, and (iii) urban drainage systems. Among these were three digital elevation models (DEM at spatial resolutions of 20, 10 and 5 m) derived from Light Detection and Ranging (LiDAR) data, two soil maps and two hydrographic networks with or without urban drainage (*i.e.*, network of main pipes of the surface runoff system considered as watercourses). Model (*i.e.*, scenario) calibration was performed automatically using the most sensitive parameters of the model on each sub-basin using the Dynamically Dimensioned Search (DDS) algorithm. The different scenarios were evaluated through analysis of their mean annual hydrographs, calibrated parameter values and performance indicators such as: Kling-Gupta Coefficient (KGE), RMSE and Percentage bias (PBIAS).

The results of this study have shown that the resolution of DEMs has a very significant impact on the division of the basin into computational hillslope units referred to as relatively homogeneous hydrological units (RHHUs) as well as on their topographic attributes (slope, elevation and area), especially for semi-urbanized sub-basins. The use of finer spatial resolutions has improved the performance of HYDROTEL, mainly for peak and low flows. The results confirmed that combining the urban drainage system with the finest spatial resolution DEM can increase model performance for some urbanized sub-basins of the St. Charles River. This improvement is associated with the ability of the model to better reproduce flow processes on the territory. Regarding the added value of the soil map through the reclassification of soil polygons according to soil texture, the results did not show any significant impact on the hydrological processes of the St. Charles River basin. This is partly explained by the presence of urbanized areas where there were the greatest differences between the two soil maps; the imperviousness of these areas limiting the impact of the soil map resolution.

Key words: Hydrological modeling; Watershed; Urban drainage system; Soil data

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XVII
LISTE DES ÉQUATIONS	XIX
1 INTRODUCTION.....	1
2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 MODELISATION HYDROLOGIQUE : LES DONNEES A HAUTE RESOLUTION.....	3
2.2 ÉVALUATION DES IMPACTS DE LA RESOLUTION SPATIALE DES MODELES NUMERIQUES D'ALTITUDE.....	3
2.3 ÉVALUATION DES IMPACTS DE LA RÉOLUTION ET DE LA SOURCE DES DONNÉES DE SOLS.....	10
2.4 ÉVALUATION DES IMPACTS DE LA RÉOLUTION SPATIALE SUR L'EXTRACTION DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE	12
2.5 RESUME ET DISCUSSION.....	14
3 MATÉRIEL ET MÉTHODES	17
3.1 TERRITOIRE D'ÉTUDE	17
3.2 LA PLATEFORME DE MODELISATION HYDROLOGIQUE PHYSITEL/HYDROTEL.....	19
3.3 DONNEES PHYSIOGRAPHIQUES	21
3.3.1 <i>Modèles numériques d'altitude</i>	22
3.3.2 <i>Occupation du sol</i>	22
3.3.3 <i>Type de sol</i>	23
3.3.4 <i>Réseau vectoriel</i>	25

3.3.5	<i>Données hydrométéorologiques</i>	27
3.4	SYSTÈME DE DRAINAGE URBAIN: CONSTITUTION D'UN SYSTÈME SIMPLIFIÉ ET INTÉGRATION AU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE D'HYDROTEL	28
3.5	SCENARIOS ET STRATEGIES.....	38
3.6	LE CHOIX DES PÉRIODES DE CALAGE ET DE VALIDATION.....	39
3.7	CALAGE	40
3.8	INDICATEURS DE PERFORMANCE METRIQUES	42
3.9	SENSIBILITÉ DE LA MODÉLISATION À LA RÉOLUTION	44
4	RÉSULTATS ET DISCUSSION	45
4.1	IMPACT DE LA RESOLUTION SPATIALE DU MNA SUR L'HYDROLOGIE	45
4.1.1	<i>Analyse des attributs topographiques</i>	46
4.1.2	<i>Calage et validation des modèles</i>	53
4.1.3	<i>Analyse des paramètres</i>	54
4.1.4	<i>Performance du modèle</i>	58
4.1.5	<i>Sensibilité de la modélisation à la résolution du MNA</i>	63
4.2	IMPACT HYDROLOGIQUE DU SYSTEME DE DRAINAGE URBAIN	65
4.2.1	<i>Analyse des attributs topographiques</i>	65
4.2.2	<i>Calage et Validation</i>	68
4.2.3	<i>Analyse de paramètres</i>	70
4.2.4	<i>Performance du modèle</i>	73
4.2.5	<i>Sensibilité de la modélisation au réseau hydrographique</i>	80
4.3	IMPACT HYDROLOGIQUE DE LA CARTE PÉDOLOGIQUE	83
4.3.1	<i>Analyse des classes pédologiques</i>	83
4.3.2	<i>Analyses des propriétés hydrauliques des classes pédologiques</i>	87
4.3.3	<i>Calage et validation</i>	93
4.3.4	<i>Analyse de paramètres</i>	94

4.3.5	<i>Performance du modèle</i>	97
4.3.6	<i>Sensibilité de la modélisation aux données d'entrée</i>	100
5	CONCLUSION	103
6	BIBLIOGRAPHIE	105
7	ANNEXE	114

LISTE DES FIGURES

FIGURE 3.1. BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES, QUEBEC	18
FIGURE 3.2. DONNEES D'ENTREE POUR LA PREPARATION DU BASSIN VERSANT AVEC PHYSITEL. À NOTER ICI QUE LES UHRHS SONT DU TYPE VERSANT.	19
FIGURE 3.3. LOCALISATION DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES AVEC LES SOUS-BASSINS HYDROGRAPHIQUES, L'EXUTOIRE DE CHAQUE SOUS-BASSIN ET LA CARTE D'OCCUPATION DU SOL DE 2014 (BLANCHETTE ET AL. 2019) EN UTILISANT LES DELIMITATIONS DU BASSIN VERSANT FOURNIES PAR LA VILLE DE QUEBEC.	23
FIGURE 3.4. LES CARTES DE TYPE DE SOL DU BASSIN DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES, QUEBEC : (A) PEDO-PAYSAGES DU CANADA V3.1 AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE CANADA 2010 ET (B) ATLAS DU CADRE ECOLOGIQUE DE REFERENCE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES.....	24
FIGURE 3.5. HYDROGRAPHIE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES EN UTILISANT LA DELIMITATION DU BASSIN VERSANT FOURNIE PAR LA VILLE DE QUEBEC.	27
FIGURE 3.6. LES STATIONS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES : (A) LOCALISATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES ET HYDROMETRIQUES ET (B) LOCALISATION REGIONALE DU BASSIN VERSANT.....	28
FIGURE 3.7. BASSIN HYDROGRAPHIQUE DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES ET LE SYSTEME DE DRAINAGE URBAIN REPARTIS SUR TOUT LE TERRITOIRE.	29
FIGURE 3.8. COMPOSANTES ET ELEMENTS STRUCTURELS DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE DE LA VILLE DE QUEBEC, CANADA.....	31
FIGURE 3.9. COMPOSANTES DU SYSTEME D'ALIMENTATION DE L'EAU POTABLE DE LA VILLE DE QUEBEC	32
FIGURE 3.10. SYSTEME D'EGOUT DE LA VILLE DE QUEBEC, CANADA.....	33
FIGURE 3.11. SYSTEME DE COLLECTE DES EAUX PLUVIALES ET UNITAIRES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES, QUEBEC.	35
FIGURE 3.12. SCHEMA METHODOLOGIQUE DES CONNEXIONS ETABLIES ENTRE LE SYSTEME HYDROGRAPHIQUE ET LE SYSTEME DE COLLECTE DES EAUX PLUVIALES URBAINES DANS LE BASSIN DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES.....	36

FIGURE 3.13. SITUATIONS RENCONTREES DANS LA MISE EN ŒUVRE DU SYSTEME DE DRAINAGE URBAIN DE LA VILLE DE QUEBEC DANS LE RESEAU HYDROGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES.	37
FIGURE 3.14. LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES DANS LA PLATEFORME PHYSITEL/HYDROTEL, LES SOUS-BASSINS HYDROGRAPHIQUES, LES NOUVELLES DELIMITATIONS DES SOUS-BASSINS ET LE SYSTEME DE DRAINAGE URBAIN DE LA VILLE DE QUEBEC.	38
FIGURE 3.15. SCHEMA METHODOLOGIQUE D'ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA MODELISATION A LA RESOLUTION.....	44
FIGURE 4.1. DISTRIBUTION DU NOMBRE D'UHRH AYANT DES PENTES COMPRISES DANS DIFFERENTS INTERVALLES POUR CHAQUE SOUS-BASSIN A DIFFERENTES RESOLUTIONS SPATIALES	48
FIGURE 4.2. DISTRIBUTION DE LA SUPERFICIE MOYENNE DES UHRH PRESENTS DANS CHAQUE SOUS-BASSIN A DIFFERENTES RESOLUTIONS SPATIALES	50
FIGURE 4.3. COMPARAISON DES DELIMITATIONS DES UHRH DU SOUS-BASSIN NELSON PAR LE LOGICIEL PHYSITEL A UNE ECHELLE SPATIALE DE (A) 20 M (SCENARIO 2) ET (B) 5 M (SCENARIO 8). LES DEUX SONT SANS LE SYSTEME DE DRAINAGE.	52
FIGURE 4.4. DIAGRAMMES EN TOILE D'ARAIGNEE DES 11 PARAMETRES TRANSFORMES UTILISES POUR LE CALAGE AUTOMATIQUE DE HYDROTEL POUR CHAQUE SOUS-BASSIN DES SCENARIOS 2, 6 ET 8.	56
FIGURE 4.5. HYDROGRAMMES DE DEBITS MOYENS JOURNALIERS DE CHAQUE SOUS-BASSIN DES SCENARIOS 2, 6, 8 SANS SDU.	60
FIGURE 4.6. HYDROGRAMMES DE DEBITS MOYENS JOURNALIERS SAISONNIER POUR LE SOUS-BASSIN JAUNE.....	61
FIGURE 4.7. DEBITS CLASSES DES SOUS-BASSINS DES HURONS (I) ET JAUNE (II) EN COMPARANT LES SCENARIOS A DIFFERENTES ECHELLES SPATIALES.....	63
FIGURE 4.8. COMPARAISON DES DELIMITATIONS DES UHRHS PAR LE LOGICIEL PHYSITEL A UNE ECHELLE SPATIALE DE 5 M POUR LE SCENARIO 8 (A) ABSENCE DE SDU ET LE SCENARIO 7(B) PRESENCE DE SDU.	68
FIGURE 4.9. DIAGRAMMES EN TOILE D'ARAIGNEE DES 11 PARAMETRES TRANSFORMES UTILISES POUR LE CALAGE AUTOMATIQUE D'HYDROTEL POUR CHAQUE SOUS-BASSIN DES SCENARIOS 1, 5 ET 7 ...	71
FIGURE 4.10. HYDROGRAMMES DES DEBITS MOYENS JOURNALIERS SIMULES POUR CHAQUE SOUS-BASSIN AVEC ET SANS LE SDU.....	75

FIGURE 4.11. COURBES DES DEBITS CLASSES A DEUX ECHELLES SPATIALES (A) 20 METRES; (B) 5 METRES DU SOUS-BASSIN DU BERGER EN COMPARANT LES SCENARIOS AVEC ET SANS LA PRESENCE DU SDU.....	79
FIGURE 4.12. HYDROGRAMMES ANNUELS MOYENS SUITE AU CHANGEMENT DE PARAMETRES POUR LE SOUS-BASSIN DU BERGER.....	82
FIGURE 4.13. TYPES DE SOLS UTILISES PAR HYDROTEL DANS LES SIMULATIONS HYDROLOGIQUES A 20 M DE RESOLUTION SPATIALE.	85
FIGURE 4.14. TYPES DE SOLS UTILISES PAR HYDROTEL DANS LES SIMULATIONS HYDROLOGIQUES A 5 METRES DE RESOLUTION SPATIALE.....	87
FIGURE 4.15. SCHEMA REPRESENTATIF DU BILAN D'EAU VERTICAL APPLIQUE A UNE UHRH DE TYPE VERSANT DANS LE MODELE HYDROTEL.....	89
FIGURE 4.16. DIFFERENCES RELATIVES, EN POURCENTAGE, DES TENEURS EN EAU DE SOL DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES.	90
FIGURE 4.17. DIAGRAMMES EN TOILE D'ARAIGNEE DES 11 PARAMETRES UTILISES POUR LE CALAGE AUTOMATIQUE DE HYDROTEL POUR CHAQUE SOUS-BASSIN DES SCENARIOS 2,4, 8 ET 10.	95
FIGURE 4.18. HYDROGRAMMES DE DEBITS MOYENS JOURNALIERS SIMULES EN COMPARANT LES TYPES DE SOL (A) ET (B).	99
FIGURE 4.19. HYDROGRAMMES ANNUELS MOYENS SUITE AU CHANGEMENT DE PARAMETRES POUR LE SOUS-BASSIN LORETTE.	102

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 3.1. SOUS-MODELES ET ALGORITHMES DISPONIBLES DANS HYDROTEL	20
TABLEAU 3.2. LES CLASSES DE TYPE DE SOL (PHYSITEL).....	25
TABLEAU 3.3. DESCRIPTION DES SCENARIOS ET DES DONNEES PHYSIOGRAPHIQUES UTILISEES DANS LA PLATEFORME PHYSITEL/HYDROTEL.....	39
TABLEAU 3.4. LES STATIONS HYDROMETRIQUES PRESENTES DANS LES SOUS-BASSINS DE LA RIVIERE SAINT-CHARLES ET LES PERIODES DE CALAGE ET DE VALIDATION UTILISEES.....	40
TABLEAU 3.5. VALEURS LIMITES DES PARAMETRES UTILISES POUR LE CALAGE DES DIX SCENARIOS .	41
TABLEAU 3.6. INDICATEURS DE PERFORMANCES METRIQUES GOODNESS-OF-FIT-INDICATORS (GOFIS)	43
TABLEAU 4.1. PENTE MOYENNE PONDEREE DES SOUS-BASSINS A DIFFERENTES RESOLUTION SPATIALES.....	46
TABLEAU 4.2. SUPERFICIE TOTALE (KM ²) DE CHAQUE SOUS-BASSIN A DIFFERENTES RESOLUTIONS SPATIALES POUR LES SCENARIOS SANS SDU.....	49
TABLEAU 4.3. ÉLEVATIONS MINIMALE ET MAXIMALE DE CHAQUE SOUS-BASSIN A DIFFERENTES RESOLUTION SPATIALES	51
TABLEAU 4.4. NOMBRE D'UNITES HYDROLOGIQUES RELATIVEMENT HOMOGENES A DIFFERENTES RESOLUTION SPATIALES	51
TABLEAU 4.5. PERFORMANCES DES MODELES POUR LES PERIODES DE CALAGE ET DE VALIDATION SANS SYSTEME DE DRAINAGE URBAIN.	54
TABLEAU 4.6. COMPARAISONS DES DIFFERENCES RELATIVES DES PARAMETRES (PA) UTILISES DANS CHAQUE SOUS-BASSIN POUR LES SCENARIOS (2, 6, 8).....	57
TABLEAU 4.7. PERFORMANCES DES MODELES POUR LA PERIODE ENTIERE DES SCENARIO 2 (20 METRES), SCENARIO 6 (10 METRES) ET SCENARIO 8 (5 METRES) SANS LE SYSTEME DE DRAINAGE URBAIN.....	59
TABLEAU 4.8. RESULTATS DES INDICATEURS DE PERFORMANCE EN CONSERVANT LES PARAMETRES A 10 M ET EN LES UTILISANT AVEC HYDROTEL POUR LA SIMULATION DES SCENARIOS SANS LE SDU.	64

TABLEAU 4.9. SUPERFICIE TOTALE (KM ²) DE CHAQUE SOUS-BASSIN EN PRESENCE (+) OU ABSENCE (-) DU SDU.	66
TABLEAU 4.10. NOMBRE D'UHRH EN PRESENCE (+) OU ABSENCE (-) DE SDU.....	67
TABLEAU 4.11. PERFORMANCE DES MODELES DANS LES PERIODES DE CALAGE ET DE VALIDATION AVEC (+) ET SANS LE SDU.	70
TABLEAU 4.12. COMPARAISONS DES DIFFERENCES RELATIVES DES PARAMETRES UTILISES DANS CHAQUE SOUS-BASSIN	72
TABLEAU 4.13. PERFORMANCES DES MODELES POUR LA PERIODE ENTIERE AVEC (+) ET SANS LE SDU.	74
TABLEAU 4.14. LES VALEURS DE KGE SAISONNIER POUR LE SOUS-BASSIN DU BERGER A 5 M DE RESOLUTION SPATIALE.	77
TABLEAU 4.15. PERFORMANCE DES MODELES EN FONCTION DE LA VALEUR AJOUTEE PAR LE SDU POUR CHAQUE SOUS-BASSIN.	81
TABLEAU 4.16. CARACTERISTIQUES DE LA TEXTURE DU SOL A 20 M DE RESOLUTION SPATIALE POUR LES CARTES DE TYPE DE SOL A ET B.	84
TABLEAU 4.17. CARACTERISTIQUES DE LA TEXTURE DU SOL A 5 M DE RESOLUTION SPATIALE POUR LES CARTES DE TYPE DE SOL A ET B.	86
TABLEAU 4.18. PROPRIETES HYDRAULIQUES DE SOL UTILISEES PAR PHYSITEL/HYDROTEL.	88
TABLEAU 4.19. PERFORMANCE DES MODELES DANS LES PERIODES DE CALAGE ET DE VALIDATION AVEC LES CARTE DE TYPE DE SOL A ET B.	94
TABLEAU 4.20. RANG DES DIFFERENCES ABSOLUES DES PARAMETRES ENTRE LE CARTES DE TYPE DE SOL A ET B.	96
TABLEAU 4.21. COMPARAISON DES DIFFERENCES RELATIVES DES PARAMETRES UTILISES DANS CHAQUE SOUS-BASSIN.	97
TABLEAU 4.22. PERFORMANCES DES MODELES POUR LE PERIODE ENTIERE AVEC LA CARTE DE TYPE DE SOL (A) ET (B).	98
TABLEAU 4.23. PERFORMANCE DES MODELES EN FONCTION DE LA VALEUR AJOUTEE PAR LE TYPE DE SOL POUR CHAQUE SOUS- BASSIN.	101

LISTE DES ÉQUATIONS

ÉQUATION 4-1	55
ÉQUATION 4-2	91
ÉQUATION 4-3	91
ÉQUATION 4-4	91
ÉQUATION 4-5	91
ÉQUATION 4-6	92
ÉQUATION 4-7	92
ÉQUATION 4-8	92

1 INTRODUCTION

L'extension des zones urbaines, l'augmentation de la population et le besoin en ressources naturelles et énergétiques sont des facteurs qui provoquent des changements significatifs des climats et cycles naturels, surtout le cycle hydrologique qui s'est intensifié de manière notable depuis les dix dernières années (IPCC (2014)). La préoccupation croissante sur la dynamique des ressources hydriques a conduit les organismes publics à se doter de modèles mathématiques capables de reproduire le cycle hydrologique afin de comprendre et évaluer l'impact de ces changements. La modélisation hydrologique est basée sur un ensemble de données qui décrivent à la fois les caractéristiques physiques d'un bassin versant, telles que la topographie, le type de sol, l'occupation du sol, et le réseau hydrographique, ainsi que les conditions hydrométéorologiques. La qualité et la précision de ces informations spatiales affectent directement les résultats de simulation des modèles hydrologiques (Chaplot, 2005; Corwin *et al.*, 1996).

Avec l'évolution de modèles et de méthodes d'acquisition de données plus précises grâce aux nouvelles technologies, les modèles hydrologiques alliés aux systèmes d'information géographiques sont devenus des outils très puissants que l'on a classifiés comme étant empiriques, conceptuels ou physiques selon différentes classifications proposées par plusieurs auteurs (Berod *et al.*, 1995; Singh et Woolhiser, 2002; Wheeler *et al.*, 1993). Le lien entre la qualité des résultats de simulation et la résolution spatiale des données d'entrée utilisées dans ces modèles se veut une activité de recherche en plein essor.

Les données topographiques acquises à haute résolution spatiale sont généralement utilisées dans la production des modèles numériques d'altitude (MNA) pour dériver les attributs topographiques (pente, surface, élévation, altitude) nécessaires à la modélisation hydrologique d'un bassin versant. L'impact de la résolution spatiale de ces attributs sur les processus hydrologiques a été déjà étudié par de nombreux travaux présentés dans la littérature. La majorité de ces études se concentre sur le modèle SWAT (Arnold *et al.*, 1995), un modèle conceptuel semi-distribué. Cependant, à notre connaissance aucune étude formelle n'a été faite pour le modèle hydrologique semi-distribué HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001; Turcotte *et al.*, 2007; Turcotte *et al.*, 2003).

L'intérêt de poursuivre une telle étude est de comprendre l'influence de différentes sources de données à différentes échelles spatiales sur les processus hydrologiques simulés tel que la simulation des débits en rivières. Cet intérêt peut se formuler en quatre questions : (i) Est-ce que

l'utilisation de données à haute résolution peut améliorer la simulation des débits? (ii) Quels sont les impacts de la résolution spatiale du MNA sur les attributs physiographiques d'un bassin versant? (iii) Quelles sont les valeurs ajoutées d'utiliser des cartographies à haute résolution des types de sol et du réseau hydrographique dans la modélisation hydrologique? (iv) Quelles sont les impacts sur les valeurs calées des paramètres les plus sensibles du modèle hydrologique?

Afin de répondre à ces questions, cette étude a été conduite avec l'objectif principal d'évaluer les impacts des données physiographiques sur la performance de la plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL. Ainsi, ce mémoire est divisé en trois parties, chacune faisant l'objet d'un objectif spécifique sur les effets de ces données sur la plateforme de modélisation. La première partie consiste à évaluer les effets de la résolution spatiale du MNA sur la caractérisation des attributs topographiques et la simulation des débits. La deuxième partie fait référence à l'évaluation des impacts de l'ajout du système pluvial de drainage urbain de la Ville de Québec en considérant les principales conduites comme des cours d'eau. La troisième partie consiste à évaluer la valeur ajoutée d'une cartographie des types de sol à haute résolution et à analyser l'impact sur les paramètres des propriétés hydrauliques du sol et la modélisation des processus d'écoulement. Dans chaque partie, on a également fait des analyses sur les valeurs calées des paramètres les plus sensibles du modèle et sur la sensibilité des données d'entrée.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Modélisation hydrologique : les données à haute résolution

Des nombreux travaux sont présentés dans la littérature avec le but de comprendre et répondre aux questions sur les impacts de la résolution des données utilisées par les différents modèles hydrologiques. Les sections suivantes présentent les résultats issus de la plupart de ces travaux.

2.2 Évaluation des impacts de la résolution spatiale des modèles numériques d'altitude

Le modèle numérique d'altitude (MNA) est l'une des informations spatiales de base les plus couramment utilisées pour délimiter le bassin versant, étudier les impacts des attributs topographiques comme la pente, la superficie et délimiter les réseaux de drainage (réseaux hydrographiques). À ce propos cette section décrit brièvement les principales études réalisées sur l'impact du MNA selon différents modèles hydrologiques.

Selon Vaze *et al.* (2010), les MNA offrent un moyen efficace de représenter la surface du sol et permettent l'extraction rapide et automatique des caractéristiques topographiques du territoire, apportant ainsi des avantages en termes de rentabilité, d'efficacité de traitement des données et d'évaluation de la précision, par rapport aux méthodes traditionnelles basées sur des enquêtes de terrain, des interprétations photographiques et des analyses à travers des cartes topographiques. Selon Teng *et al.* (2008), les MNA sont également utilisés en association avec des cartographies des sols pour fournir des informations plus détaillées des estimations de la profondeur du sol, de la répartition des matériaux /horizons du sol et de la capacité de stockage de l'humidité du sol dans différentes parties d'un bassin versant.

Ariza-Villaverde *et al.* (2015) décrivent que le MNA peut être défini au moyen de : (i) contours avec des paires de coordonnées (x, y) le long de chaque ligne de contour d'une élévation spécifiée, (ii) un réseau triangulé irrégulier composé de nœuds et de lignes distribués irrégulièrement avec des coordonnées tridimensionnelles (x, y et z) et (iii) un tableau à deux dimensions représentant la distribution spatiale des élévations sur une grille régulière. Les MNA reproduisent les caractéristiques topographiques avec précision en fonction de la résolution, des attributs de terrain, et des précisions verticale et horizontale des coordonnées géographiques (Dehvari et Heck, 2013; Deng *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2008b; Wu *et al.*, 2008c).

Comme le MNA est l'une des principales sources de données d'entrée, plusieurs études ont évalué son impact sur la performance des modèles hydrologiques existants. Afin de vérifier le lien entre les caractéristiques hydrologiques et la résolution du MNA, Zhang et Montgomery (1994) ont exploré en détails les effets de la taille de la grille sur la représentation de la surface et les simulations hydrologiques dans le modèle TOPMODEL. Il a été conclu que plus la résolution du MNA est faible (c'est-à-dire une grande taille de grille), plus l'indice topographique moyen (logarithme du rapport entre la surface drainée par unité de longueur de niveau en un point par la tangente de la pente locale en ce point) est élevé en raison de l'augmentation de la surface contributive et des pentes plus faibles. Une étude similaire de Sorensen et Seibert (2007) a démontré également les effets de la résolution du MNA sur le calcul de l'humidité topographique et les auteurs ont remarqué des différences importantes dans la performance du modèle lors de l'utilisation des différentes résolutions de grille.

D'autres auteurs ont fait des analyses sur les effets de la précision verticale des MNA sur la précision des prévisions des simulations hydrologiques. Kenward *et al.* (2000) ont souligné qu'en augmentant la précision verticale, les erreurs sur les prévisions des simulations hydrologiques avec le modèle DHSVM (Distributed soil-hydrology-vegetation model) diminuaient considérablement. Ils ont conclu que la topographie d'un bassin versant représentée par le MNA joue un rôle très important dans les modélisations hydrologique et géomorphologique et que la qualité de la résolution affecte de manière significative la précision des caractéristiques hydrologiques extraites des modèles. Ces observations ont été confirmées par Falorni *et al.* (2005), basé sur la forte influence du relief sur la précision verticale des MNA et des attributs de terrain dérivés.

Plusieurs des études ont décrit l'interaction entre la précision de la description topographique et la qualité de la prédiction spatiale (Brasington et Richards, 1998; Chaplot *et al.*, 2000; Farajalla et Vieux, 1995; Thompson *et al.*, 2001). Bien que les modèles numériques permettent la description détaillée de la surface du terrain, les erreurs de prédiction sont encore existantes et parfois élevées, principalement en raison d'une mauvaise estimation des attributs du terrain, tel que l'élévation au-dessus des cours d'eau (Chaplot *et al.*, 2000) et la courbure de la pente (Thompson *et al.*, 2001). La précision des MNA peut affecter les délimitations des bassins versants et impacter la qualité de prédiction des modèles hydrologiques. Une étude détaillée d'un bassin versant au Wisconsin aux États-Unis par FitzHugh et Mackay (2000), utilisant le modèle semi-distribué Soil and Water Assessment Tool (SWAT), a indiqué une diminution de 44% du

transport des sédiments dans le modèle, estimée à partir des délimitations extraites des résolutions spatiales plus grossières aux plus fines.

Il existe dans la littérature plusieurs travaux qui font référence à l'utilisation du MNA à haute résolution dérivée de données LiDAR (Light Détection and Ranging). Les effets sur les attributs du terrain, la caractérisation des cours d'eau et les délimitations des bassins ont été étudiés par plusieurs chercheurs. Yang *et al.* (2010) ont étudié les effets de la résolution du MNA dérivé du LiDAR sur l'extraction des cours d'eau avec le but de connaître et de comparer les variations de localisation à chaque résolution spatiale. L'étude a été réalisée dans deux bassins expérimentaux en variant le MNA entre 1 et 60 mètres de résolution spatiale. L'effet de la résolution du MNA sur la dérivation des caractéristiques hydrographiques comme la longueur des cours d'eau, la surface du bassin versant, et la sinuosité a été également exploré pour chaque taille de cellules matricielles. Les auteurs ont constaté que le processus d'extraction des cours d'eau à partir du MNA a fourni des caractéristiques hydrographiques plus détaillées à une résolution spatiale plus fine. En utilisant la RMSE comme indicateur de performance métrique pour comparer la localisation connue du cours d'eau et celle obtenue à partir de l'extraction du MNA, ils ont observé que la RMSE augmente généralement lors de l'utilisation de résolutions spatiales plus grossières. Cependant, les analyses de sensibilité sur la sinuosité ont démontré que la forme des cours d'eau est plus précise en utilisant une résolution intermédiaire entre 5 et 10 mètres au lieu de la résolution plus fine à 1 mètre. Enfin, ils ont suggéré que la taille de cellule optimale pour les MNA dérivés du LiDAR utilisés pour l'extraction de caractéristiques hydrographiques doit être de 10 mètres.

Certaines études ont démontré que l'utilisation de résolutions spatiales plus fines n'amène pas d'avantages significatifs pour les modèles. MacMillan *et al.* (2003) ont étudié l'application et les problèmes du MNA sur la quantification de la pente et les cours d'eau, en utilisant un MNA à 3 mètres dérivé du LiDAR et un MNA conventionnel à 5 mètres. Ils ont conclu que les MNA à résolutions spatiales fines présentent des problèmes d'extraction des flux d'eau de surface et ils ont recommandé l'utilisation d'une méthode de filtrage pour améliorer la résolution spatiale et réduire les erreurs localisées. Cochrane et Flanagan (2005) ont utilisé le modèle WEPP afin d'étudier l'effet de la résolution du MNA sur la pente du versant et la longueur des cours d'eau. Ils ont constaté que la résolution des MNA n'influence pas de manière significative les valeurs des pentes trouvées dans le modèle et qu'il y a une relation significative entre les résolutions et la trajectoire d'écoulement d'eau dans le modèle. Selon cette étude, l'utilisation des résolutions

spatiales plus grossières ne diminuait pas la précision de la prévision de l'érosion dans le modèle WEPP.

Les MNA sont essentiels à la délimitation et à l'estimation de la topographie des bassins, mais la sensibilité du ruissellement simulé face au MNA est encore mal comprise. Une étude de Nazari-Sharabian *et al.* (2019) a évalué les impacts de la résolution du MNA sur les attributs topographiques et les débits simulés par le modèle SWAT. La performance du modèle a été analysée en utilisant le MNA avec des résolutions de 12,5 ; 30 et 90 mètres acquis auprès d'ALOS PALSAR, de la mission de topographie radar de la navette spatiale (SRTM) et de la source de données DEM globale d'ASTER, respectivement. Les délimitations du territoire ont été faites en utilisant ArcGIS et les analyses de sensibilité des paramètres ont été faites avec l'algorithme de l'alignement des incertitudes séquentielles (SUFI-2). Les résultats de cette étude ont montré que le MNA à la résolution la plus fine a présenté les valeurs de la pente et surface les plus élevées ainsi que les élévations minimales, moyennes et maximales dans le bassin versant délimité. En comparant le ruissellement généré par le modèle, une augmentation de 3,48% a été observée en utilisant le MNA à résolution plus fine au lieu de la résolution plus grossière. La sensibilité des paramètres a montré qu'à mesure que la résolution du MNA devenait plus grossière, la sensibilité du modèle à certains paramètres pouvait varier significativement. Les paramètres comme le coefficient de Manning n , la conductivité hydraulique K , le seuil de la profondeur de l'eau dans l'aquifère peu profond et la hauteur initiale de la nappe souterraine ont démontré des augmentations dans leurs valeurs à mesure que la résolution spatiale s'approchait de 90 mètres. Tandis que pour des paramètres tels que la quantité en eau disponible de la couche de sol, le coefficient de retardement du ruissellement de surface, le facteur alpha du débit de base, la teneur initiale en eau de la neige, le stockage maximal dans la canopée, parmi tant d'autres, ont connu des diminutions dans leurs valeurs. Il a été remarqué également qu'à mesure que la distribution de la pente dans le bassin versant changeait selon les différentes résolutions du MNA, les paramètres de surface devenaient plus affectés que les autres paramètres du modèle.

Un certain nombre d'études ont examiné l'effet de la taille de la grille des données topographiques sur les simulations du modèle TOPMODEL dont celles de Zhang et Montgomery (1994); Bruneau *et al.* (1995); Zhang *et al.* (1999); Lin *et al.* (2010); Xu *et al.* (2012). En général, ces études ont constaté que différentes grilles ont des effets significatifs sur la distribution des indices topographiques et les résultats de simulations. Ils ont également trouvé que les grilles à plus haute résolution ont donné de meilleurs résultats. Ce modèle semi-distribué, développé par Beven et Kirkby (1979), a été récemment étudié par Suliman *et al.* (2016). Les possibles impacts

de l'utilisation de différentes résolutions du MNA générées par imagerie du satellite ASTER et leurs effets sur les paramètres ont été analysés pour un bassin versant situé en région tropicale. Les MNA avec des résolutions de 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270 et 300 mètres ont été ré-échantillonnés à partir du MNA de base à 30 mètres. Les résultats ont montré que la diminution des résolutions réduisait les performances de simulation. Cette étude a montré également que les MNA affectent significativement la distribution de l'indice topographique, qui est considéré comme la clé et l'idée directrice du fonctionnement de TOPMODEL. La performance du modèle à travers l'indicateur de performance métrique Nash-Sutcliffe (Moriassi *et al.*, 2007) a diminué de 0,79 à 30 mètres de résolution spatiale à 0,60 à 300 mètres.

L'estimation du ruissellement direct et du transport de sédiments d'un bassin versant est importante pour évaluer la qualité et la quantité d'eau transportée par les cours d'eau existants dans un territoire. À mesure que l'échelle spatiale du bassin augmente, la modélisation des processus hydrologiques d'atténuation des précipitations et d'érosion de surface peuvent devenir complexe. Des données d'entrée à haute résolution spatiale peuvent être requises afin d'améliorer la précision des modèles. À cet égard, Kalin *et al.* (2003) ont réalisé une étude sur l'effet de la résolution géomorphologique des données pédologiques et de l'occupation du sol sur la modélisation des écoulements et du transport de sédiments sur de petits bassins versants en utilisant le modèle KINEROS. Ce modèle événementiel distribué et déterministe à base physique a été développé par Woolhiser *et al.* (1990). L'étude a conclu qu'en augmentant la résolution géomorphologique, les débits augmentaient, spécialement autour des débits de pointes. De plus, Kalin *et al.* (2003) ont expliqué que la résolution géomorphologique optimale dépend de la variable d'intérêt. Parmi les variables considérées dans cette étude, la résolution géomorphologique requise est la plus élevée lorsque le débit de pointe est une préoccupation majeure et la plus faible lorsque la charge sédimentaire totale à la sortie du bassin versant est la variable d'intérêt. Selon Chaplot (2005), la précision du MNA utilisé dans cette étude a influencé la délimitation des bassins versants, ce qui à son tour peut également influencer la qualité de la prévision des modèles de ruissellement et d'érosion comme KINEROS.

L'utilisation de données d'entrée à haute résolution a également un impact important pour la modélisation des pollutions diffuses. Ce type de modélisation estime les charges et les transports de produits chimiques, de sédiments et d'éléments nutritifs par les écoulements de surface. Un des modèles distribués les plus utilisés pour étudier et estimer le succès de la réduction des charges diffuses de pollution et de l'amélioration de la qualité de l'eau est l'Agricultural Non point Source Pollution Model (AGNPS) (Young *et al.*, 1989). Selon Vieux et Needham (1993), ce

modèle utilise la structure de données en grille pour estimer et représenter les caractéristiques et les conditions d'un bassin versant.

Certaines études se sont penchées sur les divers effets de la résolution des données d'entrée sur le modèle AGNPS (Adams *et al.*, 2001; Davenport *et al.*, 2003; Ramadhar *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2008a). Une étude réalisée par Vieux et Needham (1993) a constaté que lorsque la taille des cellules de la grille augmentait, le rendement en sédiments du modèle augmentait de 32% et qu'une résolution plus grossière était le facteur le plus important affectant les performances du modèle. Cette étude a démontré également que les effets de l'agrégation du MNA en ré-échantillonnant une grille de 30 mètres en grilles de 90, 150 et 210 mètres sont assez significatifs, en ce sens qu'ils raccourcissent les méandres des cours d'eau au point de diminuer l'accumulation de sédiments et d'affecter la trajectoire d'écoulement d'eau à mesure que la taille de la cellule augmente. Les auteurs ont également remarqué une diminution de la pente moyenne et une variation significative de la superficie du bassin étudié. Une étude récente de Utery *et al.* (2004) a enquêté sur les effets de la résolution et du ré-échantillonnage des données d'entrée extraites à partir d'un SIG afin d'analyser leurs impacts sur le modèle AGNPS. Les résultats ont indiqué que les données ré-échantillonnées de 30 mètres à 60, 120, 210, 240, 480, 960 et 1920 mètres entraînaient une dégradation générale entre l'altitude et de la surface lorsque la résolution diminue. L'évaluation initiale des valeurs de sortie du modèle pour l'azote et le phosphore a indiqué également une dégradation similaire avec la résolution.

Une étude orientée vers l'analyse du potentiel d'érosion de sol d'un bassin versant, situé dans la partie occidentale du plateau chinois de Loess, a été l'objet d'étude de Zhang (2004). Selon lui, les graves problèmes d'érosion de sol sont causés en raison de plusieurs de facteurs, liés principalement à la présence humaine ou aux caractéristiques naturelles de géologie, géomorphologie et hydrologie de la région. À part ces facteurs, la topographie exerce une forte influence sur le processus d'érosion du territoire. Ainsi, pour estimer les potentiels d'érosion contrôlés par la topographie, la distribution et la résolution spatiale des attributs topographiques sont très importants, spécialement lors de l'utilisation du modèle Unit Stream Power-based Erosion Deposition (USPED) (Mitas et Mitsova, 1998; Mitsova *et al.*, 1995). Ce modèle empirique est capable de prédire la distribution spatiale de l'érosion et des dépôts sur le sol pour un écoulement terrestre stable sous des conditions d'excès de précipitations uniformes dans un territoire (Mitsova *et al.*, 1996). Les données d'entrée, principalement le MNA, peuvent conduire à des impacts considérables sur l'estimation de l'érosion par ce modèle. En ce qui concerne ces impacts, Zhang (2004) a calculé les potentiels d'érosion et évalué les effets d'échelle du MNA sur

les paramètres topographiques dérivés d'un SIG. À partir de la comparaison des érosions calculées selon quatre échelles de MNA (1:250.000, 1:50.000, 1:10.000, et 1:5.000), l'auteur a pu conclure qu'à l'échelle 1:50.000, le modèle a fourni des informations topographiques presque aussi précises que les données du MNA à résolution plus élevée pour les études sur l'érosion des sols et à l'échelle 1:250.000, le USPED a sous-estimé le potentiel d'érosion de rigoles et de nappes d'érosion.

La modélisation spatialement distribuée des flux d'eau et du bilan hydrique à des échelles régionales requière des jeux de données spatiales précis afin de mieux reproduire et prévoir les conditions d'un bassin versant. Une étude récente de Bormann (2006) a analysé les effets de la résolution spatiale des données d'entrée sur les bilans hydriques simulés et les composantes de l'écoulement à l'aide du modèle hydrologique multi-échelle TOPLATS. (Famiglietti et Wood, 1994). Selon les résultats de cette étude, en utilisant les MNA à 50, 75, 100, 150, 200, 300, 500, 1000 et 2000 mètres de résolution spatiale, l'auteur a observé des légères différences de 3% dans les bilans hydriques annuels simulés à des résolutions de 50 à 500 mètres. Au contraire, il a trouvé des différences significatives à 1000 et 2000 mètres de résolution spatiale correspondant à 12% du bilan de débit annuel. Selon Bormann (2006), le modèle TOPLATS a produit des erreurs significatives dans le calcul des bilan hydriques régionaux en utilisant une résolution spatiale supérieure à 500 mètres.

Les différentes résolutions spatiales des données d'entrée peuvent induire des hétérogénéités dans la topographie et le paysage, ce qui peut avoir un impact significatif sur les résultats des simulations des modèles hydrologiques (Bloschl *et al.*, 1997). Le choix approprié de la résolution spatiale doit être considéré comme une étape importante en modélisation hydrologique. Une analyse des effets à différentes résolutions spatiales (100 m, 200 m, 300 m, 500 m, 1 km) du MNA sur la simulation du bilan hydrique en utilisant le modèle hydrologique distribué PCR-XAJ, a été faite récemment par Zhao *et al.* (2009). Selon les auteurs, une fois la taille de la grille matricielle établie, toutes les cartes sont calculées à la même échelle au pas de temps journalier. L'étude de Zhao *et al.* (2009) conclut que l'augmentation de la taille de la grille affecte la pente et la distribution de l'occupation des sols et cela produit une perte d'informations importante pour le modèle PCR-XAJ. Selon les auteurs, des erreurs plus élevées ont été trouvées à partir de la grille de 1 km ; la performance du modèle diminuant légèrement à mesure que la taille des cellules augmentait.

2.3 Évaluation des impacts de la résolution et de la source des données de sols

L'acquisition des données à haute résolution peut être assez coûteuse et ardue, surtout pour les données sur les types de sol qui sont par la suite utilisées pour inférer les propriétés hydrodynamiques de ces derniers. La plupart des données disponibles sont obtenues à travers des méthodes d'échantillonnage sur le terrain afin d'estimer le type de sol dominant pour une région donnée. Les différentes échelles des cartes pédologiques peuvent entraîner une grande variation du type de sol dominant en raison des différences entre le modèle cartographique et le processus de délimitation manuelle.

La majorité des études sur les effets de la résolution des données sur les types de sols ont été faites en utilisant le modèle à base physique SWAT. À ce propos cette section présente un résumé de certaines études réalisées au cours de ces dernières années.

Muttiah et Wurbs (2002) ont observé que les variabilités du climat et du sol peuvent affecter significativement le stockage en eau d'un bassin en changeant l'échelle de la carte du sol de 1:250 000 à 1:24 000. Cependant, il n'y a pas eu de différences significatives de l'évapotranspiration dans le modèle. Une autre étude de Levick *et al.* (2004) a évalué la modélisation de l'écoulement de l'eau dans le sol à partir de deux bases de données géographiques des sols à la même résolution spatiale : la US State Soil Geographic database (STATSGO) et la US Soil Survey Geographic database (SSURGO). Les résultats ont montré des variations significatives entre ces deux sources. Les données de STATSGO ont produit des écoulements moins élevés que celles de SSURGO. Wang et Melesse (2007) ont appliqué les données STATSGO et SSURGO à la simulation du modèle SWAT sur un bassin versant situé au Dakota du Nord et les résultats ont montré que SSURGO a fourni de meilleurs résultats de modélisation de l'écoulement. Geza et McCray (2008) ont comparé les effets de la résolution des données de sol sur les débits et sur la prévision de la qualité de l'eau dans le modèle SWAT en utilisant également les données de STATSGO et SSURGO. Les résultats ont démontré des débits simulés plus élevés avec SSURGO. De plus, ils ont observé que SSURGO a produit de plus faibles concentrations en sédiments et nutriments que celles simulées avec STATSGO.

À travers les études citées précédemment, il a été possible de constater que la résolution et les différentes sources de données de sols peuvent influencer significativement la performance du modèle SWAT. Une étude récente de Ye *et al.* (2011) a examiné les comportements des processus hydrologiques, tels que : l'évapotranspiration, le stockage de l'eau dans le sol et les débits des cours d'eau à partir de deux sources de données. Selon leurs résultats, les différentes résolutions peuvent impacter significativement la distribution des unités de réponse hydrologique

de SWAT présentes dans la modélisation, mais pas nécessairement affecter les comportements des débits produits par le modèle. Selon les auteurs, les données de résolution plus fines ont produit des quantités plus élevées de stockage en eau dans le sol qu'à la résolution plus grossière, cependant l'évapotranspiration n'a pas eu de changement. Ye *et al.* (2011) ont conclu que les améliorations observées au niveau de la cartographie du sol ne peuvent pas nécessairement contribuer à une prévision plus précise des débits et que le choix de la meilleure résolution des données de sols doit être basé sur la taille du bassin versant, le niveau de précision recherché et également le type de modèle utilisé en prenant en considération les processus et les paramètres présents dans le modèle hydrologique.

Les effets des informations spatiales détaillées du sol sur la modélisation hydrologique à différentes échelles spatiales ont également fait l'objet d'une analyse par Li *et al.* (2012). Cette étude a été réalisée avec les modèles SWAT et Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa) (Liu *et al.*, 2003). Cette étude a été faite à trois niveaux spatiaux: une au niveau de l'unité de simulation minimale du modèle, une au niveau du sous-bassin et la dernière au niveau du bassin versant entier. Les résultats ont montré que les différences plus élevées des débits simulés se trouvent au niveau des unités minimales du modèle et qu'à mesure que l'échelle spatiale augmente, les différences de débits simulées diminuaient. Selon les auteurs, les effets de l'échelle spatiale sont corrélés avec l'effet d'agrégation du processus d'acheminement de l'eau dans le bassin versant.

De nombreux événements d'inondations se produisent à chaque année à l'échelle mondiale. Selon Gaume *et al.* (2016), ces inondations représentent un risque assez important pour la sécurité des populations vivant par exemple en bordure de la mer Méditerranée en Europe. Des modèles spécifiques afin de prévoir ces événements sont à chaque année utilisés. Une étude très récente de Lovat *et al.* (2019) a utilisé le modèle hydrologique distribué ISBA-TOP (Bouilloud *et al.*, 2010; Vincendon *et al.*, 2016) avec le but d'enquêter sur les impacts de la résolution spatiale et des données du sol sur la modélisation de deux sites d'intérêt situés dans le sud de la France en utilisant deux tailles de cellules de grille (300 et 1000 m), deux jeux de données sur la texture du sol et deux bases de données sur l'occupation du sol. Selon cette étude, la résolution spatiale a eu le plus grand effet sur la performance hydrologique du modèle, suivie de la texture du sol et après les données d'occupation du sol. Les résultats ont montré également des différences significatives sur les débits simulés et les apports en écoulement entre les deux sites d'intérêt, que ce soit à l'échelle du bassin ou à l'échelle locale.

Afin d'identifier les impacts de la résolution spatiale des données d'entrée dans le modèle d'érosion de SWAT, Chaplot (2014) a identifié la résolution minimale nécessaire pour obtenir des estimations précises des apports en eau, sédiments et azote. La problématique a été étudiée dans un bassin versant relativement petit et plat situé aux États-Unis où la sensibilité des apports a été testée en fonction de la résolution spatiale de toutes les données d'entrée requises par le modèle. Pour la modélisation, l'auteur a produit trois cartes de type de sol de différentes échelles, 1/25 000; 1/250 000 et 1/500 000, à partir de la base de données SSURGO ; douze modèles numériques d'altitude (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 150, 200 et 500 mètres), une carte d'occupation du sol générée à l'aide de photographies aériennes à 30 mètres de résolution, huit stations pluviométriques et plusieurs combinaisons de subdivision du bassin ont également été définies à partir d'un seuil d'initiation de cours d'eau (23, 100, 261 et 654 ha). Les résultats ont révélé que les prédictions des apports en eau et sédiments ont été affectées, principalement, par le nombre de subdivisions de bassins versants. Les charges d'azote ont été les plus sensibles au nombre de pluviomètres et au MNA, suivis du type de sol et du nombre de subdivisions du bassin versant. Il a constaté que les apports en eau et les transports de sédiments ont été les plus sensibles aux résolutions spatiales entre 30 et 100 mètres.

2.4 Évaluation des impacts de la résolution spatiale sur l'extraction du réseau hydrographique

En hydrologie, les MNA sont utilisés principalement pour l'extraction des réseaux hydrographiques, les délimitations du bassin versant et pour la modélisation de processus. Tel que nous l'avons déjà mentionné, la résolution spatiale a des effets très importants sur les variables de terrain telles que la pente, l'aspect et principalement sur les caractéristiques physiographiques telles que la longueur maximale des tronçons de cours d'eau, la superficie et la densité de drainage du bassin. Selon Chaubey *et al.* (2005), ces caractéristiques sont influencées directement par les différentes échelles d'un MNA. Plusieurs études ont évalué les impacts de la résolution spatiale sur la caractérisation du réseau hydrographique et l'écoulement sur un bassin versant à travers le modèle SWAT (Ariza-Villaverde *et al.*, 2015; Hanief et Laursen, 2019; Nagaveni *et al.*, 2019; Paul *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017).

L'extraction automatique d'un réseau de drainage en définissant une valeur de seuil appropriée pour une zone de drainage basée sur le MNA est une méthode universelle utilisée pour la mise en place de SWAT. Sur cette base, Wu *et al.* (2017) ont évalué l'influence de trois résolutions de MNA (250 m, 500 m et 1 km) sur l'extraction des attributs topographiques et des valeurs de seuil de drainage de dix bassins de diverses régions de Chine. Les résultats ont montré des différences

significatives sur la longueur du réseau hydrographique. La résolution du MNA et la valeur de seuil dépendent de la géomorphologie du bassin et ont ainsi un impact sur la délimitation du bassin et du réseau hydrographique. Différentes résolutions de MNA ont entraîné des délimitations et superficies de bassins différentes. Le niveau de la topographie du bassin versant et la précision de la représentation du réseau hydrographique diminuent à mesure que l'on utilise une résolution spatiale plus grossière du MNA.

Les effets de la résolution spatiale sur la modélisation et la délimitation des cours d'eau dans les bassins de différentes tailles ont été étudiés par Callaghan Ocallaghan et Mark (1984), Chaubey *et al.* (2005), et plus récemment par Paul *et al.* (2017). Selon ces études, la différence entre les caractéristiques physiques (quantifiés à partir de la longueur, la section et l'emplacement des cours d'eaux dans un bassin versant) et les cours d'eaux extraits des outils comme l'ArcGis, à partir de la dérivation du MNA, augmente de façon exponentielle en utilisant des résolutions plus grossières.

Une étude très récente de Hanief et Laursen (2019) a simulé le réseau de drainage naturel de la rivière Grand dans le sud de l'Ontario au Canada avec le modèle SWAT et a également évalué les différences entre la longueur et la localisation du réseau de drainage avec des données mesurées sur le terrain, le tout exprimé en termes de distance entre les réseaux hydrographiques. Dans un deuxième temps, ils ont vérifié les effets de la résolution du MNA (10, 25 et 200 mètres) sur la prédiction du transport de sédiments par le modèle. Selon les résultats, 5% du réseau de drainage prévu par le modèle se situe à plus de 40 mètres de distance de la localisation réelle du réseau; ce qui correspond à une mauvaise interprétation par le modèle de 388 kilomètres de cours d'eau existants dans le territoire. Ces auteurs ont observé également une absence de 2,6 kilomètres du réseau de drainage qui n'a pas été produite à partir de l'extraction du MNA par SWAT. En ce qui concerne le deuxième objectif de cette étude, les résultats ont montré une similarité des débits simulés produits à partir des trois différentes résolutions spatiales. Cependant, la résolution plus grossière (200 mètres) a sous-estimé le transport de sédiments en raison, selon les auteurs, de l'absence significative de pentes élevées dans les régions de fortes élévations qui n'ont pas été prises en compte par le MNA et par conséquent dans les simulations hydrologiques. La résolution plus fine (10 mètres) a mieux performé au niveau de l'extraction et de la simulation du réseau hydrographique que les résolutions plus grossières. Selon Hanief et Laursen (2019), le modèle a été suffisamment capable de bien reproduire les transports de sédiments et les débits à toutes les résolutions spatiales, mais le modèle construit à partir du

MNA à une résolution grossière peut influencer négativement les simulations hydrologiques pour les bassins ayant une grande variation d'élévation.

Nagaveni *et al.* (2019) ont analysé l'impact de différentes données du MNA sur la même zone d'étude afin d'évaluer la délimitation des bassins, la pente, le réseau de cours d'eau et le ruissellement de surface à l'aide du modèle SWAT. Différentes résolutions de MNA de 12 à 90 m ont été comparées. Les auteurs ont constaté que les attributs et les caractéristiques morphologiques du terrain dérivés du MNA à résolution grossière ont été fortement influencés par la précision de ce dernier. Les résultats ont donné un nombre varié de sous-bassins, d'unités de réponse hydrologique et un nombre varié de la surface des bassins. Selon les auteurs, les résultats ont été optimaux à une valeur de seuil spécifique égal à 1% de la superficie du bassin versant pour l'extraction du réseau de drainage, ce seuil ayant une influence significative sur les résultats simulés. Les résultats ont montré des différences significatives des comportements des débits simulés par le modèle au niveau du bassin versant, ce qui peut être attribué aux longueurs des cours d'eau, aux altitudes minimale et maximale et à la surface totale des sous-bassins. Les auteurs ont fait plusieurs observations importantes et pertinentes portant sur les nombres de sous-bassins et d'unités de réponse hydrologique ; ceux-ci diminuant avec la diminution de la résolution du MNA et au contraire la superficie des sous-bassins augmentant. Au niveau des sous-bassins, les niveaux de détails de la représentation de l'ordre et de la segmentation du réseau hydrographique sont plus élevés avec les MNA à haute résolution. Une résolution de MNA plus fine se traduit par une augmentation du nombre de cours d'eau de premier et deuxième ordres ainsi que de cours d'eau de troisième et quatrième ordres. Il a été observé également que, avec une résolution grossière (90 mètres), le nombre de cours d'eau diminue ; résultant en une densité de drainage plus faible. La longueur totale de cours d'eau était supérieure en utilisant la résolution spatiale la plus fine (12 mètres) plutôt qu'une résolution plus grossière (90 mètres) en raison de l'augmentation du nombre de cours d'eau. Enfin, les auteurs ont conclu que les valeurs des débits simulés par le modèle étaient sensibles au MNA au point d'observer que celui de 12 mètres de résolution spatiale avait donné des estimations plus précises de débits que celles produites avec des résolutions de 30 et 90 mètres.

2.5 Résumé et discussion

Cette revue de la littérature a illustré à l'aide de plusieurs études les implications et les impacts de l'utilisation de différentes résolutions de données physiographiques d'entrée dans la modélisation hydrologique. D'une manière générale, selon les résultats exhaustivement discutés

par les auteurs de ces études, les modèles hydrologiques sont influencés légèrement ou significativement lors de l'utilisation de données à haute résolution. Ainsi, des seize études citées sur les implications du MNA à différentes résolutions spatiales, des effets positifs sur la représentation physiographique de différents attributs (ex. : pente de versant, superficie de bassin, longueur de cours d'eau) ont été soulignés, mais parfois, selon les modèles, ces effets ne donnaient pas lieu à des améliorations substantielles sur la simulation de certaines variables telles que les débits et charges sédimentaires.

L'utilisation de données pédologiques à haute résolution peut être parfois nécessaire pour améliorer la performance des modèles hydrologiques. Cependant, selon les études recensées dans ce chapitre, leur utilisation n'est pas toujours requise. La décision d'utiliser ces données de sols à haute résolution dépend de plusieurs facteurs, tels que : le type de modèle hydrologique, les caractéristiques physiques du bassin versant et le niveau de précision lors de l'obtention des données sur le terrain. Les études citées brièvement illustrent clairement que l'extraction de données pédologiques de différentes résolutions influence significativement la distribution spatiale du type de sol d'un territoire, ce qui peut avoir des effets sur la distribution des unités de réponse hydrologique du modèle SWAT, mais pas forcément sur les processus hydrologiques d'écoulement produit par le modèle. Les études démontrent également que la source de données joue un rôle fondamental sur les valeurs des paramètres de sol et tout cela dépend de la précision de l'échantillonnage qui a été fait sur le terrain.

L'évaluation des impacts de la résolution spatiale sur l'extraction du réseau hydrographique est mentionnée par plusieurs auteurs. Il est évident que la résolution spatiale a une forte influence sur les variables de terrain telles que la pente, l'aspect et principalement sur les caractéristiques physiographiques telles que la longueur maximale des tronçons de cours d'eau, la superficie et la densité de drainage du bassin.

Les informations recensées à travers ces études nous ont permis de contextualiser l'importance de notre projet de recherche par rapport à l'intérêt d'utiliser des données physiographiques à haute résolution spatiale. Les résultats de ces études illustrent un certain consensus sur la portée positive de ces données, mais cette portée demeure parfois liée au modèle utilisé et aux variables d'intérêts. Ainsi cette revue de la littérature démontre toute la pertinence d'étudier la valeur ajoutée des données à haute résolution quant à la simulation des processus d'écoulement du modèle HYDROTEL.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dans le cadre de ce projet de recherche, le SIG PHYSITEL (Rousseau *et al.*, 2011) a été utilisé pour intégrer les données relatives à la modélisation des processus hydrologiques pour caractériser les types de sol et la topographie à l'aide respectivement de cartes pédologiques et de MNA. Subséquemment, les résultats de ces intégrations ont été utilisés comme données physiographiques pour la mise en place d'HYDROTEL. La section qui suit décrit le territoire à l'étude ainsi que la plateforme de modélisation, les données physiographiques, les différents scénarios utilisés, le calage et la validation du modèle et les indicateurs de performance permettant d'évaluer les modélisations hydrologiques.

3.1 Territoire d'étude

La présente étude s'est concentrée sur un territoire de la région de Québec, sur la rive nord du fleuve St-Laurent, le bassin versant de la rivière Saint-Charles. Ce bassin couvre une superficie totale de 540 km² et il est subdivisé en six sous-bassins (Figure 3.1), dont cinq sont associés aux principaux tributaires de la rivière Saint-Charles c'est-à-dire : la rivière Des Hurons (138 km²), la rivière Jaune (82 km²), la rivière Nelson (71 km²), la rivière Lorette (63 km²), la rivière Du Berger (59 km²), et la rivière Saint-Charles (127 km²). Situé en plein cœur du bassin versant, le lac Saint-Charles représente une importante source d'eau potable pour près de 300 000 citoyens de la ville de Québec (APEL, 2014).

La rivière Des Hurons est le plus important affluent du lac Saint-Charles en termes de débit. La rivière Jaune se déverse dans la rivière Saint-Charles un peu en aval de l'exutoire du lac Saint-Charles. La rivière Nelson occupe la partie ouest du bassin versant de la rivière Saint-Charles. La rivière Lorette occupe la portion sud-ouest, pendant que la rivière Du Berger est localisée dans le secteur sud-est du bassin. Situé au cœur de tous ces bassins, la rivière Saint-Charles joue un rôle important pour le bien-être de la population de la ville de Québec.

Le territoire est composé de plusieurs types d'occupation de sol. Les forêts couvrent 61% du territoire qui se décline comme suit : 34% d'un mélange de feuillus et de conifères, 22% de forêts de feuillus et 5% de forêts de conifères. Les zones humides couvrent 6% de la superficie, la plupart d'entre elles étant classées comme marécages (3% du bassin versant) et tourbières boisées (2%) (Beaulieu *et al.*, 2014b). Les zones urbaines et les surfaces imperméables occupent 27% du bassin versant et sont principalement situées dans sa partie inférieure. Le bassin versant

est également représenté par l'agriculture (3%), l'eau (2%) et les sols nus (2%, carrières, sablières, chantiers de construction) (Raimbault *et al.*, 2016a).

Chacun des sous-bassins de la rivière Saint-Charles présente des caractéristiques différentes d'occupation du sol. Le territoire urbain occupe 51% du sous-bassin de la rivière Saint-Charles, 38% et 34% de ceux de la Du Berger et de la Lorette. Quant au territoire forestier, il occupe 85%, 78% et 71% des sous-bassins des rivières Des Hurons, Jaune et Nelson.

L'altitude du bassin versant varie de 4 à 844 mètres au-dessus du niveau de la mer (Ressources naturelles Canada, 2013). La texture des sols sur le territoire est composée par des sables limoneux (73%), des argiles limoneuses (23%) et des limons sableux (4%) (Groupe de travail sur les Pédopaysages du Canada, 2010).

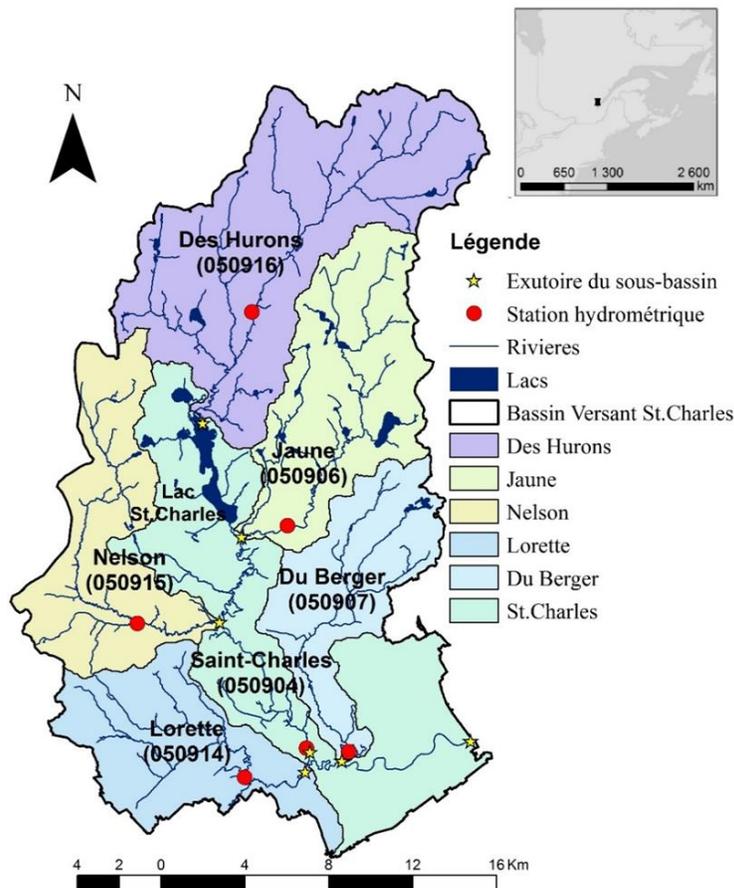


Figure 3.1. Bassin versant de la rivière Saint-Charles, Québec

3.2 La plateforme de modélisation hydrologique PHYSITEL/HYDROTEL

La plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL a été utilisée dans le cadre de ce projet. PHYSITEL est un SIG qui a été conçu pour supporter l'implémentation de modèles hydrologiques distribués (Noël *et al.*, 2014; Rousseau *et al.*, 2011; Turcotte *et al.*, 2001). Cet outil permet de déterminer la structure d'écoulement d'un bassin versant en utilisant en données d'entrée: un MNA, un réseau hydrographique représenté sous forme vectorielle, des données spatiales d'occupation du sol et du type de sols (Figure 3.2). À partir de la matrice d'altitude, PHYSITEL détermine les directions de l'écoulement, les limites du bassin versant, le réseau hydrographique matriciel, et les unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH type versant). Les données de sortie du logiciel peuvent être utilisées par une large gamme de modèles hydrologiques distribués et semi-distribués. Ce logiciel a été initialement développé pour supporter la modélisation hydrologique pour le modèle HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001; Turcotte *et al.*, 2007; Turcotte *et al.*, 2003).

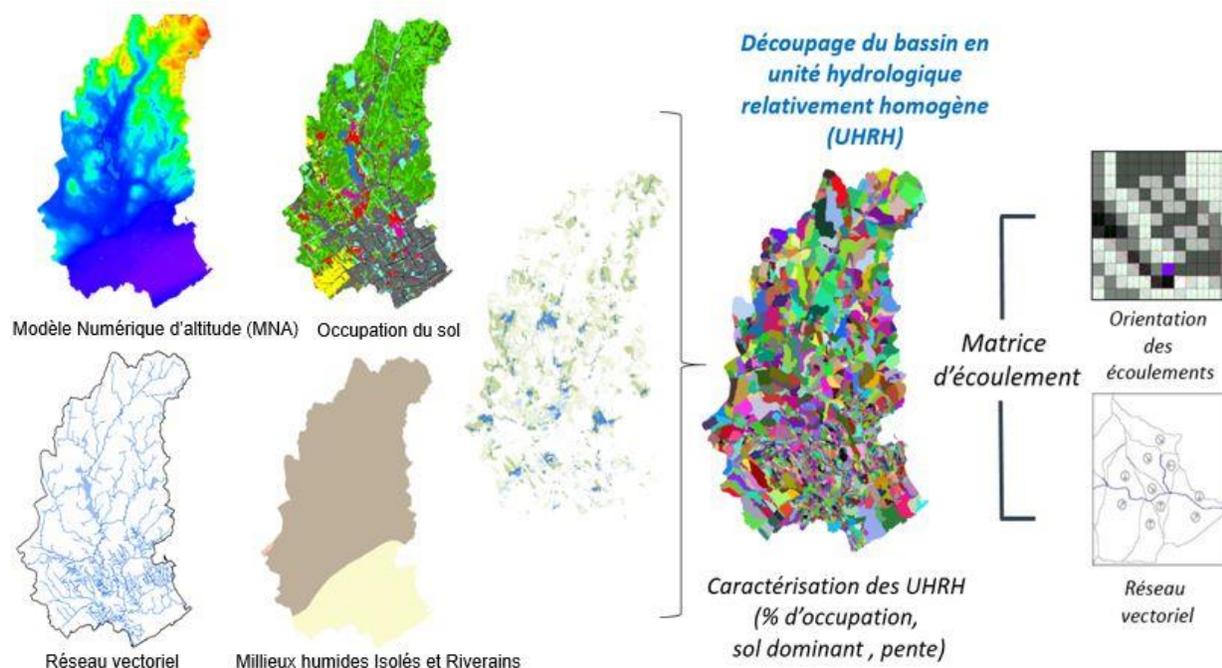


Figure 3.2. Données d'entrée pour la préparation du bassin versant avec PHYSITEL. À noter ici que les UHRHs sont du type versant.

HYDROTEL est défini comme un modèle hydrologique semi-distribué à base physique, compatible avec l'utilisation de la télédétection et des données SIG (Bouda *et al.*, 2014; Bouda *et al.*, 2012; Fortin *et al.*, 2001; Turcotte *et al.*, 2007; Turcotte *et al.*, 2003). En plus des données d'entrée générées à l'aide de PHYSITEL, ce modèle nécessite l'ajout de données

météorologiques et hydrométriques enregistrées aux stations présentes à l'intérieur ou à proximité des limites du bassin (Rousseau *et al.*, 2009). HYDROTEL a été construit pour simuler les processus hydrologiques en six sous-modèles présentés au Tableau 3.1 (Fortin et Royer, 2004).

Tableau 3.1. Sous-modèles et algorithmes disponibles dans HYDROTEL

Sous-modèles	Algorithmes
1. Interpolation des données météorologiques	1.1 Polygones de Thiessen 1.2 Moyenne pondérée des trois stations plus proches
2. Évolution du couvert nival	2.1 Méthode mixte degrés-jours bilan énergétique 3.1 Thorntwaite (1948) 3.2 Hydro-Québec
3. Évapotranspiration potentielle	3.3 Linacre (1997) 3.4 Penman-Monteith (1965) 3.5 Priestley-Taylor (1972)
4. Bilan d'eau vertical	4.1 Bilan vertical en trois couches (BV3C) 4.2 CEQUEAU
5. Écoulement sur la partie terrestre du bassin	5.1 Onde cinématique
6. Écoulement par le réseau hydrographique	6.1 Onde cinématique 6.2 Onde diffusante
7. Milieux humides : Isolé/Riverain	7.1 Milieu humide équivalent (Fossey <i>et al.</i> , 2015)

Le premier sous-modèle est appliqué pour distribuer les données météorologiques sur chaque UHRH selon deux options d'interpolation: les polygones de Thiessen ou la moyenne pondérée des trois stations les plus proches. Ce sous-modèle calcule principalement les températures et la partition des précipitations (contributions solides et liquides) en fonction des données enregistrées aux stations météorologiques et de l'altitude et la localisation de chaque UHRH. Pour ce sous-modèle, on a sélectionné l'algorithme de la moyenne pondérée des trois stations météorologiques les plus rapprochées, en raison du grand nombre de stations dispersées dans chaque sous-bassin. Ces stations fournissent une série chronologique d'environ 48 ans, comprise entre 1969-2017. Le deuxième sous-modèle simule à l'aide d'un seul algorithme la fonte et l'accumulation de la neige en utilisant une approche mixte degré-jour-bilan énergétique pour simuler la température, la teneur en eau liquide, l'épaisseur, la densité moyenne, l'équivalent en eau et le déficit thermique du couvert neigeux. Le troisième sous-modèle calcule l'évapotranspiration potentielle. Il compte cinq algorithmes : Monteith (1965), Linacre (1977),

Priestley et Taylor (1972), Thornthwaite (1948), et un algorithme développé spécifiquement pour le Québec par Hydro-Québec. Dans cette étude, on a utilisé celui d'Hydro-Québec, en raison de la disponibilité des données de températures maximale et minimale journalières de l'air sur le sous-bassin. Le quatrième sous-modèle à bases physiques BV3C a été utilisé pour la simulation du bilan d'eau vertical dans le sol dans le cadre de cette étude. BV3C utilise trois couches de sol pour calculer le ruissellement de surface, la redistribution de l'eau dans le sol et l'évapotranspiration réelle de chaque UHRH. Le sous-modèle d'écoulement superficiel simule le transfert latéral de chaque UHRH jusqu'au réseau hydrographique provenant des apports associés au ruissellement de surface et aux apports des deuxième et troisième couches de sol. Le calcul de l'écoulement est fait à partir de l'équation de l'onde cinématique qui utilise la pente et la direction d'écoulement ainsi que le coefficient de Manning. Le calcul d'écoulement superficiel est fait à partir d'un hydrogramme géomorphologique de référence (HGM) pour chaque UHRH et le calcul de la quantité d'eau qui sort de chaque UHRH à chaque pas de temps. Enfin, le cinquième sous-modèle d'écoulement par le réseau hydrographique simule les processus hydrologiques qui se produisent dans les rivières et les lacs selon deux options : l'onde cinématique ou l'onde diffusante. Parmi ces deux algorithmes disponibles, l'onde cinématique modifiée a été utilisée pour représenter le processus par lequel l'eau chemine dans un réseau de rivières, de lacs et de réservoirs jusqu'à l'exutoire du bassin. Récemment, la plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL a été adaptée par Fossey *et al.* (2015) pour rendre compte de la contribution des milieux humides isolés et riverains aux processus hydrologiques à l'échelle de l'UHRH. Ces modules ont été utilisés dans le cadre de cette étude.

3.3 Données physiographiques

Les données physiographiques font référence à la caractérisation de la structure physique d'un bassin versant. Dans le cas du modèle HYDROTEL, la distribution de la topographie, du réseau hydrographique, de l'occupation du sol et des types de sol est traitée par le biais du logiciel PHYSITEL (Turcotte *et al.*, 2001). Les cinq sous-sections suivantes décrivent ces données physiographiques, et les données hydrométéorologiques (température, précipitation et débits observés) utilisées dans le modèle pour les simulations hydrologiques. Enfin, on décrit la méthodologie appliquée pour l'élaboration des cartes du type de sol et du réseau hydrographique (sections 3.3.3 et 3.4) tout en considérant dans ce dernier cas le réseau pluvial de drainage urbain. Dans le cadre de cette étude, la méthodologie appliquée à l'intégration du réseau pluvial est unique, car celle-ci n'avait jamais été faite.

3.3.1 Modèles numériques d'altitude

Des modèles numériques d'altitude (MNA) avec différentes résolutions spatiales ont été utilisés pour produire les scénarios de cette étude. Un MNA de résolution spatiale de 20 m a été obtenu du site GeoGratis (<http://geogratias.cgdi.gc.ca/>). L'altitude du territoire varie de 4 à 844 m au-dessus du niveau de la mer. Les pentes les plus raides se situent dans la partie amont (Nord) du territoire (Ressources naturelles Canada, 2013), tandis que des altitudes plus basses se situent dans la partie aval (Sud) du bassin versant. Deux autres MNA de 5 m et 10 m de résolution spatiale ont été utilisés à partir de données LiDAR (Light Detection and Ranging). Le MNA de 5 m a été fourni par la Ville de Québec, tandis que le MNA de 10 m a été ré-échantillonné à partir du MNA de 5 m. Les relevés de données du MNA de 5 m ont été réalisés en novembre 2013 et juin 2014. La première collecte de données a utilisé un système laser Gemini 3100 (Série: 06SEN187) à une fréquence de mesure et balayage de 125 kHz et 55 kHz avec un angle de balayage d'environ 18 degrés. Le vol a été fait au moyen d'un aéronef de type Cessna 206, lors d'un vol à une altitude moyenne de 650 m au-dessus du sol. La densité d'acquisition utilisée a été de 4 points/m² avec une précision absolue d'altimétrie et planimétrie de 25 cm. La deuxième collecte effectuée les 7 et 8 juillet 2014 a suivi une procédure similaire; mais cette fois-ci avec un système laser Optech Gemini ALTM (Série: 06SEN209).

3.3.2 Occupation du sol

Une carte de référence unique de l'occupation printanière de 2014 (Raimbault *et al.*, 2016b) modifiée par Blanchette *et al.* (2019) du bassin versant Saint-Charles a été utilisée pour tous les scénarios de cette étude. Cette carte a été élaborée par photo-interprétation de photographies aériennes colorées prises en 2014. Selon une approche méthodologique de segmentation et classification orientée-objet d'une image panchromatique QuickBird (Dissanska *et al.*, 2009), utilisée par Blanchette *et al.* (2019), il a été possible de combiner des caractéristiques géomorphologiques du territoire associées aux milieux humides. La nouvelle carte d'occupation du sol présente une cartographie détaillée des milieux humides en utilisant des données auxiliaires des cartes d'inventaire écoforestier, de cartes pédologiques et de l'hydrographie (Beaulieu *et al.*, 2014a). La carte d'occupation du sol de 2014 (Blanchette *et al.*, 2019) est représentée pour les besoins de modélisation hydrologique par huit classes principales (Figure 3.3), qui sont: les forêts de conifères, les forêts de feuillus, les forêts mixtes, l'eau, l'agriculture, les zones urbaines, les sols nus et les zones humides (bog, fen, tourbière boisée, marécage, marais, et de l'eau peu profonde).

Il est important de noter que toutes les cartes, soit d'occupation de sol, les types de sols ou les modèles numériques d'altitude utilisés dans cette étude, ont été mises à jour à travers la délimitation du bassin versant de la rivière Saint-Charles fournie par la Ville de Québec. Le pourcentage du bassin versant occupé par chaque occupation du sol a été présenté à la section 3.1.

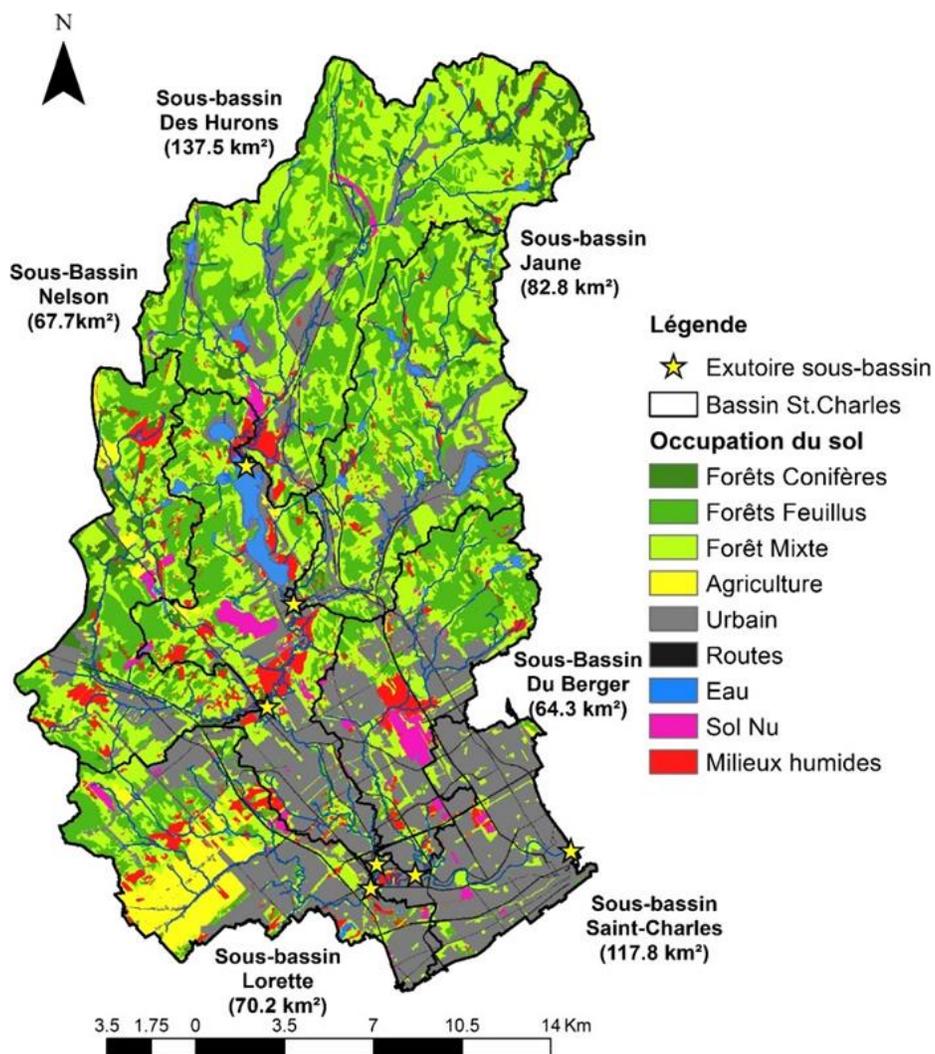


Figure 3.3. Localisation du bassin versant de la rivière Saint-Charles avec les sous-bassins hydrographiques, l'exutoire de chaque sous-bassin et la carte d'occupation du sol de 2014 (Blanchette et al. 2019) en utilisant les délimitations du bassin versant fournies par la Ville de Québec.

3.3.3 Type de sol

Dans le cadre de ce projet, deux cartes de types de sol ont été utilisées pour les différents scénarios qui seront discutés à la section 3.5. Une carte a été extraite des Soil Landscapes of Canada (v3.1) (<http://sis.agr.gc.ca/cansis/nsdb/slc/index.html>) disponibles à l'échelle 1/1 000 000

(Groupe de travail sur les Pédopaysages du Canada, 2010). Les pourcentages de limon, d'argile et de sable ont été calculés pour identifier les textures du sol appliquées pour chaque polygone (Rawls et Brakensiek, 1989). En utilisant la délimitation du bassin versant de la rivière Saint-Charles préparée par la Ville de Québec, le bassin est caractérisé par des textures du sol constituées par des loams sableux (74,76%) situés dans la plupart du bassin, suivi par des limons argileux (25,04 %) dans la partie aval du bassin versant et, en plus faible abondance, les sables limoneux (0,20%) dans une petite zone située à l'extrémité ouest du bassin versant (Figure 3.4a).

À partir des études de cartographie écologique réalisées par Audet *et al.* (1997), une deuxième carte de type de sol a été élaborée et mise à jour afin de répondre à l'un des objectifs proposés dans cette étude, concernant les impacts que cette nouvelle classification peut avoir sur la modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Saint-Charles.

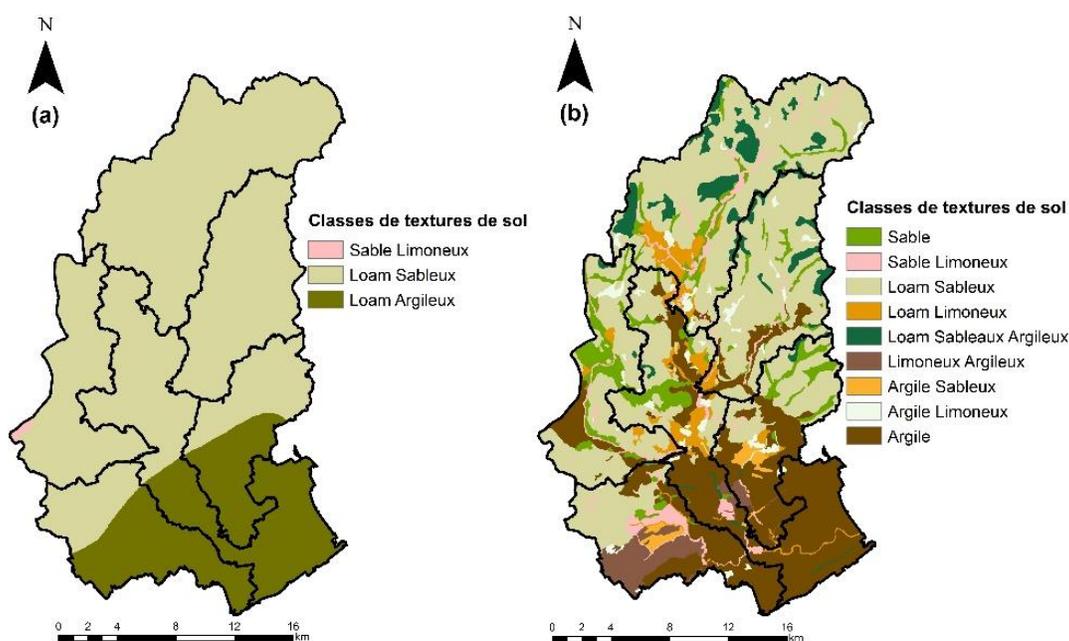


Figure 3.4. Les cartes de type de sol du bassin de la rivière Saint-Charles, Québec : (a) Pédopaysages du Canada v3.1 Agriculture et agroalimentaire Canada 2010 et (b) Atlas du cadre écologique de référence du bassin versant de la rivière Saint-Charles

À l'aide des données géomorphologiques (combinant des informations sur l'accumulation de sédiments à la surface du territoire et sur les classes de drainage interne du sol) et de données topographiques détaillées (décrites par les formes de relief, morphologie secondaire et pente) cartographiées par Audet *et al.* (1997), la classification des sols a été réalisée à l'aide des quatre types géomorphologiques (TG1, TG2, TG3, TG4) qui représente l'unité taxonomique de base jusqu'à concurrence de 4 et de leur pourcentage d'occupation (P1, P2, P3, P4) respectif. Au total,

12 classes de textures du sol (Tableau 3.2) ont été déterminées à partir des pourcentages des fractions de sable, de limon et d'argile représentées dans le triangle de texture du sol (Moeys, 2014).

Tableau 3.2. Les classes de type de sol (PHYSITEL)

Classe de type de sol		Fraction (%)		
N°	Texture	Sable	Limon	Argile
1	Sable	90,0	5,0	5,0
2	Sable Limoneux	80,0	10,0	10,0
3	Loam Sableux	55,0	28,0	7,0
4	Loam	43,0	40,0	17,0
5	Loam Limoneux	15,0	65,0	20,0
6	Limon	10,0	85,0	5,0
7	Loam Sableux Argileux	50,0	23,0	27,0
8	Loam Argileux	33,0	34,0	33,0
9	Limoneux Argileux	15,0	52,0	33,0
10	Argile Sableux	45,0	10,0	45,0
11	Argile Limoneux	10,0	40,0	50,0
12	Argile	20,0	20,0	60,0

Selon la nouvelle classification réalisée dans cette étude, le bassin hydrographique est représenté par 9 classes de texture du sol dominant calculée par HYDROTEL (Figure 3.4. Les cartes de type de sol du bassin de la rivière Saint-Charles, Québec : (a) Pédopaysages du Canada v3.1 Agriculture et agroalimentaire Canada 2010 et (b) Atlas du cadre écologique de référence du bassin versant de la rivière Saint-Charles. Dans une grande partie du territoire, la texture du sol prédominante est représentée par des loams sableux (49,03%), des argiles (24,64%), du sable (7,15%), des loams sableux argileux (5,14%), des loams limoneux (4,23%), du sable limoneux (3,49%), des limoneux argileux (3,26%), argile limoneux (2,13%) et, l'argile sableux (0,93%).

3.3.4 Réseau vectoriel

Le réseau hydrographique du bassin de la rivière Saint-Charles (Figure 3.5) est considéré comme bien développé (Audet *et al.*, 1997). Les rivières présentes couvrent une vaste zone de drainage contenant différents types d'occupation et types de sol. Il existe plusieurs lacs dans le territoire

qui sont associés à ce réseau, dont le lac Saint-Charles, le plus grand (3,6 km²), le lac Beauport (0,85 km²), le lac Delage (0,59 km²), et le lac Durand (0,31 km²) (APEL, 2014; 2016; 2017). Le réseau vectoriel utilisé comme base pour tous les scénarios a été obtenu de Blanchette *et al.* (2019). Ce réseau a été extrait à une résolution de 1/50 000 (Ressources naturelles Canada, 2013) et ensuite il a été filtré selon six étapes qui correspondent à l'élimination des segments fluviaux intermittents et non connectés, la conversion de boucles non désirées, la combinaison de polygones en un seul, la fusion des segments, la fragmentation du réseau fluvial et, enfin, la suppression des segments inférieurs à une cellule de l'échelle spatiale (20 m). Le réseau hydrographique de base du bassin versant est composé de 434 segments de rivières et 200 polygones (lacs) qui correspondent respectivement à une longueur totale de 389 km et une superficie totale de 8,58 km². Plus précisément, le sous-bassin de la rivière Des Hurons dispose d'un réseau hydrographique de 101 km de longueur, suivi de la Jaune (64 km), de la Nelson (56 km), de la Lorette (53 km), de la Du Berger (44 km) et de la Saint-Charles (71 km).

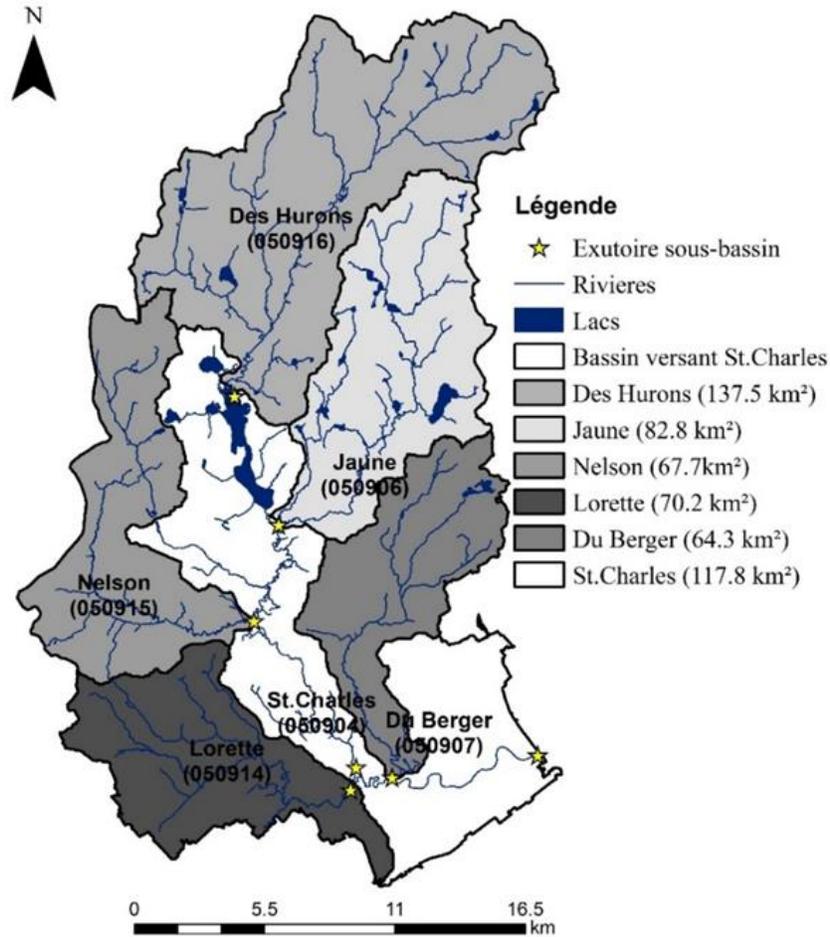


Figure 3.5. Hydrographie du bassin versant de la rivière Saint-Charles en utilisant la délimitation du bassin versant fournie par la Ville de Québec.

3.3.5 Données hydrométéorologiques

Le bassin versant de la rivière Saint-Charles dispose d'un vaste réseau de stations météorologiques relativement bien distribué à l'intérieur et à l'extérieur du territoire. Le bassin compte 30 stations météorologiques sur le territoire et 64 stations dans un rayon de 30 km de son barycentre (Figure 3.6). Les chroniques météorologiques ont été construites à l'aide des précipitations et des températures journalières mesurées par Environnement et Changement climatique Canada et la Ville de Québec.

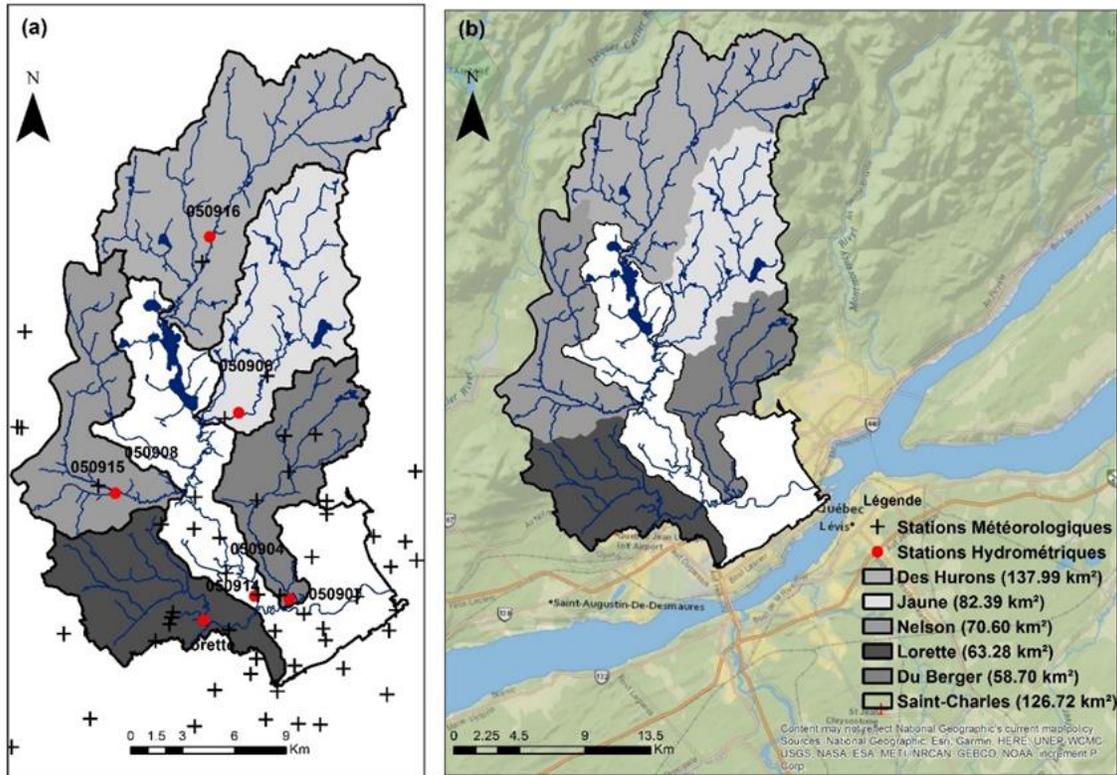


Figure 3.6. Les stations du bassin versant de la rivière Saint-Charles : (a) Localisation des stations météorologiques et hydrométriques et (b) Localisation régionale du bassin versant.

Un réseau de stations hydrométriques (Figure 3.6) enregistre des niveaux d'eau à différents endroits dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles, avec l'une des stations en service depuis 1969 (Ministry of Sustainable Development the Environment and the Fight Against Climate Change, 2017). Le sous-bassin de la rivière Des Hurons compte une station (050916) en activité depuis 2007. Pour l'une des stations hydrométriques situées sur la rivière Nelson (050915), les données hydrométriques du sous-bassin sont mesurés depuis 2006. Une deuxième station (050908) qui n'est plus en activité a des enregistrements entre 1983 et 1994. La rivière Lorette possède deux stations, l'une en amont du sous-bassin (050914) avec des données entre les années 2006 et 2009 et une deuxième en aval (Lorette) avec enregistrement des débits d'eau entre les années 2012 et 2013.

3.4 Système de drainage urbain: constitution d'un système simplifié et intégration au réseau hydrographique d'HYDROTEL

Une cartographie du système urbain de drainage des eaux pluviales réalisée par la Ville de Québec (Service de l'ingénierie, division de l'arpentage et de la géomatique) a été utilisée et ajoutée au réseau hydrographique du bassin de la rivière Saint-Charles. À noter que la

cartographie est mise à jour sur une base quotidienne par le Service de l'ingénierie et par les Divisions travaux publics d'arrondissement. Elle peut être modifiée suite à des travaux, des opérations, des relevés ou des validations terrain.

Le réseau de drainage urbain de la Ville de Québec est présent principalement dans les zones les plus urbanisées du territoire qui correspondent aux sous-bassins des rivières Saint-Charles, Du Berger et Lorette. Pour les sous-bassins Jaune et Nelson, il y a encore une faible présence de zones urbaines. Selon les basés de données de la ville de Québec, le sous-bassin Des Hurons ne montre aucun signe du système urbain. Cependant, la présence des agglomérations urbaines principalement au bord de la rivière Des Hurons peut amener à la présence de conduites d'égout pluviale laquelle on n'a pas d'accès. Ces agglomérations font partie de l'administration de l'arrondissement de Stoneham-et-Tewkesbury. En d'autres termes, l'exutoire de la rivière Des Hurons vers le lac Saint-Charles est la limite de la cartographie du système urbain réalisée par le Service de l'ingénierie et par les Divisions travaux publics d'arrondissement. La Figure 3.7 ci-dessous représente en général la localisation du réseau de drainage urbain de la Ville de Québec.

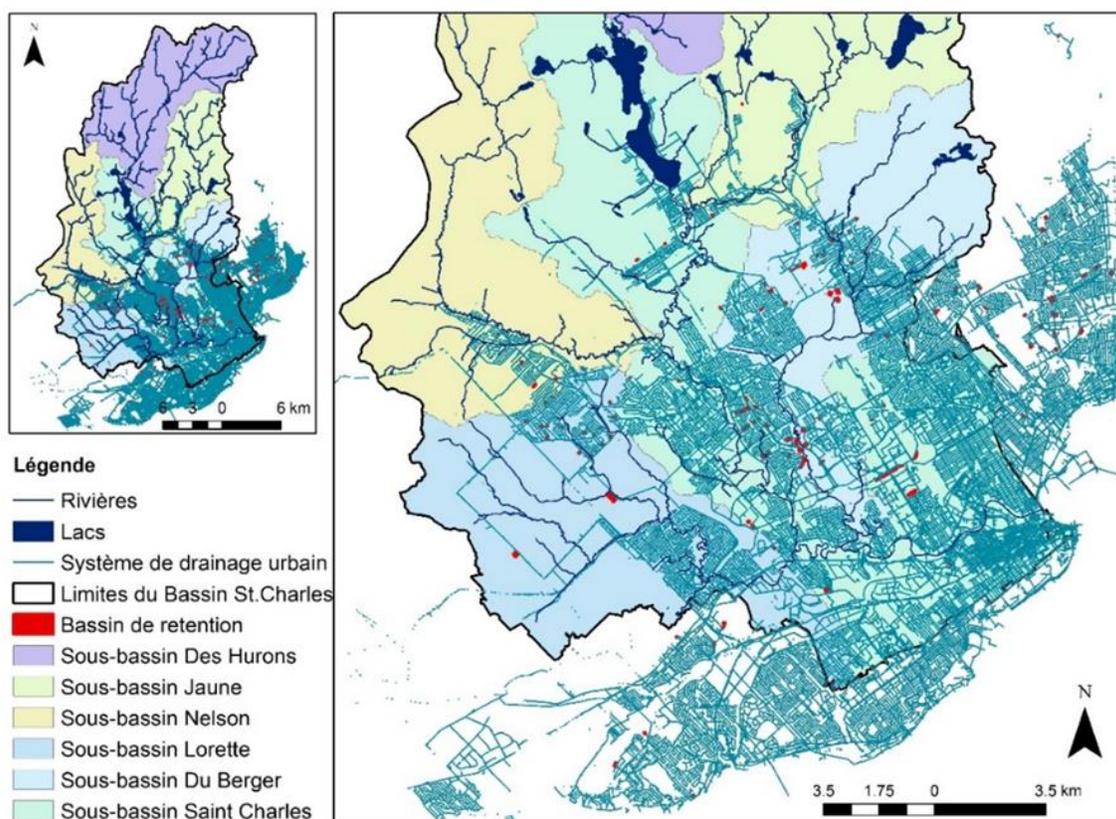


Figure 3.7. Bassin hydrographique de la rivière Saint-Charles et le système de drainage urbain répartis sur tout le territoire.

Dans le cas de cette étude, nous avons comme objectif d'ajouter au réseau hydrographique existant le réseau principal de drainage des eaux pluviales uniquement, c'est-à-dire, les principales conduites, ainsi que les bassins de rétention présents dans les limites du bassin. Pour cela, trois étapes ont été déterminées pour l'implantation de ces systèmes. Pour chacune d'elles, les informations contenues dans les tables d'attributs fournies dans le logiciel ArcGIS 10.2 for Desktop (Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2017) ont été utilisées. À la première étape, une analyse détaillée des données a été réalisée afin d'explorer les informations existantes de chaque couche et composante du système de drainage urbain. Ensuite, dans une deuxième étape, les données ont été classées et regroupées. Enfin, lors de la troisième étape, le système de drainage urbain a été ajouté au réseau hydrographique existant.

Lors de la première étape, on a observé trois grands groupes de données, c'est-à-dire des informations sur les éléments et les structures présents dans les cours d'eau et les lacs dispersés sur tout le territoire, suivi des données sur les composantes du système d'alimentation en eau potable de la ville de Québec ; et enfin, des données relatives aux composantes du système d'égout. Les données sur le système de distribution en eau potable n'ont pas été utilisées dans le cadre de cette étude mais ils seront décrits à fin de démontrer les éléments contenu dans ce groupe.

Pour une description plus détaillée, le premier groupe de données est caractérisé par huit couches d'informations (Figure 3.8) décrites ci-dessous: (i) éléments naturels du thème hydrographique (chutes, rapides, résurgences); (ii) structures ponctuelles (ponceau non linéaire); (iii) structures linéaires (mur de rive du fleuve, de cours d'eau principal ou secondaire, de lac ou d'étang où se trouvent aussi les ponceaux, les barrages, les écluses et les quais); (iv) bordures des cours d'eau qui délimitent les surfaces (fleuve, cours d'eau principal et secondaire, lac, étang, bassin artificiel, où ces éléments, à l'exception du fleuve, peuvent exister sous forme de limites précises ou imprécises); (v) lignes des hautes eaux du fleuve (précise et imprécise); (vi) ensemble des cours d'eau surfacique sur le territoire de la Ville de Québec où se trouvent les éléments du fleuve, cours d'eau principal et secondaire, lac étang et bassin artificiel; (vii) éléments linéaires de l'hydrographie (les cours d'eau secondaires précis et imprécis, les cours d'eau intermittents précis et imprécis, les fossés simples (<2m) et les fossés doubles (>2m) et les cours d'eau artificiel; et enfin, (viii) les lignes de centre des cours d'eau dans le territoire.

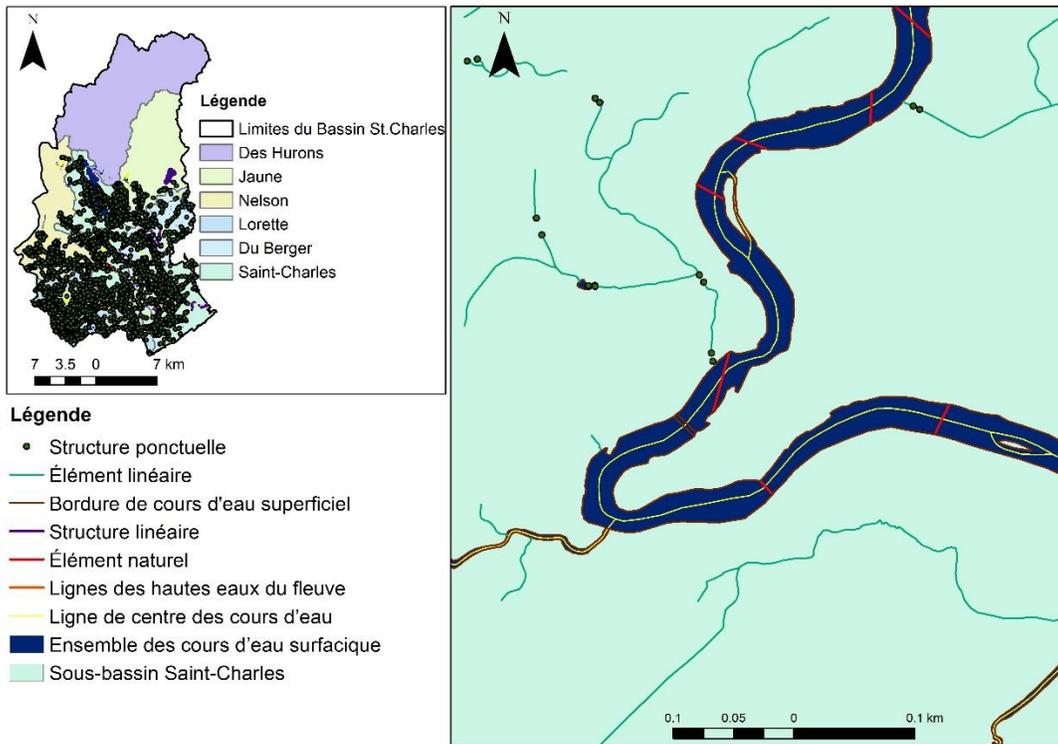


Figure 3.8. Composantes et éléments structurels du réseau hydrographique de la Ville de Québec, Canada.

Le deuxième groupe de données est caractérisé par 12 couches d'informations (Figure 3.9) décrites ci-dessous: (i) borne d'incendie (servant à la protection d'incendie et le rinçage du réseau d'aqueduc); (ii) purge d'aqueduc; (iii) équipement des ouvrages (bouchon, clapet, débitmètre, maintien de pression, pompe, purgeur d'air, relâche de pression, réducteur de pression, réduit, tamis, transmetteur de pression et vanne); (iv) vanne du réseau et branchement; (v) raccord aqueduc du réseau et branchement (té, croix, coude, bouchon, réducteur, manchon, nœud); (vi) robinet d'arrêt; (vii) accessoires d'aqueduc (abreuvoir, cabinet de jeu d'eau, cabinet d'irrigation, fontaine, tête d'arrosage, tête d'irrigation); (viii) ouvrage point d'aqueduc (chambre de vanne, poste de pompage, suppression, réducteur de pression, réservoir, usine de traitement d'eau potable, puits, barrage, prise d'eau); (ix) conduite d'aqueduc du réseau (amenée, principale, secondaire, locale); (x) branchement (borne d'incendie, gicleur, autres); (xi) ouvrage limite d'aqueduc (chambre de vanne, de purgeur d'air, de régulation, de réduction de pression, de

compteur, de clapet, de pompage, de surpression, de traitement et poste de pompage, poste de surpression, poste de traitement, etc.) et enfin (xii) aqueduc désaffecté.

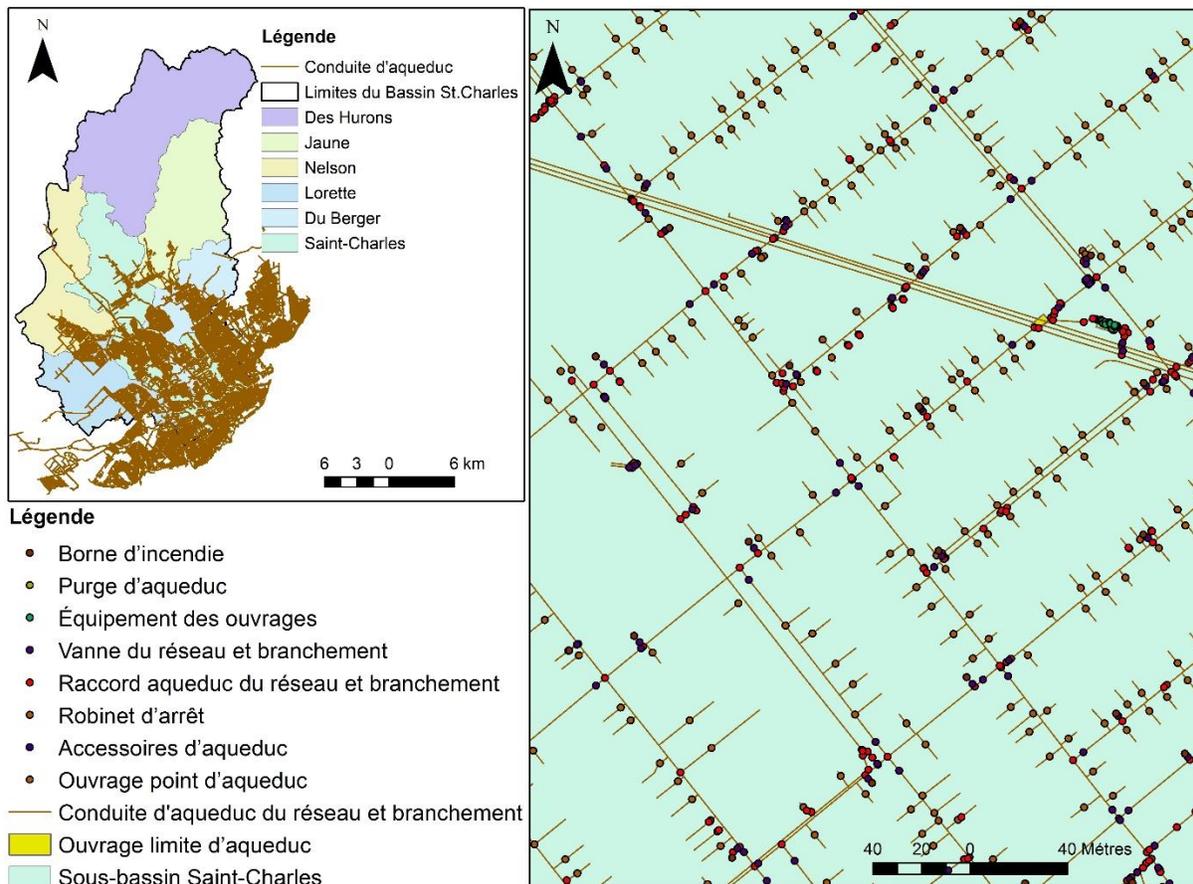


Figure 3.9. Composantes du système d'alimentation de l'eau potable de la Ville de Québec

Le troisième groupe comprend les éléments structurels du système d'égout (Figure 3.10). Il est composé de six couches d'information, l'une d'elles est nommée conduites d'égouts, laquelle englobe quatre différents types de réseau de drainage urbain, comme: (i) réseau d'égout de type domestique composé de conduites domestiques (regard, raccord, puisard); (ii) réseau d'égout de type pluvial (conduites pluviales principales et locales, point de rejet pluvial, regard, puisard, raccord, ponceau); (iii) réseau d'égout de type unitaire (conduite unitaire, regard, raccord, puisard) et (iv) le réseau de type inconnu (conduites inconnu, regard, raccord, puisard); (v) les ouvrages d'égout des eaux usées et pluviales qui sont représentés par diverses structures (chambre de vanne, de purgeur d'air, de régulation contrôlée, de drainage, de raccordement, poste de pompage, ouvrage de surverse, station hydrométrique, réservoir, usine et chambre de régulation et bassin de rétention), et enfin (vi) les bassins versants des conduites (des eaux usées et pluviales).

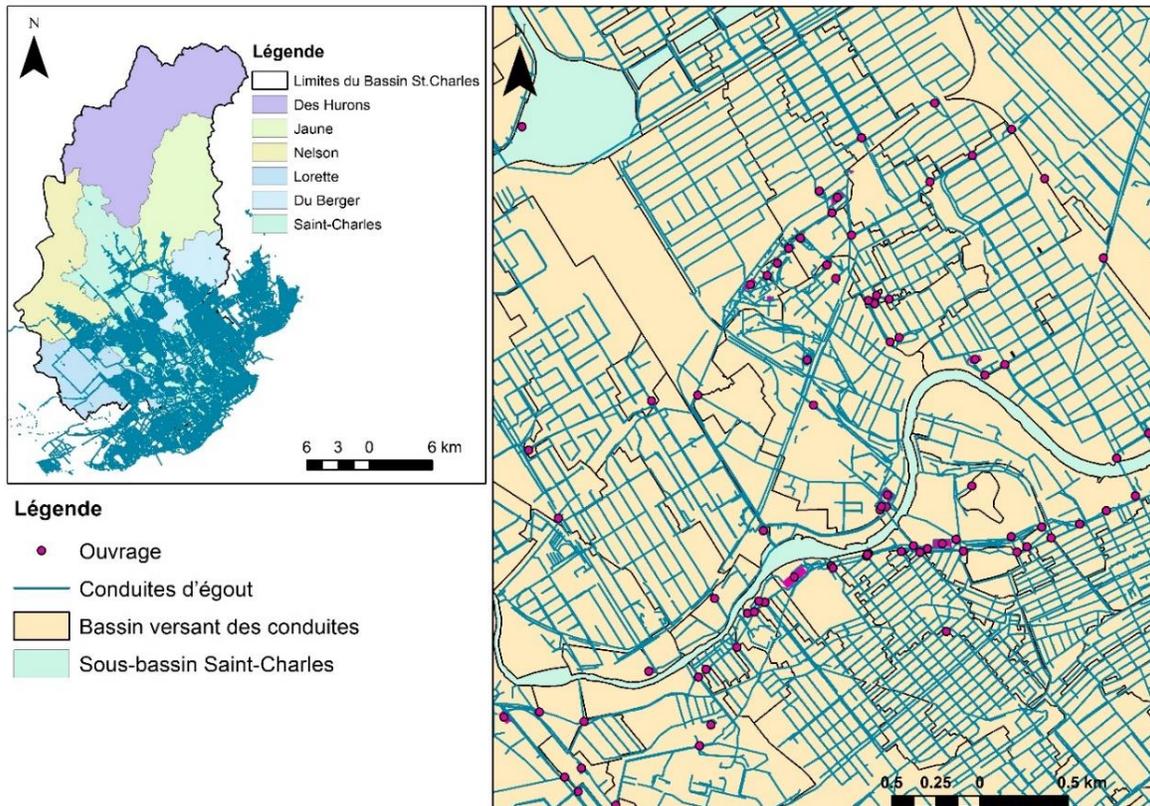


Figure 3.10. Système d'égout de la Ville de Québec, Canada.

Lors de la deuxième étape, les données du premier groupe (réseau hydrographique) et du troisième groupe (réseau d'égout) ont été sélectionnées dans le but d'utiliser uniquement les conduites du système de collecte des eaux de pluie et les bassins de rétention sur le territoire. Le système de collecte unitaire, à savoir la combinaison de la collecte des eaux pluviales avec des eaux usées domestiques, est fortement présent en aval du bassin versant. Plus précisément, 97% des conduites unitaires se trouvent dans le territoire du sous-bassin de la rivière Saint-Charles et 3% dans le sous-bassin de la Lorette, qui représentent respectivement, 298 km et 8 km de longueur totale. Ces conduites n'ont pas été ajoutées au réseau hydrographique de base car elles sont dirigées vers les stations de traitement des eaux usées sauf en situation de débordement de temps de pluie.

Comme mentionné précédemment, Il existe quatre principaux types de réseau de drainage urbain à Québec: (i) réseau d'égout de type domestique (SS), (ii) réseau d'égout de type pluvial (SW), (iii) réseau d'égout de type unitaire (CB) et (iv) le réseau de type inconnu (XX). Ces réseaux peuvent être classés en fonction de leur capacité de débit maximal, à savoir : (a) conduite principale, (b) conduite locale et (c) intercepteur d'eaux usées. Autrement dit, les conduites

principales sont responsables du transport de la plus grande partie de l'eau recueillie dans les conduites locales et branchement, dans les zones urbaines vers les rivières, les stations de traitement des eaux usées ou les bassins de rétention. Les intercepteurs d'eaux usées sont responsables de la réception et du transport des eaux usées domestiques et pluviales vers des stations d'épuration. Le système de collecte en milieu urbain peut être trouvé sur deux types de régimes d'écoulement : (i) gravitationnel (GRA) généré par la déclivité du terrain ou par la pente de l'installation de ces conduites; ou (ii) sous pression (PRE) par l'intermédiaire de pompes. De plus, les conduites peuvent être classées en fonction de leur état de fonctionnement, parmi lesquels on compte quatre statuts : (i) actif (ACT), (ii) désaffecté (DES), (iii) hors service (HS), (iv) inexistant (INA). Les bassins de rétention présents sur le territoire sont responsables de la rétention du volume d'eau provenant des systèmes de drainage d'égout pluvial, afin d'éviter les inondations dans les cours d'eau en période de fortes pluies. Les conduites d'égout unitaire sont responsables du transport d'égout domestique et pluvial vers les usines de traitement des eaux usées. Les conduites du réseau d'égout domestique (SS), inconnu (XX) et unitaire (CB) n'ont pas été ajoutées au réseau hydrographique de base du bassin versant, principalement parce qu'elles ne sont pas l'objet de cette étude et, suite à une analyse détaillée, on a remarqué qu'il n'y pas des points de rejet de ces systèmes vers la rivière Saint-Charles.

À partir des différents types de réseaux de drainage urbains sur le territoire et de leur classification en fonction de leur capacité maximale de débit (Figure 3.11), quatre nouvelles couches de données ont été créées: (i) conduite principale d'égout pluvial, (ii) conduite locale d'égout pluvial. (iii) conduite principale d'égout unitaire, et (iv) conduite locale d'égout unitaire. Ces deux dernières couches ont été créées uniquement à des fins d'observation de leur localisation dans le bassin versant. En plus des couches ci-dessus, on a retenu les informations cartographiques relatives aux (v) points de rejet d'égout pluvial, (vi) bassins de rétention d'égout pluvial, (vii) éléments linéaires de l'hydrographie correspondant aux cours d'eaux secondaires, intermittents et artificiel et (viii) le réseau hydrographique de base (Blanchette *et al.*, 2019). À partir de ces informations cartographiées et géoréférencées, la troisième étape a permis de définir un système de drainage urbain dans la carte hydrographique existante et ce en utilisant ArcGIS.

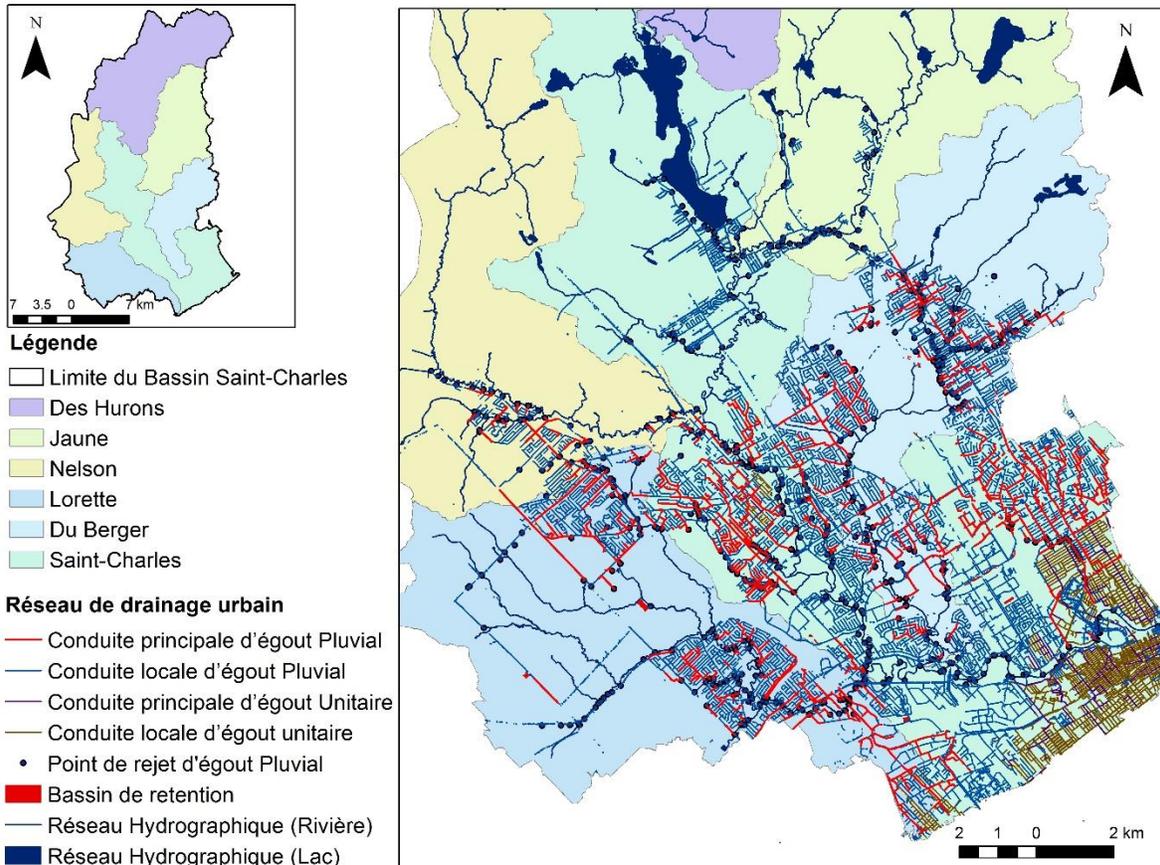


Figure 3.11. Système de collecte des eaux pluviales et unitaires dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles, Québec.

Dans la dernière étape, le système de drainage a été connecté au réseau hydrographique à partir de l'ordre contraire au flux de collecte et d'écoulement des eaux pluviales, c'est-à-dire que les connexions ont été faites en prenant toujours comme point de départ les cours d'eau présents dans le réseau du bassin hydrographique, jusqu'à atteindre les bassins de rétention ou les principales conduites de collecte des eaux pluviales. Un schéma méthodologique représentant les différentes connexions réalisées dans le réseau hydrographique du territoire est présenté à la Figure 3.12 ci-dessous. Le système a été connecté à partir de l'exutoire de la rivière Saint-Charles situé en aval du bassin versant vers l'amont, où se trouvent les rivières Du Berger, Lorette et Nelson.

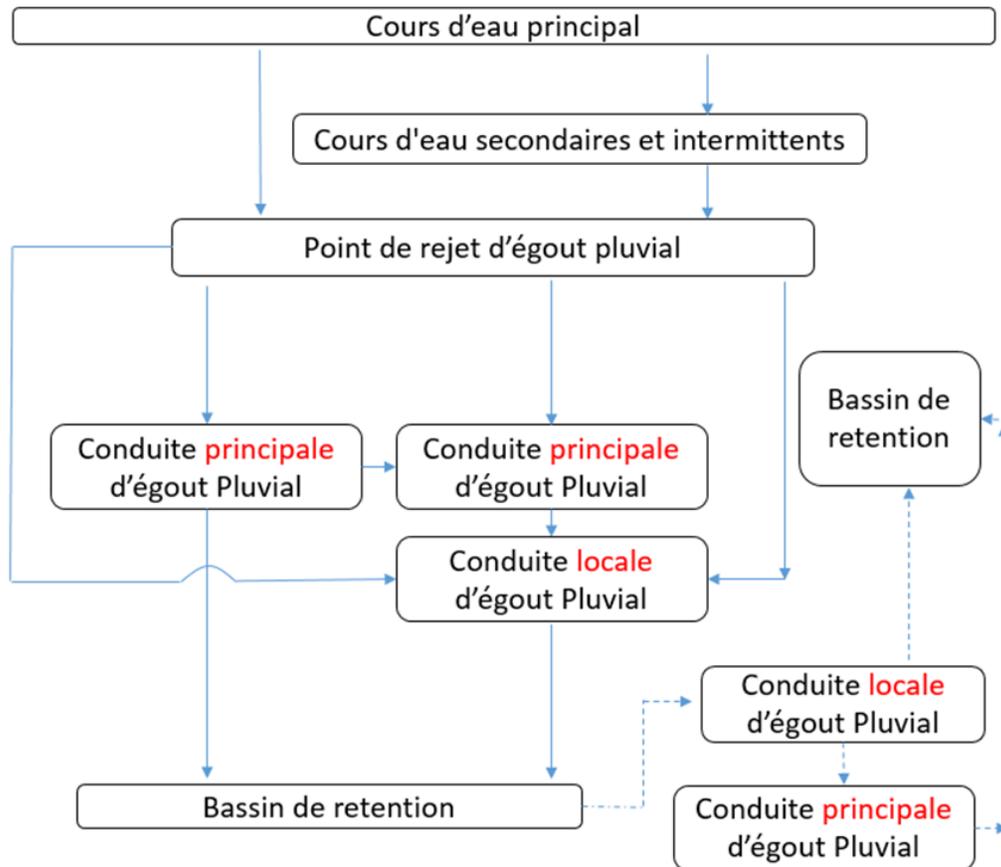


Figure 3.12. Schéma méthodologique des connexions établies entre le système hydrographique et le système de collecte des eaux pluviales dans le bassin de la rivière Saint-Charles.

Bien que la plateforme PHYSITEL/HYDROTEL ne prend pas en compte les modèles de développement urbain, l'application du système de drainage pluvial a été réalisée en supposant que les conduites ajoutés au réseau de vecteurs se comportent comme des cours d'eau et les bassins de rétention comme des lacs. Pour répondre aux exigences de ces deux plateformes, la mise en œuvre du système de collecte des eaux pluviales a été faite pour respecter les limites d'une cellule du MNA (5 m). C'est-à-dire que, dans l'existence de segments de conduites très proches (Figure 3.13a) d'une distance inférieure à 5 m, l'une d'elle est éliminée en fonction du plus faible nombre de connexions avec les conduites locales. Dans l'existence de boucles (Loop) (Figure 3.13b) et de la division de conduites (Figure 3.13c), le même critère d'élimination a été appliqué. De la totalité du système de collecte en milieu urbain connecté au réseau hydrographique existant, on a ajouté une seule conduite sur le régime d'écoulement du type sous pression (PRE) représenté dans le modèle HYDROTEL, comme un tronçon de cours d'eau.

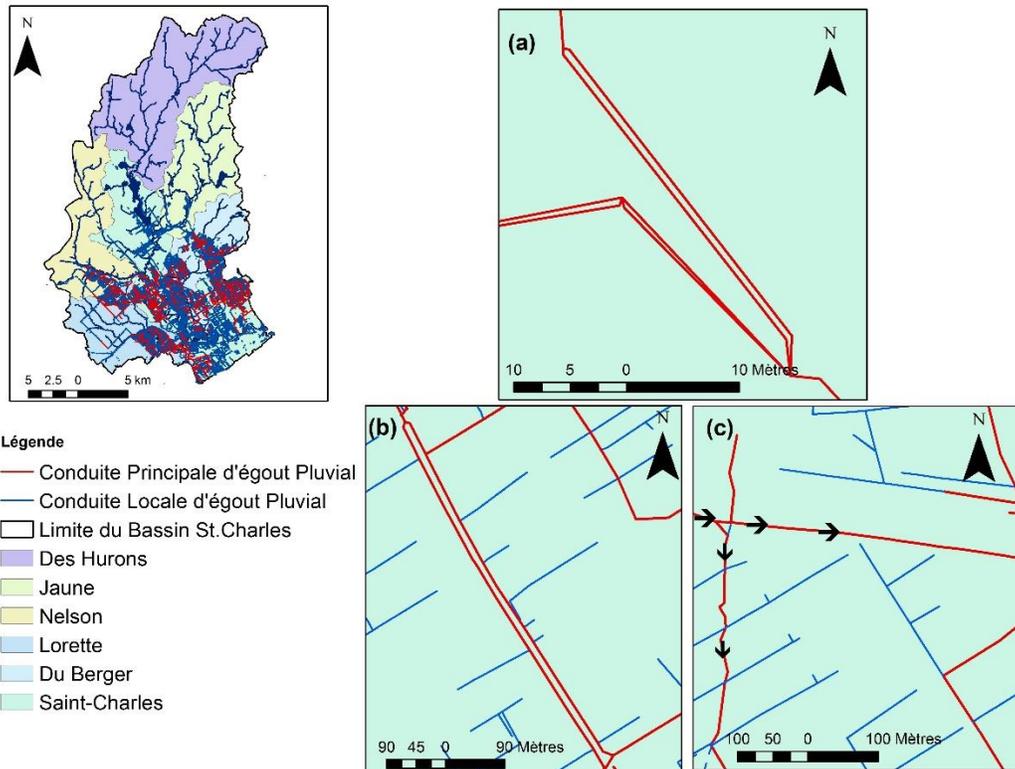


Figure 3.13. Situations rencontrées dans la mise en œuvre du système de drainage urbain de la Ville de Québec dans le réseau hydrographique du bassin versant de la Rivière Saint-Charles.

À la fin, le réseau de drainage urbain des eaux pluviales ajouté au réseau hydrographique de base du bassin versant compte 4787 segments de conduites pour un total de 258 km de longueur, (Figure 3.14). C'est-à-dire, 104 km (40%) de ce réseau se trouve dans le sous-bassin Saint-Charles, 78 km (30%) dans le sous-bassin de la Lorette, 67 km (26%) dans le sous-bassin de la Du Berger et 8,2 km (3%) dans le sous-bassin de la Nelson. Le système de collecte pluviale comprend également 134 bassins de rétention d'une superficie totale de 0,49 km² et d'une superficie moyenne de 0,0036 km². Le bassin comporte 200 lacs d'une superficie totale de 8,58 km² et d'une superficie moyenne de 0,0429 km².

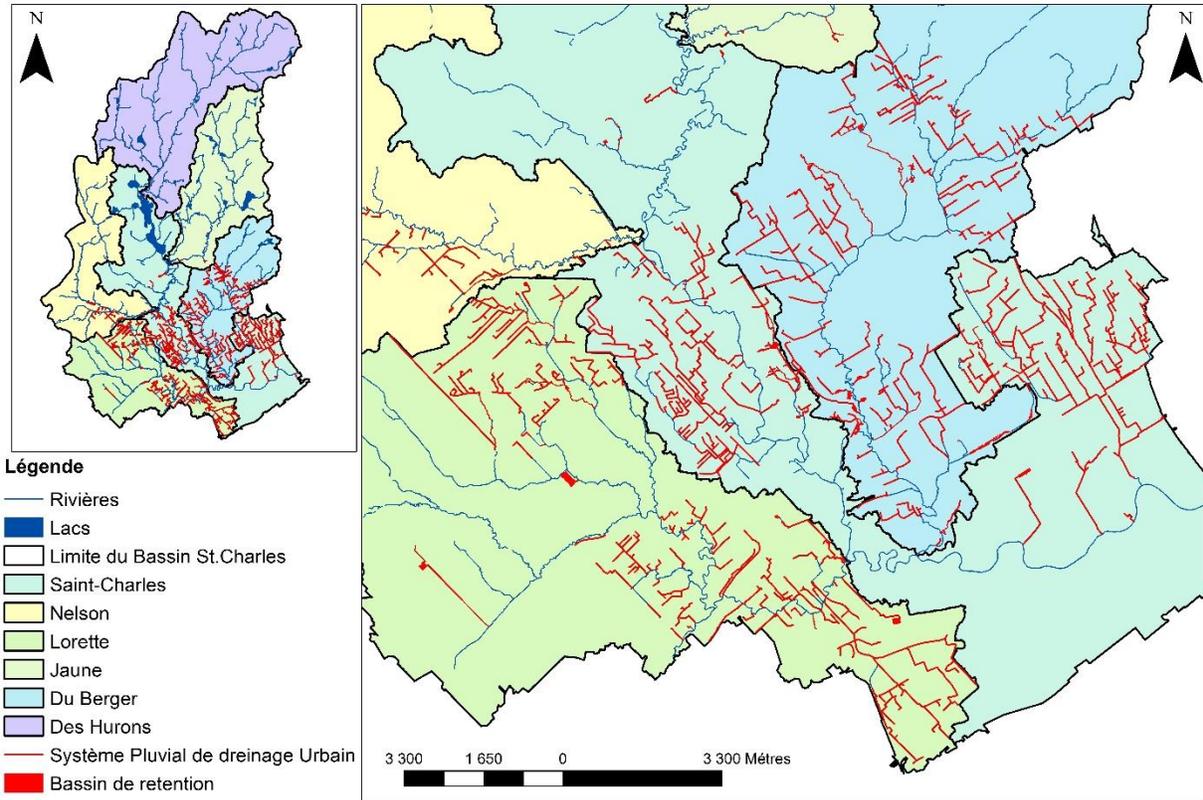


Figure 3.14. Le bassin versant de la rivière Saint-Charles dans la plateforme PHYSITEL/HYDROTEL, les sous-bassins hydrographiques, les nouvelles délimitations des sous-bassins et le système de drainage urbain de la ville de Québec.

3.5 Scénarios et stratégies

Dans le cadre de ce projet de recherche, trois objectifs principaux ont été définis, ils doivent permettre d'analyser: (i) l'impact de la résolution spatiale sur la modélisation hydrologique, (ii) l'impact du système de drainage urbain et (iii) l'impact de la nouvelle carte de type de sol. Dix projets (scénarios) ont été créés à l'aide de la plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL, chacun avec des données physiographiques (MNA, type de sols, réseau hydrographique) qui varient en fonction de la résolution spatiale, du type de sol et du réseau hydrographique (Tableau 3.1). Il convient de noter qu'une seule carte d'occupation du sol (2014) décrite à la section précédente (3.3.2) a été utilisée dans tous les scénarios introduits au Tableau 3.3.

Tableau 3.3. Description des scénarios et des données physiographiques utilisées dans la plateforme PHYSITEL/HYDROTEL.

Scénario	Caractéristiques des scénarios			Objectif n°1	Objectif n°2	Objectif n°3	
	Résolution spatiale (RS)	Type de Sol (TS) (A) ou (B)	(RH) avec/sans (SDU)	(RS) sans (SDU)	Système Drainage Urbain	(TS) avec (SDU)	(TS) sans (SDU)
1	20 m	A	Avec SDU		x	x	
2			Sans SDU	x	x		x
3		B	Avec SDU			x	
4			Sans SDU				x
5	10 m	A	Avec SDU		x		
6			Sans SDU	x	x		
7	5 m	A	Avec SDU		x	x	
8			Sans SDU	x	x		x
9		B	Avec SDU			x	
10			Sans SDU				x

****RS- Résolution spatiale; TS - Type de sol; A – Type de sol (3 textures) ; B – Type de sol (9 textures) ; RH- Réseau hydrographique ; SDU- Système de drainage urbain**

Afin d'étudier l'impact de la résolution spatiale sur la modélisation hydrologique du bassin de la rivière Saint-Charles, une comparaison a été effectuée entre les scénarios (2, 6, 8) sans la présence du réseau urbain. Pour étudier le comportement du bassin hydrographique en relation avec la présence du système de drainage urbain, des comparaisons ont été faites entre les scénarios (1, 2, 5, 6, 7, 8). Enfin, pour évaluer la valeur ajoutée de la nouvelle carte de type de sol, les scénarios (1, 3, 7, 9) ont été sélectionnés avec la présence du système de drainage et les scénarios (2, 4, 8, 10) sans la présence du système de drainage urbain. Les résultats de chaque scénario seront discutés au chapitre 4.

3.6 Le choix des périodes de calage et de validation

Le choix de la période de calage est essentiel pour les études où les modèles sont utilisés pour extrapoler les observations à travers le temps, par exemple pour étudier les impacts du changement climatique ou d'utilisation et d'occupation du sol à l'échelle locale ou globale (Melsen *et al.*, 2019). Dans le cadre de ce projet, les périodes de calage et de validation ont été choisies simplement à partir de la disponibilité des données hydrométriques enregistrées à chacune des stations présentes dans les cours d'eau des sous-bassins selon la méthode « split-sampling ». Il

a été privilégié une période de calage et de validation de 5 à 6 ans (Tableau 3.4) en tenant compte de la période la plus proche de la production de la carte d'occupation du sol (2014).

Tableau 3.4. Les stations hydrométriques présentes dans les sous-bassins de la rivière Saint-Charles et les périodes de calage et de validation utilisées.

Station Hydrométrique	Période complète	Validation	Calage
Rivière Des Hurons (050916)	2008-2017	2008-2012	2012-2017
Rivière Jaune (050906)	1983-1994	1983-1989	1989-1994
Rivière Nelson (050915)	2006-2017	2006-2012	2012-2017
Rivière Lorette (050914)	2006-2008	*	2006-2008
Rivière Du Berger (050907)	1983-1995	1983-1989	1989-1995
Rivière Saint-Charles (050904)	1969-2017	1969-2010	2010-2017

***Exceptionnellement la modélisation pour le bassin de la rivière Lorette n'a pas été validée, faute de données**

Dans chaque sous-bassin hydrographique, une méthode de calage indépendante et automatique a été appliquée et celle-ci est présentée à la section suivante. Les périodes de calage et de validation commencent en octobre et terminent en septembre. Des intervalles de validation de quatre à six ans avant le début de la période de calage ont été choisis pour les bassins Des Hurons, Jaune, Nelson et Du Berger. Pour le sous-bassin de la Saint-Charles, la période de validation est de 1996 à 2010. Exceptionnellement, pour la station hydrométrique de la Lorette, aucune validation n'a été effectuée. L'opération d'environ trois ans de cette station imposait ce choix.

3.7 Calage

Le calage est l'une des étapes les plus importantes pour s'assurer que le modèle représente les processus hydrologiques qui se produisent dans chaque sous-bassin. Le calage du modèle HYDROTEL a été effectué sur un pas de temps journalier. Dans la présente étude, un calage semi-distribué a été réalisé, c'est-à-dire que chacun des sous-bassins a été calé individuellement afin d'obtenir des jeux de paramètres indépendants. Les modèles ont été calés séquentiellement selon l'écoulement, c'est-à-dire en commençant par les sous-bassins Des Hurons, Jaune, Nelson, Du Berger, et Lorette en parallèle, puis en calant celui de la Saint-Charles alimenté par les précédents sous-bassins.

Les modèles ont été calés à l'aide d'un algorithme de calage automatisé, *Dynamically Dimensioned Search* (DDS), proposé par Tolson et Shoemaker (2007). Cet algorithme stochastique a été conçu pour résoudre des fonctions de test mathématiques et des problèmes

de calage de modèles distribués avec de nombreux paramètres, tels que HYDROTEL. Il s'agit d'une méthode de recherche de l'optimum global relativement parcimonieuse puisqu'avec seulement un paramètre à modifier (taille du voisinage considéré pour la perturbation de la solution retenue au fil des simulations). En bref, l'algorithme effectue une recherche globale au début et petit à petit celle-ci devient plus locale à mesure que le nombre d'itérations se rapproche du nombre maximal autorisé. En d'autres termes, cet algorithme permet de trouver un jeu de paramètres optimal pour chaque sous-bassin.

Tableau 3.5. Valeurs limites des paramètres utilisés pour le calage des dix scénarios

Paramètres	Borne inferieure	Borne supérieure
A	-5,0	5,0
B	0,5	24,0
C	-3	8,0
D	1,0	20,0
E	-3,0	3,0
F	1,33	26,6
G	-3,96	2,05
H	0,2	1
I	0,00004	1,485
J	0,01	1
K	0,00000005	0,001

A: Température de passage pluie neige (°C); B: Taux de fonte dans l'air (conifères) (mm/jour); C: Seuil de température de fonte (conifères) (°C); D: Taux de fonte dans l'air (feuillus) (mm/jour); E: Seuil de température de fonte (feuillus) (°C); F: Taux de fonte dans l'air (milieux ouverts) (mm/jour); G: Seuil de température de fonte (milieux ouverts) (°C); H: Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration (ETP); I: Épaisseur couche 1 (m); J: Épaisseur couche 2 (m); K: Coefficient de récession (m/h)

Pour utiliser l'algorithme DDS, il est nécessaire de spécifier les paramètres à caler, leurs limites inférieures et supérieures et le nombre maximal d'itérations souhaité. Dix (10) exercices de calage de 250 itérations soit 2 500 simulations par sous-bassins de chaque scenario ont été réalisés. Pour chaque exercice de calage, DDS donne un jeu de paramètres optimal. En analysant les résultats à partir des indicateurs de performance métriques, on a remarqué que les différents jeux de paramètres optimaux trouvés par DDS peuvent conduire à des valeurs du critère de Kling-Gupta (KGE) (Kling *et al.*, 2012) similaires pour un même sous-bassin. Donc, afin de choisir le jeu de paramètres le plus représentatif, on a établi deux critères additionnels. Le premier, en regardant le jeu de paramètres contenant la valeur le plus faible du biais en pourcentage (PBIAS) (Yapo *et al.*, 1996); en deuxième, en cas d'égalité, l'erreur quadratique

moyenne (RMSE) (Singh *et al.*, 2004). Une fois trouvé, le jeu de paramètres optimal de chaque sous-bassin a été retenu et utilisé pour les simulations sur la période de validation (Tableau 3.4). Dans cette étude, les valeurs des paramètres moins sensibles du modèle (voir Annexe 1) ont été choisies sur la base d'une connaissance préalable des différents sous-modèles selon les résultats : (i) les études de sensibilité préalables (Ben Nasr, 2014; Bouda *et al.*, 2014; Turcotte *et al.*, 2003), (ii) l'expérience acquise par l'opérationnalisation d'HYDROTEL (Turcotte *et al.*, 2004) ainsi que sur l'expérience développée pendant la mise en place de l'Atlas hydroclimatique du climat, synthétisant l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau pour le Québec méridional pour l'horizon 2050 (CEHQ, 2013, 2015). Les onze paramètres les plus sensibles ont été soumis à l'algorithme, c'est-à-dire : (i) la température de passage pluie-neige , (ii) les taux de fonte et (iii) les seuils de température de fonte pour les forêts de conifères, les forêts de feuillus et les milieux ouverts, (iv) le coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration, (iv) les limites inférieures des deux premières couches de sols et (v) le coefficient de récession. Les onze paramètres calés sont décrits ci-dessus (Tableau 3.5).

3.8 Indicateurs de performance métriques

Afin d'évaluer la performance d'un modèle hydrologique, des comparaisons visuelle et statistique entre les données simulées par le modèle et les valeurs observées sont recommandées. La comparaison visuelle entre les débits observés et simulés fournit la première vue d'ensemble de la performance d'un modèle (ASCE, 1993). Selon Legates et McCabe (1999), elle est considérée comme l'une des étapes cruciales pour une évaluation correcte d'un modèle, mais cela reste extrêmement dépendant de l'expérience de l'évaluateur (Chiew et McMahon, 1993; Houghton Carr, 1999). Une autre façon plus objective d'évaluer la performance du modèle consiste à utiliser des critères numériques, connus sous le nom de Goodness-of-fit-indicators–GOFIs. Ces indicateurs permettent une évaluation quantitative de la performance d'un modèle hydrologique. Dans cette optique, certains indicateurs de performance métriques ont été choisis pour permettre la comparaison des différents scénarios utilisés tout au long de cette étude.

Plusieurs indicateurs de performance métriques ont été utilisés afin d'évaluer l'exactitude des scénarios, la qualité des simulations, les hydrogrammes, et les différences entre les données observées et simulées produites par la plateforme de modélisation HYDROTEL. Il existe une vaste gamme de ces indicateurs disponibles dans la littérature. Cependant, certaines études ont tenté de proposer des orientations générales pour la sélection des indicateurs très informatifs,

non redondants qui caractérisent le régime hydrologique d'écoulement dans un bassin versant (Olden et Poff, 2003; Reusser *et al.*, 2009).

Parmi la grande variété de GOFs habituellement acceptés, il a été utilisé dans cette étude le PBIAS, RMSE et KGE. Ces indicateurs de performance ont été utilisés pour évaluer les résultats de calage et de validation des modèles. Le Tableau 3.6 présente ces indicateurs avec leurs équations respectives.

Tableau 3.6. Indicateurs de performances métriques Goodness-of-fit-indicators (GOFIs)

Indicateurs	Nom usuel	Références	Formulation mathématique
KGE	Kling-Gupta	Kling <i>et al.</i> (2012)	$1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2}$
RMSE	Erreur quadratique moyenne	Singh <i>et al.</i> (2004)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)^2}{N}}$
P-Bias	Biais en pourcentage	Yapo <i>et al.</i> (1996)	$\left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_s - Q_o) \times 100}{\sum_{i=1}^n Q_o} \right]$

r : Coefficient de corrélation produit-moment de Pearson; **β** : Rapport entre les valeurs moyennes (μ) des débits simulés et observés; **Gamma** : Rapport entre les valeurs d'écart-type (σ) et moyennes (μ) des débits simulés et observés; **Q_o** : Débits observés; **Q_s** : Débits simulés

Le critère d'efficacité de Kling-Gupta (KGE) (Kling *et al.*, 2012) a déjà été analysé et recommandé par de nombreuses études (Lobligeois, 2014; Osuch *et al.*, 2015). Le KGE permet une meilleure pondération du coefficient de corrélation, du biais et de la mesure de la variabilité relative (Melsen *et al.*, 2019). En plus, ce critère corrige la sous-estimation de la variabilité et fournit une évaluation directe des quatre aspects d'une série chronologique de débits (Santos *et al.*, 2018). Le calcul du KGE est implicitement basé sur les hypothèses de normalité et linéarité des données, ainsi que sur l'absence de valeurs aberrantes dans le modèle (Pool *et al.*, 2018). À partir des modifications du critère KGE effectuées selon l'étude de Kling *et al.* (2012), les performances hydrologiques peuvent être classées comme : bonnes ($KGE \geq 0,75$), intermédiaires ($0,75 > KGE \geq 0,5$), mauvaises ($0,5 > KGE > 0,0$) et très mauvaises ($KGE \leq 0,0$).

La racine carrée de la moyenne des erreurs (RMSE) est considérée comme l'une des statistiques d'indice d'erreur les plus utilisées pour évaluer le comportement hydrologique (Singh *et al.*, 2004; W. Chu *et al.*, 2004). Les valeurs obtenues pour ce critère s'étendent de 0 à $+\infty$. Une valeur de 0 indique un ajustement parfait du modèle. Par ailleurs, des valeurs plus proches de $+\infty$ indiquent une inadéquation du modèle aux données mesurées. Selon Yapo *et al.* (1996), le critère PBIAS,

qui mesure la tendance moyenne des données simulées d'être supérieures ou inférieures aux données observées, peut avoir une valeur égale à 0 lorsque le modèle est considéré comme précis. Dans les cas où les valeurs sont positives, le modèle surestime ou lorsque les valeurs sont négatives, il sous-estime.

3.9 Sensibilité de la modélisation à la résolution

Pour cette étude, et ce à titre exploratoire, on a décidé de faire une analyse de sensibilité de la modélisation à la résolution du modèle numérique d'altitude, du réseau hydrographique et des classes pédologiques, afin d'étudier les impacts potentiels du jeu de paramètres calés à différentes résolutions spatiales sur la performance du modèle. Cette analyse a été appliquée pour chacun des objectifs dans cette étude. La figure ci-dessous montre un schéma simplifié de la méthodologie utilisée dans chacun des objectifs.

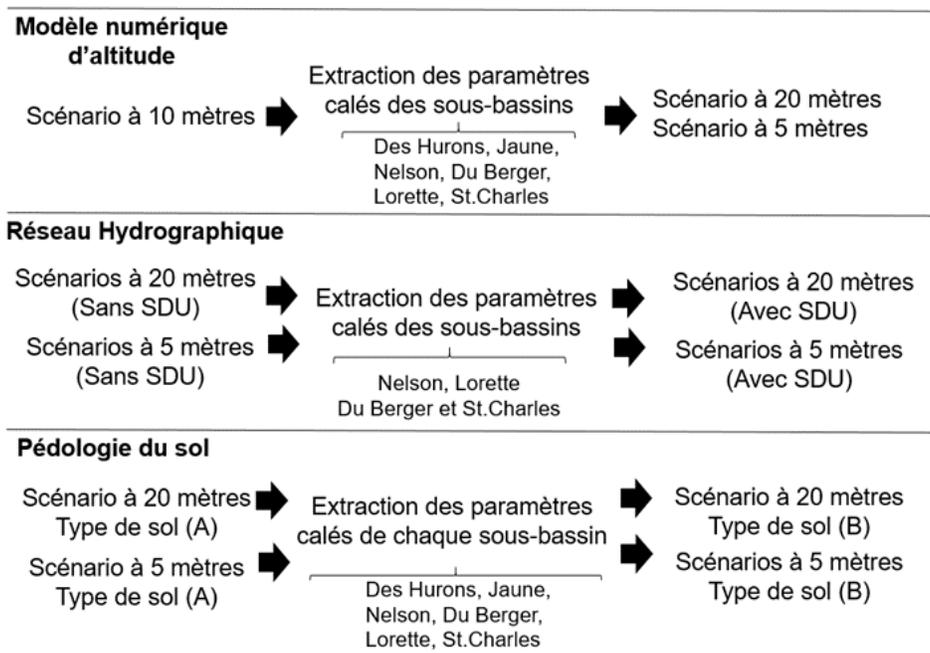


Figure 3.15. Schéma méthodologique d'analyse de sensibilité de la modélisation à la résolution

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section présente les principaux résultats obtenus pour les trois objectifs définis au cours de ce projet de recherche. Par conséquent, cette section est divisée en trois parties. La première présente les résultats faisant référence aux diverses résolutions spatiales du MNA utilisées dans les modèles hydrologiques. La deuxième partie se réfère aux résultats des comparaisons obtenues avec la présence ou l'absence du système de drainage urbain. Enfin, la dernière partie présente les résultats des comparaisons effectuées pour évaluer les impacts d'une cartographie plus détaillée des types de sol.

Il est important de noter que la disponibilité des données hydrométriques varie d'un sous-bassin à l'autre. Une disponibilité limitée rend la modélisation hydrologique difficile et souvent entachée d'incertitudes accrues, ce qui se reflète dans les valeurs des indicateurs de performance. Le sous-bassin Des Hurons a 100% des données de débit enregistrées par la station hydrométrique 050916 durant la période (2008-2017), c'est-à-dire qu'il n'y a pas de données manquantes pour cette station sur cette période. Pour le sous-bassin Jaune, la station 050906 avait 2371 données manquantes soit 59% de la chronique historique pour la période 1983-1994. Le sous-bassin Nelson ne présente que 1,19% de données non enregistrées (manquantes) par la station hydrométrique 050915 (2006-2017). Pour le sous-bassin de la Lorette, sur 1073 enregistrements de débits disponibles, 11,37% étaient manquants sur la période 2006-2008. Pour le sous-bassin St-Charles, sur les plus de 45 ans d'enregistrements (1969-2017), un pourcentage minimal de 0,26% de données non enregistrées (manquantes) par la station hydrométrique 050904. Enfin, le sous-bassin de la Du Berger (050907) ne présente que 34,37% des données enregistrées sur l'ensemble de la chronique historique durant la période (1983-1995).

4.1 Impact de la résolution spatiale du MNA sur l'hydrologie

Pour évaluer l'impact de la résolution spatiale, on a utilisé trois scénarios (2, 6, 8) présentés au Tableau 3.3 (Section 3.6) Ces scénarios font référence aux trois échelles spatiales (20, 10 et 5 mètres) utilisées pour le MNA. Cette section présente, premièrement, les analyses et comparaisons des attributs topographiques de chaque sous-bassin. Ensuite, à travers les valeurs des indicateurs de performance, les résultats ont été analysés en tenant compte des périodes de calage et de validation. Ensuite, une analyse des paramètres utilisés pour chaque scénario a été réalisée afin de comprendre leurs impacts sur la performance du modèle. Enfin, les modèles ont

été évalués en utilisant la période complète de données hydrométéorologiques. Aussi, les hydrogrammes ont été analysés afin d'étudier le comportement des débits saisonniers.

4.1.1 Analyse des attributs topographiques

Le MNA est l'une des données d'entrée essentielle des modèles hydrologiques. Selon Nazari Sharabian (2019), leur résolution spatiale peut affecter les caractéristiques du bassin versant telles que la pente, la superficie et les élévations. La pente et les élévations peuvent influencer les dynamiques de l'écoulement d'eau tandis que la superficie influence le volume d'eau provenant des précipitations. Dans ce contexte, des analyses à l'échelle des sous-bassins et UHRH ont été réalisées afin de déterminer la valeur ajoutée d'un MNA à haute résolution pour le modèle HYDROTEL.

Une analyse détaillée des attributs topographiques, plus particulièrement des caractéristiques de la pente, superficie et élévation de chaque sous-bassin des trois scénarios utilisés dans ce premier objectif, révèle que les MNA à résolution spatiale plus fine fournissent des résultats différents et probablement plus précis de la réalité des caractéristiques topographiques du terrain. Une validation sur le terrain qui n'a pas été faite dans cette étude, pourrait nous fournir plus de détail sur cette affirmation. Le Tableau 4.1 illustre certaines des caractéristiques principales de la pente moyenne pondérée à différentes échelles spatiales de chaque sous-bassin.

Tableau 4.1. Pente moyenne pondérée des sous-bassins à différentes résolutions spatiales

Sous-bassin	20 m (2)	10 m (6)	5 m (8)	Différence relative
Des Hurons	11,07°	12,25°	12,64°	14,2%
Jaune	8,68°	10,01°	10,44°	20,3%
Nelson	4,25°	5,24°	5,86°	37,9%
Lorette	1,99°	2,82°	3,33°	67,3%
Du Berger	3,96°	5,18°	5,72°	44,4%
Saint-Charles	3,18°	4,27°	4,65°	46,2%

***Différence relative: C'est la différence entre les résolutions spatiales 20 et 5 mètres, calculée comme suit : $Diff=100 \times (5\text{ m} - 20\text{ m})/20\text{m}$; Les valeurs entre parenthèses sont les identifications des scénarios. La pente moyenne pondérée des UHRH d'un sous-bassin est égale à la somme sur tous les UHRH de la multiplication de la surface d'une UHRH par sa pente moyenne, divisée par la somme totale des surfaces des UHRH du sous-bassin.**

Il est important de noter que les comparaisons entre les scénarios sans SDU 2 (RS-20m), 6 (RS-10m) et 8 (RS-5m) restent valables pour les scénarios avec SDU scénarios 1 (RS-20m), 5 (RS-

10m) et 7 (RS-5m). En effet, les différences de réseau hydrographique n'influent pas sur les MNA ou les pentes moyennes qui en sont dérivées. Les résultats démontrent que la pente moyenne augmente à mesure que l'on utilise une résolution spatiale plus fine. Plus précisément, une augmentation des pentes moyennes de 14,2% à 67,3% a été observée pour les pentes calculées à partir des MNA à 5 et 20 mètres. Les sous-bassins les plus urbanisés sont ceux qui ont subi les augmentations les plus grandes des valeurs de pente moyenne lors de l'utilisation du MNA à une résolution spatiale de 5 mètres. Le sous-bassin Lorette a eu une augmentation de 67,3%, suivi de Saint-Charles (46,2%), Du Berger (44,4%) et Nelson (37,9%). D'un point de vue théorique, cette augmentation peut influencer de manière significative le régime de ruissellement d'un bassin versant semi-urbanisé ou urbanisé. En pratique, l'influence de cette augmentation est atténuée par d'autres paramètres utilisés dans l'étalonnage automatique. Nous nous référons au phénomène de compensation qui sera abordé bientôt. Le régime de ruissellement peut contribuer de manière significative à l'augmentation des débits de crue au printemps où la combinaison des événements de forte pluie et l'imperméabilisation de la couche superficielle du sol dans les zones urbaines sont responsables de la réduction de l'infiltration de l'eau, du temps de concentration et de l'évapotranspiration.

L'évolution de la pente au niveau des UHRHs a également été évaluée. La Figure 4.1 suivante montre la distribution du nombre d'UHRH ayant des pentes comprises dans différents intervalles pour chaque sous-bassin aux différentes résolutions spatiales. Ces résultats démontrent que la résolution spatiale plus fine est caractérisée par un plus grand nombre d'UHRH ayant des pentes comprises entre les intervalles de 10 à 15 degrés et 15 à 20 degrés pour la majorité des sous-bassins. Entre 5 à 10 degrés, on remarque cette même tendance pour les sous-bassins Des Hurons, Jaune et Lorette. Entre 0 et 5 degrés, la résolution spatiale à 5 mètres a eu un effet moindre sur le nombre d'UHRH dans chaque classe pour tous les sous-bassins. Cela peut être expliqué probablement par une meilleure précision des données des élévations sur des surfaces planes avec le LiDAR. D'une manière générale, ces analyses confirment que l'utilisation des MNA à haute résolution spatiale générés à partir de l'acquisition des données du LiDAR influence directement la distribution du nombre d'UHRH par intervalle de pente dans le logiciel PHYSITEL.

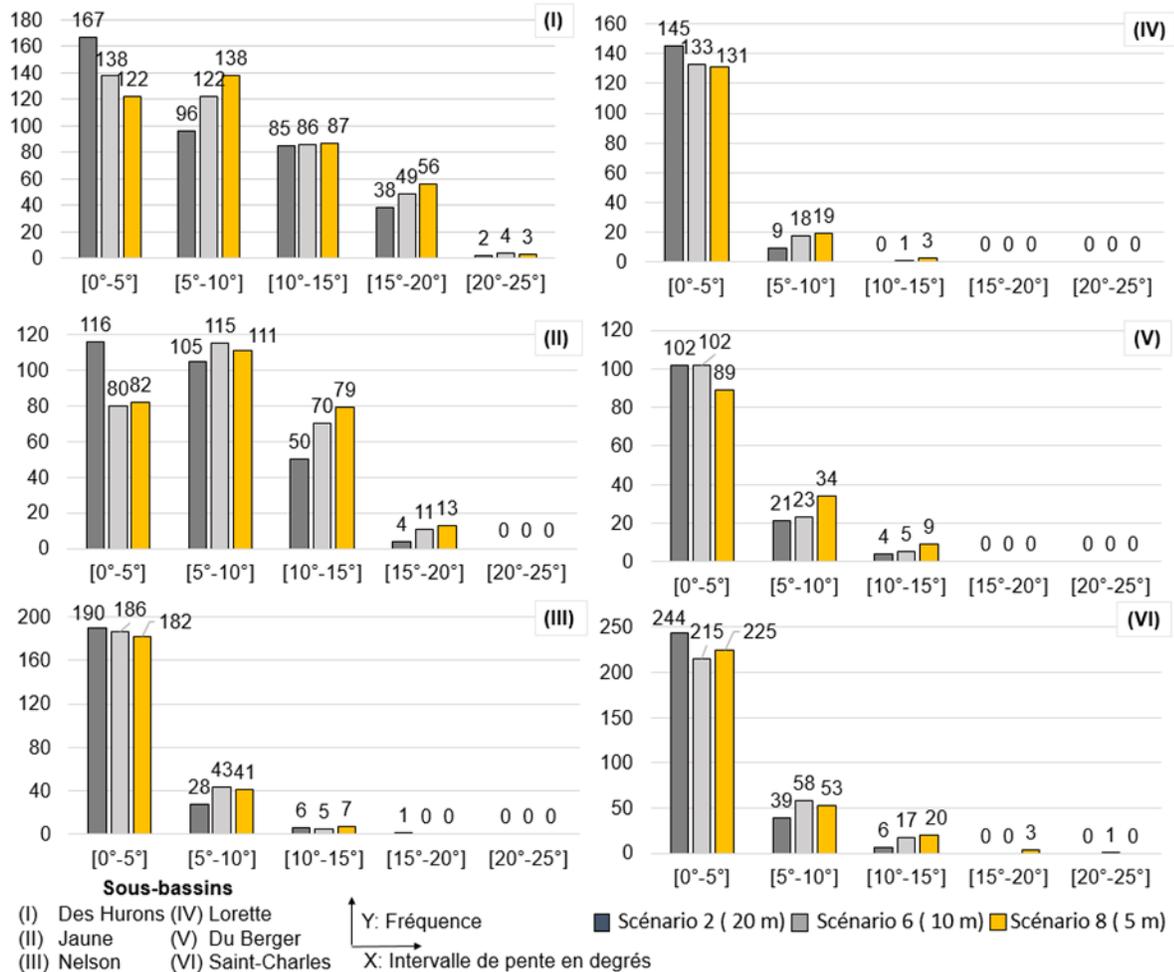


Figure 4.1 Distribution du nombre d'UHRH ayant des pentes comprises dans différents intervalles pour chaque sous-bassin à différentes résolutions spatiales

Une analyse de la superficie totale de chaque sous-bassin est illustrée au Tableau 4.2. Les résultats révèlent que les sommes des superficies totales de tous les bassins hydrographiques ne changent pas de manière significative à mesure que la résolution spatiale des MNA est augmentée. Il est important à noter que la somme des superficies totales des scénarios sans le SDU dans la même résolution spatiale ne varie pas.

Tableau 4.2 Superficie totale (km²) de chaque sous-bassin à différentes résolutions spatiales pour les scénarios sans SDU

Sous-bassins	20 m (2)	10 m (6)	5 m (8)	Différence relative
Des Hurons	138,09	137,51	137,53	-0,4%
Jaune	82,42	83,07	82,90	0,6%
Nelson	70,66	67,78	65,27	-7,6%
Lorette	63,36	68,51	72,14	13,9%
Du Berger	58,74	60,71	63,10	7,4%
Saint-Charles	126,79	122,89	119,45	-5,8%
Total	540,06	540,47	540,39	

*** Différence relative : C'est la différence relative entre les scénarios 2 et 8, calculée comme suit = $100 \times ((\text{Valeur (5 m)} - \text{Valeur (20 m)}) / \text{Valeur (20 m)})$; Les valeurs entre parenthèses sont les identifications des scénarios.**

Selon le Tableau 4.2 ci-dessus, une diminution relative dans les valeurs de superficie est observée pour les sous-bassins Des Hurons, Nelson et Saint-Charles en comparant les scénarios 2 et 8. Les sous-bassins Lorette, Nelson et Du Berger sont ceux qui présentent les plus grandes différences relatives absolues. La diminution ou l'augmentation de la superficie peut influencer le calcul du volume d'eau provenant des précipitations dans le modèle hydrologique HYDROTEL et a ainsi des conséquences directes sur le bilan de l'eau qui pourraient se refléter dans un changement de débit, notamment local.

En analysant la superficie moyenne de chaque UHRH, décrite à la Figure 4.2 suivante, on observe premièrement que la distribution du nombre d'UHRH par intervalle de superficie est similaire pour les différents sous-bassins et que la majorité des superficies pour les trois scénarios se situent entre 0,25 et 0,50 km². Plus particulièrement pour cette classe de superficies, le scénario 8 (5 m) possède des fréquences plus élevée pour cinq des six sous-bassins. De manière générale, en comparant les résultats pour chacune des classes de superficies, on remarque que la résolution spatiale à 5 m a des superficies moyennes légèrement plus élevées que la résolution à 20 m pour les sous-bassin Jaune, Lorette et Du Berger et moins élevées pour les Des Hurons, Nelson et Saint-Charles.

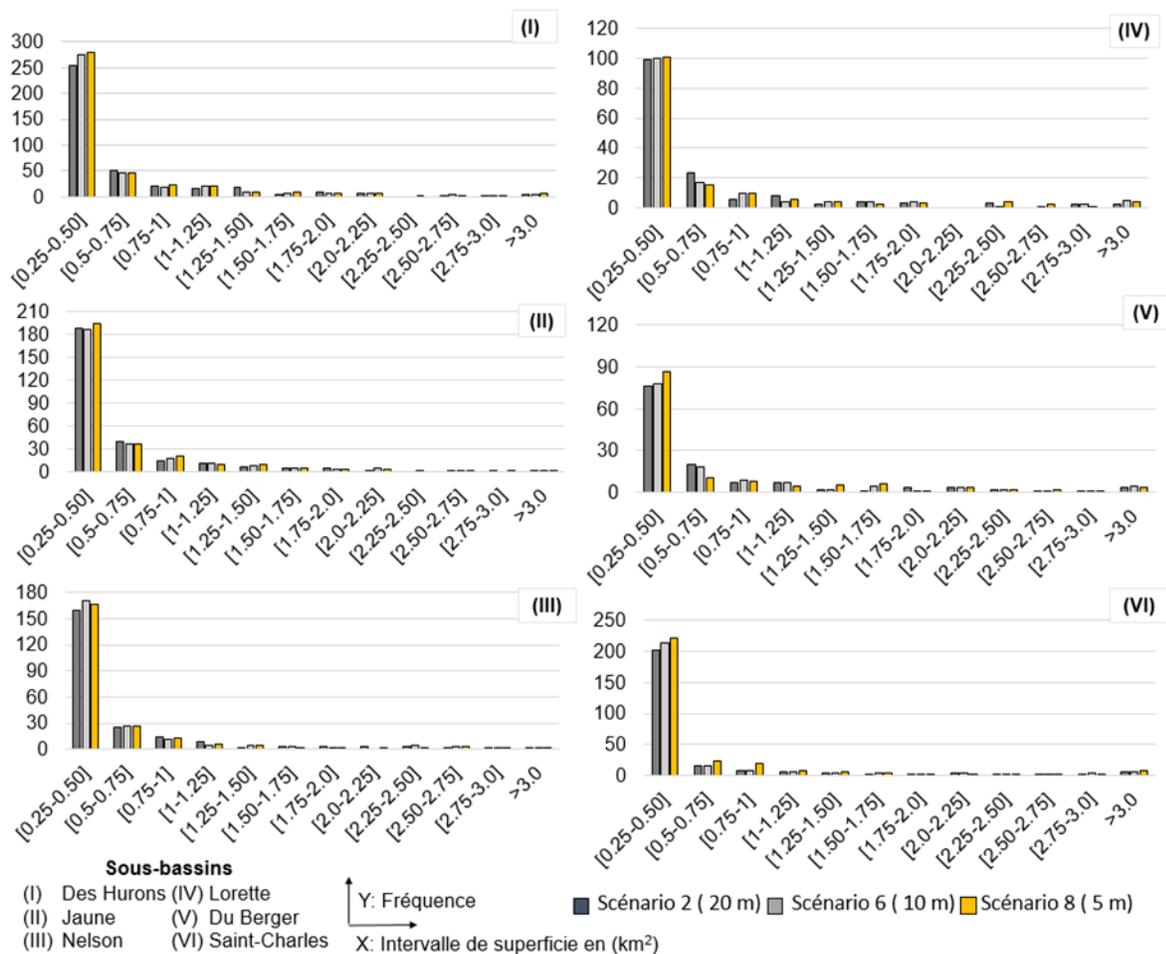


Figure 4.2 Distribution de la superficie moyenne des UHRH présents dans chaque sous-bassin à différentes résolutions spatiales

Le Tableau 4.3 illustre les valeurs d'élévation minimale et maximale de chaque sous-bassin des scénarios évalués pour cet objectif. Selon le tableau ci-dessous, le MNA à une résolution plus fine indique des valeurs les plus basses d'élévation minimale et les valeurs les plus élevées d'élévation maximale. Cela signifie que la variation entre les valeurs minimale et maximale d'élévation les plus élevées se produit à la résolution spatiale de 5 mètres. Ce résultat est probablement dû à la précision verticale du LIDAR de 25 cm.

Tableau 4.3 Élévations minimale et maximale de chaque sous-bassin à différentes résolution spatiales

Sous-bassin	Élévation Min			Élévation Max		
	20 m	10 m	5 m	20 m	10 m	5 m
Des Hurons	152,0	150,2	150,2	845,0	847,3	847,5
Jaune	151,0	150,5	150,5	710,0	717,7	718,2
Nelson	150,0	148,5	148,4	495,0	496,4	496,5
Lorette	10,0	9,8	9,7	404,0	404,2	404,7
Du Berger	10,0	7,8	7,7	572,0	571,8	572,5
Saint-Charles	4,0	-1,6	-1,8	445,0	447,5	448,2

Une analyse détaillée des caractéristiques des UHRHs montre qu'à mesure que la résolution spatiale devient plus fine, le nombre total de ces unités dans chaque sous-bassin augmente. Le Tableau 4.4 suivant illustre les résultats obtenus en ce qui concerne le nombre d'UHRHs pour les six scénarios à différentes résolutions spatiales.

Tableau 4.4 Nombre d'unités hydrologiques relativement homogènes à différentes résolution spatiales

Sous-bassin	Sans SDU			Différence relative
	20 m (2)	10 m (6)	5 m (8)	
Des Hurons	466	498	504	8,2%
Jaune	313	317	335	7,0%
Nelson	267	286	282	5,6%
Lorette	179	180	182	1,7%
Du Berger	144	152	166	15,3%
St. Charles	356	358	360	1,1%
Total	1725	1791	1829	

* Différence relative : C'est la différence relative entre les scénarios 2 et 8, calculée comme suit = $100 \times ((\text{Valeur (5 m)} - \text{Valeur (20 m)}) / \text{Valeur (20 m)})$; Les valeurs entre parenthèses sont les identifications des scénarios.

Selon le Tableau 4.4 ci-dessus, le MNA à 5 m de résolution spatiale produit une quantité d'UHRH supérieure aux autres résolutions spatiales. Les comparaisons effectuées entre les scénarios sans SDU démontrent une augmentation relative de 1,12% jusqu'à 15,28% entre les scénarios (2, 8). Ces augmentations peuvent être expliquées au niveau de la création des UHRH dans le logiciel PHYSITEL. Ces dernières sont dérivées à partir des données d'élévation, de pente et d'orientation et des données sur le réseau hydrographique vectoriel extrait du MNA et ensuite utilisées pour déterminer les délimitations de chaque UHRH. Cela signifie que le MNA permet au logiciel PHYSITEL de capturer les informations topographiques détaillés et essentielles pour bien représenter la variation spatiale des caractéristiques physiques. Les résultats de cette étude

démontrent que lorsqu'on utilise des données à hautes résolutions spatiales, on obtient une représentation plus précise de la topographie de chaque UHRH ainsi qu'une détermination plus précise de sa superficie, de sa pente, de son élévation et de son cours d'eau. Les délimitations de certains UHRHs en prise en compte de la topographie urbaine (rues et routes) ont été validées en utilisant les Google maps et le Google street view. La Figure 4.3 ci-dessous illustre les délimitations de chaque unité du sous-bassin Nelson à 20 m et 5 m de résolution spatiale sans la présence du SDU.

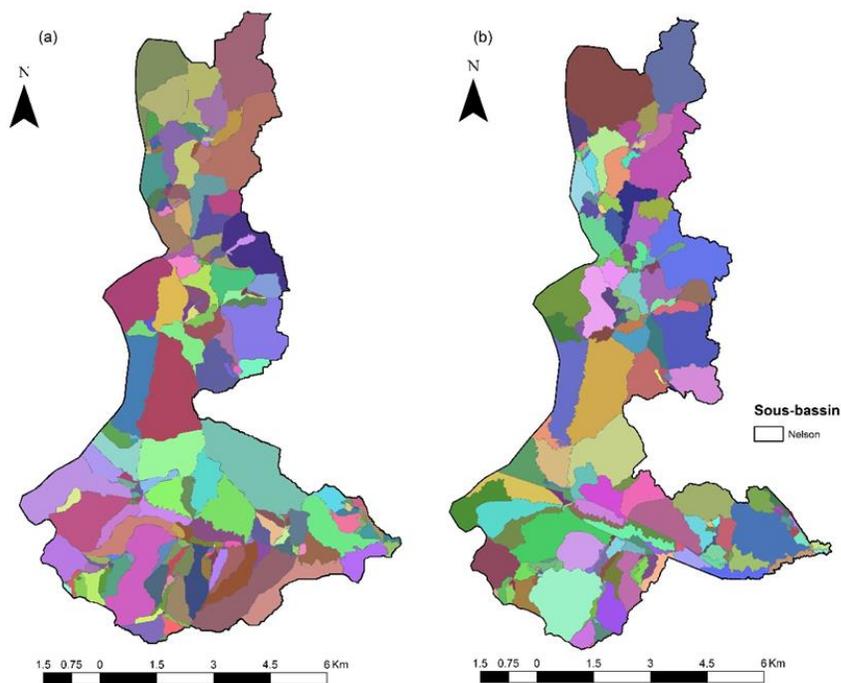


Figure 4.3 Comparaison des délimitations des UHRH du sous-bassin Nelson par le logiciel PHYSITEL à une échelle spatiale de (a) 20 m (scénario 2) et (b) 5 m (scénario 8). Les deux sont sans le système de drainage.

Il est possible de remarquer des différences de découpage, de la forme et des délimitations des UHRH entre les cartes qui sont principalement associées aux changements des résolutions spatiales. À l'échelle de 5 m (Figure 4.3b), on remarque plusieurs patrons non naturels représentés par des lignes étroites dans les délimitations de certaines UHRH. Une analyse détaillée de ces comportements permet d'affirmer qu'ils découlent de la présence des zones urbaines. Plus spécifiquement, les UHRH ont été formées et délimitées en tenant compte de la présence des rues, avenues et routes qui ont des élévations supérieures au niveau du sol. Ces petites élévations ont été capturées par les données du LiDAR et ensuite traitées et représentées dans le MNA à 5 m.

4.1.2 Calage et validation des modèles

Tel que décrit aux sections précédentes, les modèles ont été calés indépendamment, c'est-à-dire, un calage pour chacune des sous-bassins, afin d'obtenir les meilleurs jeux de paramètres pour chaque sous-bassin de cette étude. Le tableau 4.5 montre les résultats de calage et de validation des modèles correspondant aux trois scénarios utilisés pour évaluer l'utilisation de différentes résolutions spatiales en l'absence du système de drainage urbain (SDU).

D'une manière générale, les résultats pour chaque segment de rivière indiquent un bon ajustement entre les débits observés et simulés pour cinq des six sous-bassins de cette étude à l'exception de la rivière Du Berger.

Pour la période de calage, les valeurs de KGE sont très similaires. Les valeurs élevées de P-BIAS et RMSE pour le sous bassin Saint-Charles sont expliquées par le prélèvement moyen de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ à la prise d'eau Château d'Eau qui n'a pas été pris en compte dans le modèle HYDROTEL. Pour la période de validation, selon Kling *et al.* (2012), les résultats de KGE sont considérés comme bons pour les trois scénarios des sous-bassins Des Hurons, Nelson, Lorette et Saint-Charles ($\text{KGE} \geq 0.75$). D'autre part, pour le sous-bassin Jaune, et aussi les scénarios 6 et 8 du sous-bassin Du Berger, les résultats sont considérés intermédiaires ($0.75 > \text{KGE} \geq 0.5$). Le scénario 2 à 20 mètres de résolution du sous-bassin Du Berger présente une mauvaise performance ($0.5 > \text{KGE} > 0.0$). Les résultats démontrent aussi que l'augmentation de la précision des MNA ne change pas de manière significative la performance des scénarios quand on compare les trois résolutions spatiales. D'un point de vue théorique, on peut avancer qu'il y a beaucoup de paramètres de calage et qu'au final se sont surtout les algorithmes de l'hydrogramme géomorphologique unitaire (HGM) et le routage de l'eau dans les tronçons qui peuvent en théorie bénéficier d'une résolution plus fine du MNA. L'écoulement sur la partie terrestre du bassin est simulé par la production initiale des hydrogrammes géomorphologiques spécifique à chaque UHRHs et généré par l'écoulement d'une lame d'eau de référence de maille en maille sur ces UHRHs. Le sous-modèle qui effectue le calcul de l'écoulement sur la partie terrestre du bassin reçoit à chaque pas de temps et au niveau de l'UHRH une lame d'eau qu'il distribue dans le temps en fonction de HGM précédemment estimé à partir de la structure spécifique d'écoulement interne à l'UHRH. Mais bien que cela soit en principe vraisemblable, il semble que le nombre élevé de paramètres fait en sorte que DDS est capable de trouver des jeux de valeurs des paramètres capables, peu importe la résolution, de reproduire de manière similaire les débits observés. Cela peut indirectement être lié à l'équifinalité en partie (Bardossy,

2007). La section suivante va explorer justement les différents jeux de valeurs des paramètres selon les trois résolutions spatiales étudiées.

Tableau 4.5 Performances des modèles pour les périodes de calage et de validation sans système de drainage urbain.

SC	Sous-Bassins	RS	Calage			Validation		
			KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)
2	Des Hurons	20 m	0,81	-4,0	2,1	0,75	-3,0	1,8
6		10 m	0,82	-3,0	2,0	0,78	0,0	1,7
8		5 m	0,82	-2,0	2,1	0,78	-2,0	1,7
2	Jaune	20 m	0,63	-5,0	2,2	0,64	-5,0	1,7
6		10 m	0,63	-5,0	2,2	0,64	-6,0	1,7
8		5 m	0,63	-3,0	2,2	0,65	-3,0	1,7
2	Nelson	20 m	0,90	1,0	0,8	0,85	8,0	0,8
6		10 m	0,89	2,0	0,9	0,83	10,0	0,9
8		5 m	0,88	2,0	0,9	0,82	10,0	0,9
2	Lorette	20 m	0,87	-2,0	1,2	*	*	*
6		10 m	0,87	-4,0	1,3			
8		5 m	0,85	0,0	1,3			
2	Du Berger	20 m	0,69	44,0	1,5	0,57	10,0	1,1
6		10 m	0,61	49,0	1,8	0,68	14,0	1,2
8		5 m	0,54	60,0	1,9	0,70	22,0	1,3
2	Saint-Charles	20 m	0,75	18,0	5,5	0,63	33,0	7,5
6		10 m	0,75	18,0	5,5	0,64	32,0	7,5
8		5 m	0,75	17,0	5,4	0,64	31,0	7,3

*il n'y a pas de validation pour le sous-bassin Lorette en raison du peu de données disponibles à la station (050914); SC : Scénarios; RS : Résolution Spatiale

4.1.3 Analyse des paramètres

Dans cette section, on analyse l'influence des valeurs de chacun des onze paramètres (établies lors du calage automatique) sur les simulations des débits de chaque sous-bassin selon les différentes résolutions spatiales. Cependant, les analyses des paramètres demeurent exploratoires et elles se limitent à l'examen d'un seul jeu de paramètres optimal trouvé par DDS. L'effet de l'équifinalité sur la variation des valeurs individuelles de chacun des paramètres n'a pas fait l'objet de l'analyse de cette étude. Le principe d'équifinalité proposé par Beven et Freer (2001) stipule que plusieurs jeux de paramètres peuvent mener un modèle à des performances similaires

et acceptables selon la variable de sortie d'intérêt. Ce principe est étroitement étudié par Foulon et Rousseau (2018) qui soulignent les impacts de l'hypothèse d'un jeu de paramètres optimal sur les processus hydrologiques générés par la plateforme de modélisation HYDROTEL. Une analyse comparative en considérant les dix jeux de paramètres équiprobables (section 3.7) pourrait concrétiser la validité de l'interprétation des résultats démontrés dans cette section, mais ils ne seront pas discutés dans le cadre de cette étude.

Cette section présente également les diagrammes en toile d'araignée, suivis du tableau des différences relatives représentées par des flèches. Les valeurs de chaque paramètre se trouvent à l'Annexe 2 et à l'Annexe 3. Afin d'illustrer les comportements des paramètres, dans une même unité, les diagrammes en toile d'araignée (Figure 4.4) ont été ramenés entre 0 et 1 en prenant en compte les valeurs maximales et minimales qui correspondent aux valeurs limites (supérieure et inférieure) de chaque paramètre utilisées dans le calage automatique réalisé pour tous les scénarios de cette étude. On parlera de valeurs normalisées des paramètres, Z_i , définies comme suit :

Équation 4-1

$$Z_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

Où :

x_i : est la valeur du paramètre

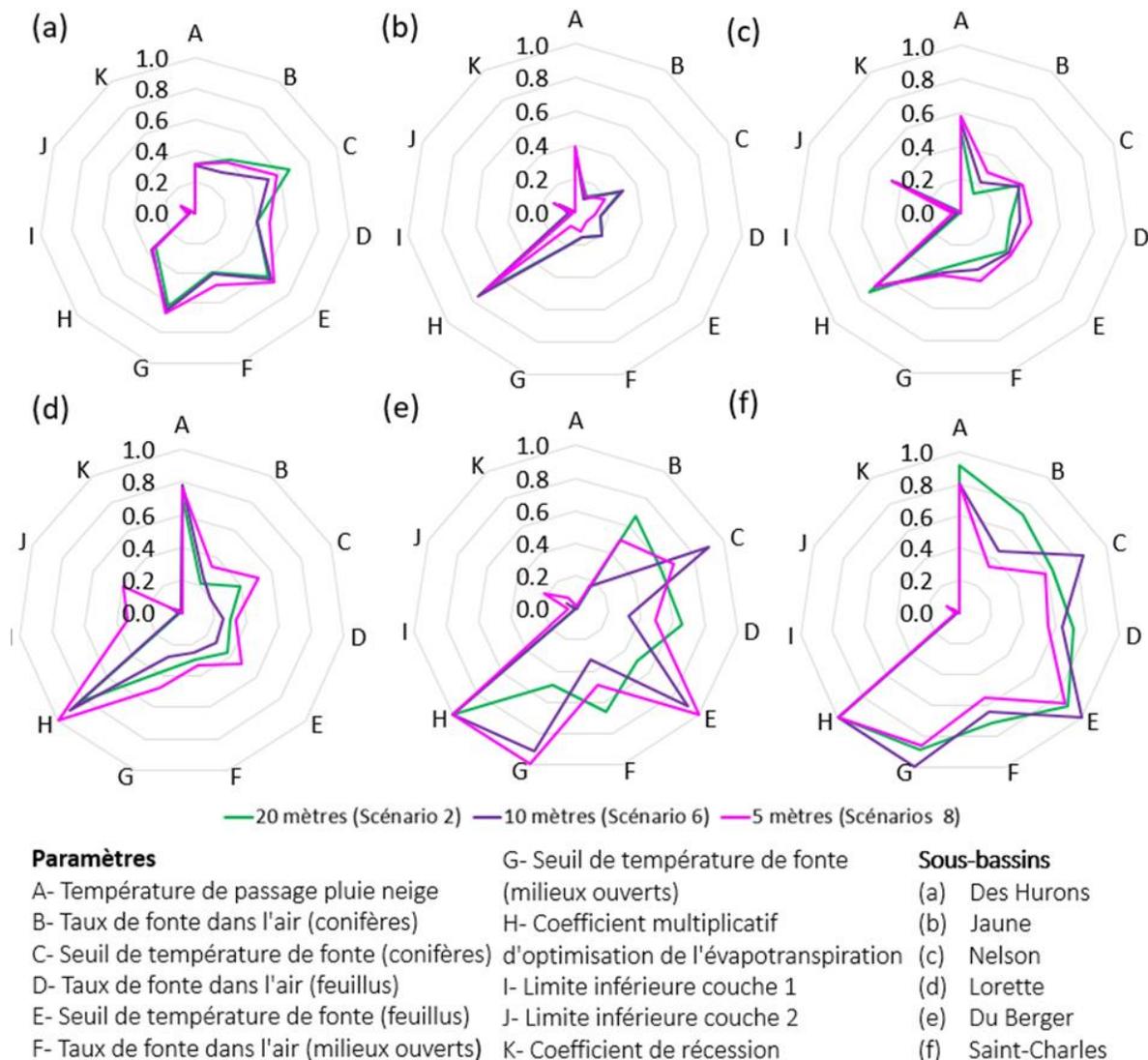


Figure 4.4 Diagrammes en toile d'araignée des 11 paramètres transformés utilisés pour le calage automatique de HYDROTEL pour chaque sous-bassin des scénarios 2, 6 et 8.

Tel que présenté au Chapitre 2, plusieurs études démontrent les effets de la résolution spatiale du MNA dans les modèles hydrologiques. Selon Ndomba et Birhanu (2008), l'utilisation de résolutions spatiales plus fines n'améliore pas nécessairement les performances des modèles hydrologiques. Cependant, l'étude récente de Nazari-Sharabian *et al.* (2019), déjà mentionnée précédemment à la section 2.2, montre que les différentes résolutions spatiales peuvent avoir des effets positifs sur le régime d'écoulement d'un bassin hydrographique. Ces auteurs ont vérifié qu'à mesure que la résolution spatiale diminuait la sensibilité du modèle aux paramètres comme, le seuil de profondeur de l'eau dans l'aquifère peu profond, la hauteur initiale des eaux souterraines, la conductivité hydraulique effective dans le canal principal, augmentait, tandis que

pour des paramètres tels que, la capacité en eau disponible de la couche de sol, la teneur initiale en eau de la neige, parmi d'autres, elle diminuait (la sensibilité).

Dans notre étude, les MNA de différentes résolutions spatiales génèrent des valeurs différentes des paramètres dans la plateforme HYDROTEL. De plus, grâce au calage automatique, il a été possible de constater que parmi les 11 paramètres calés automatiquement, trois d'entre eux ont démontré une plus grande variation: les taux de fonte conifère, feuillu et ouvert ont présenté les plus grandes variations pour les six scénarios étudiés. Si on analyse dans le contexte des différences relatives, les résultats deviennent hétérogènes et une conclusion générale pour tous ces scénarios peut être dégagée à partir du Tableau 4.6 suivant.

Tableau 4.6 Comparaisons des différences relatives des paramètres (PA) utilisés dans chaque sous-bassin pour les scénarios (2, 6, 8)

PA	Des Hurons		Jaune		Nelson		Lorette		Du Berger		St. Charles	
	(2 et 6)	(6 et 8)	(2 et 6)	(6 et 8)	(2 et 6)	(6 et 8)	(2 et 6)	(6 et 8)	(2 et 6)	(6 et 8)	(2 et 6)	(6 et 8)
(a)	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	(-)	↑	↓	↑
(b)	↓	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↓
(c)	↑	↑	(-)	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓
(d)	↑	↑	(-)	↓	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓
(e)	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↓
(f)	↑	↑	(-)	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↓
(g)	↑	↑	(-)	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↓
(h)	↑	↓	↑	↓	↓	(-)	↑	↑	(-)	(-)	(-)	(-)
(i)	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑
(j)	↑	↑	↓	↑	↑	(-)	↓	↑	↑	↑	↑	↑
(k)	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↓

La direction des flèches représente les diminutions ou les augmentations des valeurs des paramètres des scénarios à partir de résolutions plus grossières

Les résultats obtenus illustrent que la majorité des onze paramètres calés dans le modèle ont eu des augmentations relatives à mesure que la résolution du MNA augmente. Plus spécifiquement cette tendance s'est manifestée pour les paramètres (PA): température de passage pluie-neige (a), les trois paramètres de taux de fonte dans l'air (b, c, d), les deux paramètres de seuil de température de fonte feuillu et ouvert (f, g), les épaisseurs de la couche Z₁ et Z₂ (i, j) (voir la section 4.1.1). Seulement le coefficient de récession (k) et le seuil de température de fonte conifères (e) n'ont pas eu une tendance d'augmentation ni de diminution. Ce comportement suggère un phénomène de compensation afin de reproduire les débits observés, car tel

qu'introduit à la section suivante (4.1.4) les valeurs de KGE ne changent pas selon la résolution spatiale. On pourrait avancer certains liens entre les facteurs topographiques et les épaisseurs des couches Z_1 et Z_2 (ex. : la pente des UHRH étant plus élevée devant être compensée par un stockage plus important dans les versants afin de reproduire un apport au tronçon équivalent), mais bien que cela serait vraisemblable, il demeure très difficile de le prouver sans équivoque. Somme toute, comme l'hydrogramme annuel est fortement influencé par la fonte printanière dans ce bassin, il est tout à fait vraisemblable que ce soit les paramètres qui la gouvernent qui demeurent les plus influents et donc les plus susceptibles d'être ajustés automatiquement pour reproduire la chronique de débits peu importe la résolution spatiale.

4.1.4 Performance du modèle

Cette section présente les résultats des indicateurs de performance de chacun des trois scénarios, en utilisant la période complète de la chronique historique de débits observés et des données météorologiques disponibles sur chaque sous-bassin. Les résultats associés aux scénarios 2, 6, 8 sans la présence du système de drainage urbain seront présentés au Tableau 4.7. Les périodes de simulation utilisées pour chaque sous-bassin ont été présentées à la section 3.6. Il est important de souligner que les trois scénarios ont les mêmes cartes de type de sol (A) et d'occupation du sol. Pour plus d'informations au sujet des caractéristiques de chaque scénario se référer à la section 3.4.

Afin de comparer les résultats des indicateurs de performance entre les différents scénarios sans SDU, le Tableau 4.7 ci-dessous montre les différences relatives entre le scénario 2 à une résolution spatiale de 20 mètres et le scénario 8 à une résolution spatiale de 5 mètres. Selon les résultats: (i) les simulations montrent un bon accord entre les débits observés et simulés pour les sous-bassins Nelson, Lorette et Saint-Charles; (ii) l'efficacité du modèle n'a pas augmentée lors de l'utilisation des résolutions spatiales plus précises sans le SDU. La valeur faible de KGE obtenue pour le scénario 8 du sous-bassin Du Berger peut être attribuée au manque important de données dans la chronique des débits observés (voir début du Chapitre 4).

Il est possible de noter que l'efficacité du modèle diminue très légèrement lors de l'utilisation des résolutions spatiales plus fines pour les sous-bassins Nelson, Lorette et Du Berger. Cette différence de changement est illustrée par les valeurs de KGE. Au contraire, une très légère augmentation de 2,5 et 1,5% est observée pour ces indicateurs pour les sous-bassins Des Hurons et St-Charles. À l'exception du sous-bassin Saint-Charles, les faibles valeurs de RMSE illustrent un bon ajustement du modèle pour les chroniques de débits de chaque sous-bassin.

Des faibles valeurs négatives de P-BIAS pour la rivière Des Hurons, Jaune et Lorette montrent une sous-estimation du modèle aux débits observés, contrairement des rivières Du Berger et Saint-Charles où il y a des surestimations élevées. En appliquant le test statistique non paramétrique de (Wilcoxon, 1945) avec un seuil de signification de 5%, comme déjà fait dans l'étude de Blanchette *et al.* (2019), les différences dans les valeurs de P-BIAS entre le scénario 8 à 20 mètres par rapport au scénario 2 à 5 mètres pour les sous-bassins Des Hurons, Jaune, Lorette et Saint-Charles ne sont pas considérés significatives.

Tableau 4.7 Performances des modèles pour la période entière des scénario 2 (20 mètres), scénario 6 (10 mètres) et scénario 8 (5 mètres) sans le système de drainage urbain.

SC	Sous-Bassins	RS	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)
2		20 m	0,80	-4,0	2,0
6	Des Hurons	10 m	0,82	-2,0	1,9
8		5 m	0,82	-2,0	1,9
2		20 m	0,67	-5,0	1,8
6	Jaune	10 m	0,66	-5,0	1,9
8		5 m	0,67	-3,0	1,9
2		20 m	0,88	5,0	0,8
6	Nelson	10 m	0,86	6,0	0,9
8		5 m	0,85	6,0	0,9
2		20 m	0,87	-2,0	1,2
6	Lorette	10 m	0,87	-4,0	1,3
8		5 m	0,85	0,0	1,3
2		20 m	0,66	25,0	1,3
6	Du Berger	10 m	0,66	30,0	1,5
8		5 m	0,62	39,0	1,6
2		20 m	0,65	30,0	7,3
6	Saint-Charles	10 m	0,66	30,0	7,3
8		5 m	0,66	28,0	7,0

Les résultats de chaque scénario ont été soumis à une analyse graphique en comparant le comportement des chroniques de débits simulées et observées de chaque sous-bassin. Les interprétations sont basées sur l'hypothèse que tous les paramètres sont identifiables. Afin de faciliter les observations et les comparaisons, des hydrogrammes de débits moyens journaliers ont été générés. La Figure 4.5 suivante illustre d'une manière générale les différences observées.

On remarque que pour les sous-bassins Des Hurons, Nelson et Lorette, le modèle représente bien les débits. Le Tableau 4.7 confirme cette bonne performance pour ces scénarios. Le sous-bassin Du Berger, comme déjà beaucoup discuté dans cette étude, démontre des différences significatives spécialement au printemps. Les surestimations des trois scénarios dans les quatre saisons de l'année pour le sous-bassin versant Saint-Charles sont expliquées initialement par le prélèvement de 2 m³/s à la prise d'eau Château d'Eau qui n'a pas été pris en compte dans le modèle HYDROTEL.

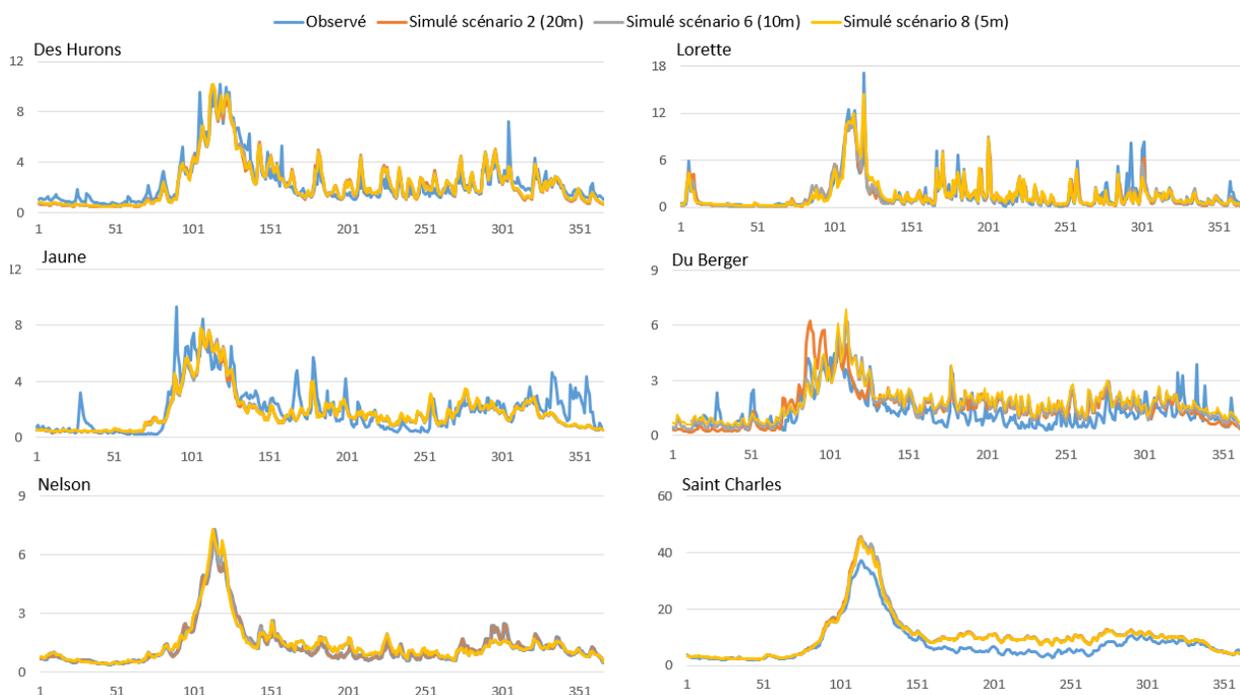


Figure 4.5 Hydrogrammes de débits moyens journaliers de chaque sous-bassin des scénarios 2, 6, 8 sans SDU.

Une analyse des indicateurs de performance RMSE et P-BIAS pour ce sous-bassin selon l'hypothèse d'identifiabilité des paramètres (non dépendance entre les paramètres), démontre que le scénario à 5 m de résolution spatiale se rapproche mieux des débits observés au printemps, en été et à l'automne. Cela peut être bien observé dans les débits de pointe de chacune de ces saisons. Les différences trouvées entre chaque scénario peuvent être expliquées par les paramètres d'entrée utilisés dans les simulations d'HYDROTEL (voir l'Annexe 2 et l'Annexe 3). Pour le scénario 8, les paramètres de taux de fonte (conifère, feuillu, ouvert), seuil de température de fonte (conifère, feuillu, ouvert), température de passage pluie neige et le coefficient de récession étaient à leur plus faibles valeurs en comparant avec les scénarios 2 et 6. Une faible valeur de taux de fonte peut impliquer une fonte plus lente sur le territoire et par conséquent un volume d'eau plus faible dans les rivières. Cela peut être confirmé par exemple

pour le sous-bassin Jaune (Figure 4.6), dans les saisons du printemps, de l'été et de l'automne par les hydrogrammes du scénario 8.

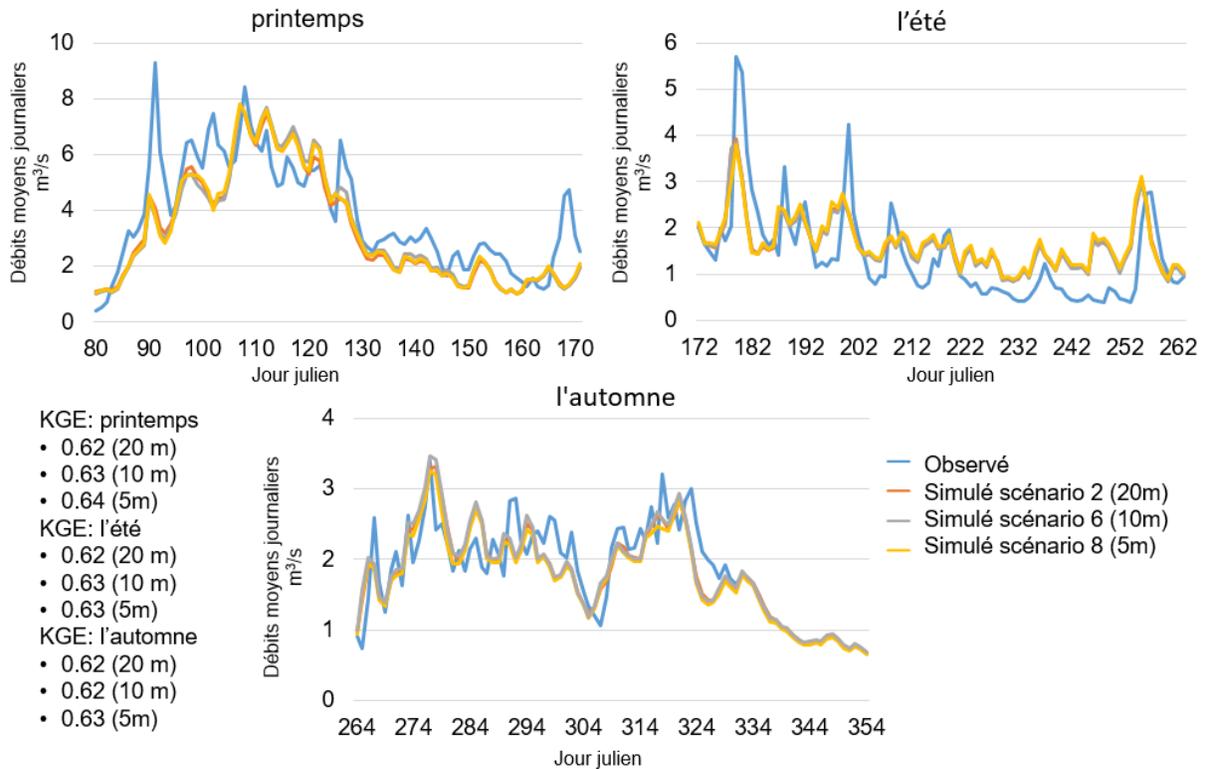


Figure 4.6 Hydrogrammes de débits moyens journaliers saisonnier pour le sous-bassin Jaune.

Le seuil de température de fonte a une grande importance entre les transitions de l'hiver au printemps. Les faibles valeurs impliquent un début de fonte du couvert nival plus tôt sur le territoire, en ayant comme conséquence une augmentation précoce du volume d'eau dans les rivières. Les faibles variations absolues (autour de 15%) trouvées dans ce paramètre entre les trois scénarios peuvent expliquer le comportement similaire des courbes de débits simulés dans l'hydrogramme annuel. La température de passage pluie neige se réfère principalement aux périodes automnale, printanière et hivernale. À noter que le scénario 8 est caractérisé par des valeurs de RSME et P-BIAS les plus élevés ainsi que les débits simulés les plus élevés. Une faible valeur de température passage pluie neige implique une plus faible proportion de précipitation sous forme de neige pour un même intervalle de températures minimum at maximum au début de la saison. Cette proportionnalité influence le volume d'eau dans les rivières. Les différences entre débits simulés de chaque scénario ne sont pas affectées par le coefficient d'évapotranspiration parce que les trois modèles ont présenté des valeurs égales à 1. Les épaisseurs des couches Z_1 et Z_2 (les deux premières couches de sol existant dans le modèle)

sont aussi des facteurs très importants à prendre en compte quand on parle de débit en rivières. Ces deux couches contrôlent l'infiltration et la redistribution verticale subséquente de l'eau infiltrée dans le sol. Plus précisément, la deuxième couche est responsable de la production des écoulements retardés et la troisième contrôle le débit de base ou la hauteur de la nappe, principalement quand le sol est près de la saturation. En comparant les valeurs Z_1 et Z_2 de chaque scénario, on observe que le scénario 8 a présenté des valeurs plus élevées, autour de 57% et 77% supérieures à celles des scénarios 2 et 6 respectivement. En conséquence la courbe de débit simulé dans les périodes de printemps, de l'été et de l'automne pour ce scénario est restée plus basse que les autres. Le coefficient de récession (m/h) affecte la sortie de l'eau après la pointe de débits sur l'hydrogramme. C'est-à-dire l'écoulement après le point d'inflexion de la courbe de récession d'un hydrogramme. Une valeur de coefficient faible implique une décroissance plus lente des débits dans les rivières. Ceci peut se refléter tout au long de l'année sur l'hydrogramme du scénario 8, où l'on retrouve les débits les plus faibles et les plus proches des débits observés.

Une autre forme de représentation de la distribution des débits moyens journaliers très utilisée en hydrologie est les courbes des débits classés qui permettent d'associer une fréquence (ici au non dépassement) à chaque valeur de débit. Les analyses de ces courbes ont été faites afin de comparer les débits simulés et observés à chaque résolution spatiale. Une vision générale a démontré que les courbes des scénarios simulés sont similaires aux débits observés pour les trois scénarios (2, 6, 8) (Annexe 4).

La Figure 4.7 montre les courbes de débits classés pour les sous-bassins Des Hurons et Jaune, relativement peu urbanisés. Les graphiques illustrent que l'utilisation du MNA à une résolution spatiale plus fine a produit des courbes de débits plus proches des données observées. Ces résultats sont aussi confirmés par les indicateurs de performance du Tableau 4.7. Des comportements hétérogènes ont été trouvés pour les sous-bassins Nelson (Annexe 5), Du Berger (Annexe 6) et Lorette (Annexe 7).

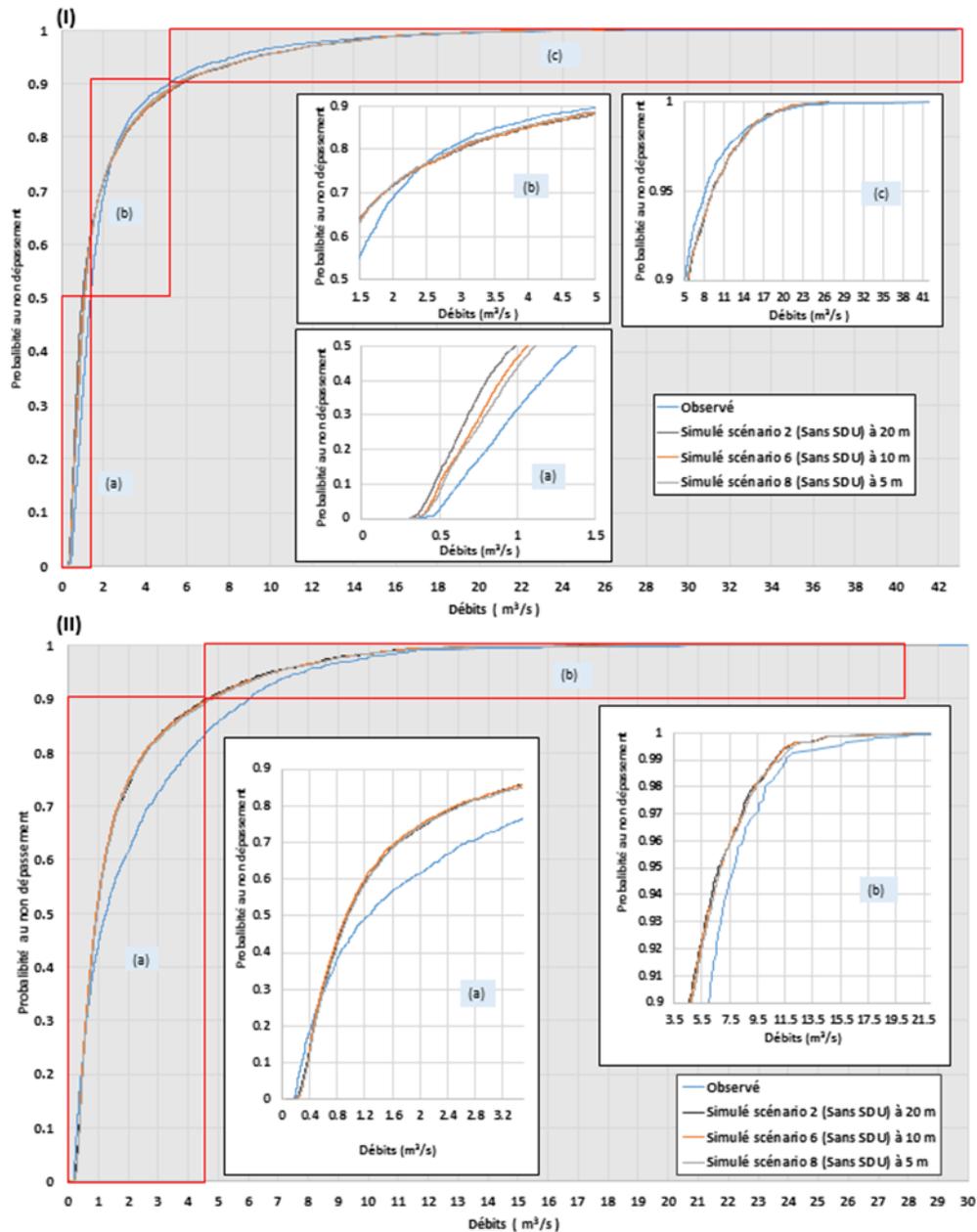


Figure 4.7 Débits classés des sous-bassins Des Hurons (I) et Jaune (II) en comparant les scénarios à différentes échelles spatiales.

4.1.5 Sensibilité de la modélisation à la résolution du MNA

Afin de répondre aux questions sur les impacts d'un même jeu de paramètres calés avec l'algorithme DDS en variant seulement les résolutions spatiales, on présente brièvement les résultats des indicateurs de performance de chaque scénario produits par HYDROTEL. Le jeu des paramètres optimal trouvé par la calage automatique dans chacun des sous-bassins du

scénario 6 avec le MNA à 10 mètres de résolution spatiale a été retenu et utilisé pour simuler le scénario 2, à 20 mètres, et le scénario 8, à 5 mètres de résolution spatiale (Section 3.9)

Les résultats des indicateurs de performance du Tableau 4.8 suivant, montrent qu'en utilisant les mêmes jeux de paramètres à différentes résolutions spatiales, la performance du modèle HYDROTEL pour chaque scénario n'a pas varié de manière significative.

Tableau 4.8 Résultats des indicateurs de performance en conservant les paramètres à 10 m et en les utilisant avec HYDROTEL pour la simulation des scénarios sans le SDU.

SC	Sous-Bassins	RS	KGE	P-Bias (%)	RMSE (m ³ /s)
2	Des Hurons	20 m	0,80	-5,0	2,0
6		10 m	0,82	-2,0	1,9
8		5 m	0,82	-2,0	1,9
2	Jaune	20 m	0,66	-7,0	1,8
6		10 m	0,66	-5,0	1,9
8		5 m	0,67	-3,0	1,9
2	Nelson	20 m	0,86	8,0	0,9
6		10 m	0,86	6,0	0,9
8		5 m	0,87	7,0	0,9
2	Lorette	20 m	0,87	-5,0	1,2
6		10 m	0,87	-4,0	1,3
8		5 m	0,86	-5,0	1,5
2	Du Berger	20 m	0,62	23,0	1,3
6		10 m	0,66	30,0	1,5
8		5 m	0,60	25,0	1,3
2	St. Charles	20 m	0,65	30,0	7,3
6		10 m	0,66	30,0	7,3
8		5 m	0,61	34,0	7,5

Les constats de cet objectif ont apporté des éléments de réponse à plusieurs questions pertinentes sur l'utilisation de MNA de différentes résolutions spatiales dans le modèle HYDROTEL. À partir des analyses et comparaisons réalisées, on a pu observer que les impacts des données à haute résolution spatiale dans la plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL se traduisent principalement sur les caractéristiques physiographiques des sous-bassins et sur leur découpage en UHRH. Ces dernières influencent le comportement des débits ainsi que les valeurs des paramètres de calage, sans toutefois affecter substantiellement la performance du modèle hydrologique. Ces résultats viennent confirmer certaines conclusions apportées par l'étude récente de Nazari-Sharabian et al. (2019) avec le

modèle Soil and Water Assessment Tool (SWAT) et aussi, par les études avec le modèle TOPMODEL (section 2.2).

4.2 Impact hydrologique du système de drainage urbain

Pour évaluer l'impact du système de drainage urbain (SDU) sur la modélisation du bassin versant de la rivière Saint-Charles à Québec, on a utilisé les trois scénarios (2, 6, 8) sans le SDU de la section 4.1 ainsi que les scénarios (1, 5, 7) avec la présence du SDU. Il est important de noter que les résultats ont été comparés en conservant la même résolution spatiale et en ne modifiant que le réseau hydrographique en présence ou en absence du SDU. Cette section présente premièrement, les résultats des analyses des attributs topographiques, deuxièmement des comparaisons des valeurs des indicateurs de performance calculés pour chaque sous-bassin versant pour les périodes de calage et de validation en présence ou absence du SDU. Troisièmement, les scénarios ont été évalués avec les valeurs des paramètres utilisées pour chaque sous-bassin. Les modèles ont été évalués en utilisant la période complète des données hydrométéorologiques de chaque sous-bassin; le tout complété par des analyses graphiques afin de comprendre le comportement des débits. Il est important de noter que les résultats obtenus à partir des scénarios (1, 5, 7) des sous-bassins Des Hurons et de Jaune ne sont pas présentés, car aucun réseau de drainage urbain n'a été ajouté dans ces territoires. Enfin, cette section présente une analyse des valeurs des paramètres, des hydrogrammes ainsi qu'une analyse de sensibilité de l'effet du SDU.

4.2.1 Analyse des attributs topographiques

Une analyse détaillée des attributs topographiques (pente, superficie et élévation) et des UHRH, en absence du SDU a déjà été faite à l'objectif 1. Ces résultats sont comparés aux scénarios avec le SDU à la même échelle spatiale. On parlera alors de paires de scénarios. Dans ce contexte, la pente et les élévations maximales et minimales sont égales pour les deux types de réseau hydrographique, donc elles ne seront pas discutées ici. Cette section se concentre uniquement sur le changement des valeurs de superficie des sous-bassins et des UHRH en présence ou absence du SDU. Le Tableau 4.9 suivant illustre les principales caractéristiques de la superficie de chaque sous-bassin pour les paires des scénarios. Tel que mentionné plus tôt, pour les sous-bassins Des Hurons et Jaune, les scénarios ne possèdent pas de SDU, donc ils ne seront pas discutés.

Tableau 4.9 Superficie totale (km²) de chaque sous-bassin en présence (+) ou absence (-) du SDU.

Sous-bassins	20 m (1 et 2)			10 m (5 et 6)			5 m (7 et 8)		
	+ SDU	- SDU	Diff Relative	+ SDU	- SDU	Diff Relative	+ SDU	- SDU	Diff Relative
Nelson	69,4	70,7	-1,7%	67,6	67,8	-0,3%	67,7	65,3	3,8%
Lorette	71,0	63,4	12,1%	70,6	68,5	3,0%	70,2	72,1	-2,7%
Du Berger	64,4	58,7	9,6%	64,1	60,7	5,6%	64,3	63,1	2,0%
St. Charles	114,7	126,8	-9,5%	117,8	122,9	-4,2%	117,8	119,4	-1,4%
Total			10,4%			4,0%			1,5%

***Exemple : Différence relative= 100 x ((Valeur (+ SDU) – Valeur (- SDU)) / Valeur (- SDU))**

Tel qu'indiqué au Tableau 4.9, la somme des différences relatives diminue au fur et à mesure que la résolution spatiale devient plus fine. Ces résultats confirment que la présence du SDU influence la taille de la superficie de chaque sous-bassin lors de la délimitation des UHRH qui dépend également du réseau hydrographique, c'est-à-dire de la combinaison du SDU et des cours d'eau.

Plus spécifiquement on a observé une augmentation de 12,1% et 9,6% dans les valeurs de superficie des sous-bassins Lorette et Du Berger en présence du SDU avec un MNA de 20 m. Les sous-bassins Saint-Charles et Nelson ont eu des diminutions relatives de superficie de 9,5% et 1,7%, respectivement. Pour les comparaisons entre les scénarios 5 et 6 (MNA de 10 m), les sous-bassins Lorette et Du Berger sont ceux qui ont présenté des différences relatives positives autour de 3% à 6% et ceux de la St-Charles et la Nelson des différences relatives négatives de -4,2% et 0,3%, respectivement. En présence d'un MNA de 5 m, les sous-bassins Nelson et Du Berger ont montré de petites augmentations pendant que les sous-bassins Lorette et Saint-Charles ont subi des différences relatives négatives de -2,7% et -1,4%. La diminution ou l'augmentation de la superficie peut influencer le calcul du volume d'eau provenant des précipitations dans le modèle hydrologique HYDROTEL. En conséquence, cette superficie pourrait influencer localement les débits dans les cours d'eau des sous-bassins.

Une analyse détaillée de la distribution spatiale des processus hydrologiques réalisés au niveau des UHRH de la plateforme de modélisation HYDROTEL montre que la quantité totale de ces unités dans le bassin versant augmente significativement et proportionnellement à chaque résolution spatiale. C'est à partir du MNA que PHYSITEL détermine le chemin d'écoulement sur le territoire, les limites du bassin versant, le réseau hydrographique matriciel, et les UHRHs. La structure spatiale des écoulements est déterminée par le réseau hydrographique vectoriel imposé sur le modèle numérique d'altitude, obtenu par correction du réseau matriciel initial. La structure

et les directions d'écoulement ainsi définies, la maille correspondant à l'exutoire du bassin versant est identifiée et ensuite PHYSITEL identifie les mailles voisines dont les écoulements se dirigent vers la maille exutoire pour aboutir à l'identification de toutes les autres mailles qui font partie du bassin versant. Une fois le bassin est identifié, le réseau hydrographique est alors divisé en tronçons (petits cours d'eau), correspondant à des sections linéaires du réseau hydrographique définissant un sous-bassin versant. Il est obtenu ainsi les unités relativement homogènes (UHRH) qui correspondent à des versants du cours d'eau. Le Tableau 4.10 suivant illustre les résultats obtenus au niveau des UHRH pour les paires de scénarios à différentes résolutions spatiales.

Tableau 4.10 Nombre d'UHRH en présence (+) ou absence (-) de SDU.

Sous-bassins	20 m (1 et 2)			10 m (5 et 6)			5 m (7 et 8)		
	+ SDU	- SDU	Diff relative	+ SDU	- SDU	Diff relative	+ SDU	- SDU	Diff relative
Nelson	432	267	62%	440	286	54%	445	282	58%
Lorette	1212	179	577%	1277	180	609%	1286	182	607%
Du Berger	1182	144	721%	1242	152	717%	1298	166	682%
St. Charles	1659	356	366%	1660	358	364%	1665	360	363%
Total	5266	1725		5434	1791		5527	1829	

***Exemple : Différence relative= 100 x ((Valeur (Avec SDU) – Valeur (Sans SDU) / Valeur (Sans SDU))**

Selon le Tableau 4.10, le MNA à 5 m de résolution spatiale induit une quantité d'UHRH supérieure aux autres résolutions spatiales. En comparant les scénarios 1 et 2, on a une augmentation relative, variant de 62% jusqu'à 721%, en présence de SDU. Pour les comparaisons effectuées entre les scénarios 5 et 6, une augmentation relative de 54% jusqu'à 717% peut être constatée lorsqu'on ajoute le SDU.

Ces augmentations sont produites lors de la création des UHRH avec le logiciel PHYSITEL. Ainsi, plus le nombre de canalisations du réseau pluvial est élevé dans le modèle, plus le nombre d'UHRH sera aussi élevé. Tel que nous l'avons déjà mentionné, les UHRHs sont délimitées à partir des données d'élévation, de pente et d'orientation et des données sur le réseau hydrographique vectoriel extrait du MNA et ensuite utilisées pour déterminer les délimitations de chaque unité hydrologique. La Figure 4.8 ci-dessous illustre les délimitations de chaque UHRH du sous-bassin Du Berger à 5 m de résolution spatiale avec et sans SDU.

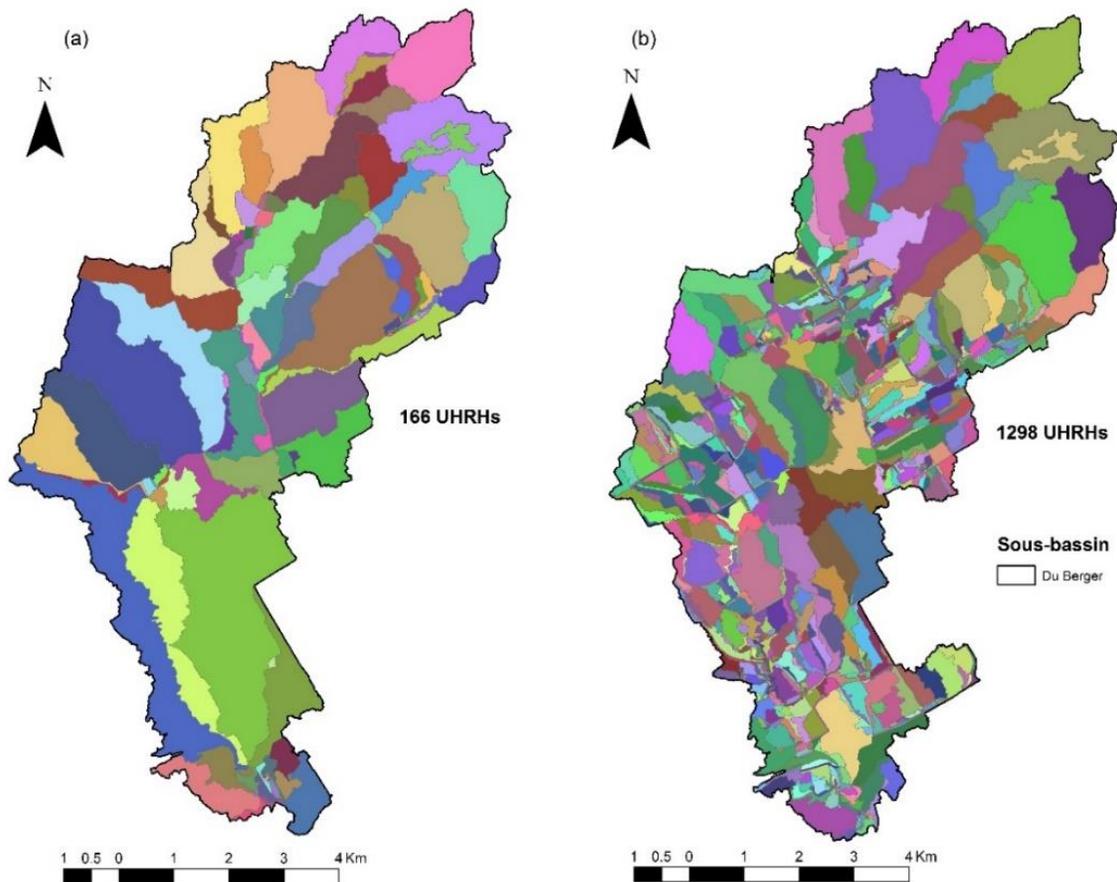


Figure 4.8 Comparaison des délimitations des UHRHs par le logiciel PHYSITEL à une échelle spatiale de 5 m pour le scénario 8 (a) absence de SDU et le scénario 7(b) présence de SDU.

Les différences de délimitation et de nombre d'UHRH présentes entre les cartes ci-dessus sont associées à l'ajout du SDU. Ainsi, au fur et à mesure que l'on ajoute plus de canalisations dans le réseau, plus grand sera le nombre d'UHRH. La combinaison des données LiDAR représentées dans le MNA à 5 m et système pluvial de drainage urbain a produit une restructuration substantielle des UHRH.

4.2.2 Calage et Validation

Les analyses des valeurs des indicateurs de performance de chaque scénario ont été réalisées afin de mettre en évidence l'effet du SDU sur la capacité du modèle hydrologique HYDROTEL à reproduire les processus hydrologiques dans le bassin de la Saint-Charles. Les résultats montrent que l'ajout du système améliore légèrement la performance. Le changement le plus significatif de l'amélioration du modèle a été pour le sous-bassin Du Berger, en utilisant le MNA à 5 m de résolution spatiale. Ce bassin versant ne présente que 34.37% des données de débit

enregistrées sur l'ensemble de sa série historique et ses résultats démontrent que la présence du SDU permet au modèle de mieux reproduire les processus d'écoulement sur le territoire. Le Tableau 4.11 montre les résultats de calage et de validation en comparant les six scénarios utilisés pour évaluer la présence du SDU, selon la méthodologie de calage et de validation expliquée dans la section 3.6.

De manière générale, les résultats de calage et de validation pour chaque sous-bassin fournissent un bon ajustement entre les débits simulés et observés pour trois des quatre sous-bassins de cette comparaison. Les valeurs les plus faibles de KGE ont été trouvées pour les sous-bassins Du Berger à 20 et 10 m de résolution spatiale en présence du SDU. Pour la période de calage, il a été possible de noter que la variation des valeurs de KGE, P-BIAS et RMSE sont très petites. Seulement le sous-bassin Du Berger à 5 m avec le SDU a démontré des améliorations significatives de la performance du modèle. Les sous-bassins Nelson, Lorette et Saint-Charles ont présenté des valeurs de KGE supérieures à 0,75.

Pour la période de validation, selon l'interprétation suggérée par Kling et al. (2012), les résultats du critère KGE sont considérés comme bons ($KGE \geq 0,75$) pour tous les scénarios du sous-bassin versant Nelson et aussi le scénario 7 avec le SDU du sous-bassin versant Du Berger. D'autre part, pour le sous-bassin Saint-Charles et les scénarios 1, 2, 5 et 8 du sous-bassin Du Berger, les résultats sont considérés intermédiaires ($0,75 > KGE \geq 0,5$). Il faut se rappeler que pour le sous-bassin Lorette aucune validation n'a été effectuée, car les débits issus de l'opération d'environ trois ans de cette station n'ont été utilisés que pour le calage du modèle.

Tableau 4.11 Performance des modèles dans les périodes de calage et de validation avec (+) et sans le SDU.

SC	Sous-Bassins	RS	Calage			Validation						
			KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)				
1+	Nelson	20 m	0,91	0,0	0,8	0,85	8,0	0,8				
2			0,90	1,0	0,8	0,85	8,0	0,8				
5+		10 m	0,88	2,0	0,9	0,84	11,0	0,9				
6			0,89	2,0	0,9	0,83	10,0	0,9				
7*		5 m	0,88	0,0	0,9	0,82	8,0	0,9				
8			0,88	2,0	0,9	0,82	10,0	1,0				
1+		Lorette	20 m	0,87	-4,0	1,2	N.A.					
2				0,87	-2,0	1,2						
5+	10 m		0,87	-4,0	1,2							
6			0,87	-4,0	1,3							
7+	5 m		0,87	-4,0	1,3							
8			0,85	0,0	1,3							
1+	Du Berger		20 m	0,50	68,0	1,8				0,72	36,0	1,3
2				0,69	44,0	1,5				0,57	10,0	1,1
5+		10 m	0,51	62,0	1,9	0,66	34,0	1,4				
6			0,61	49,0	1,8	0,68	14,0	1,2				
7+		5 m	0,63	36,0	1,5	0,76	3,0	1,0				
8			0,54	60,0	1,9	0,70	22,0	1,3				
1+		Saint-Charles	20 m	0,74	17,0	5,2	0,64	31,0	7,0			
2				0,75	18,0	5,5	0,63	33,0	7,6			
5+	10 m		0,75	17,0	5,4	0,64	31,0	7,4				
6			0,75	18,0	5,5	0,64	32,0	7,5				
7+	5 m		0,75	17,0	5,6	0,64	31,0	7,8				
8			0,75	17,0	5,4	0,64	31,0	7,3				

SC : Scénarios; RS : Résolution Spatiale

4.2.3 Analyse de paramètres

Cette section présente les résultats des comparaisons faites entre les paires de simulations en présence et absence du SDU pour les trois échelles spatiales de chaque sous-bassin. Les valeurs de chaque paramètre et les comparaisons entre elles avec les différences relatives et absolues se trouvent à l'Annexe 8 et à l'Annexe 9, respectivement. La Figure 4.9 illustre les comportements

des 11 paramètres calés automatiquement avec DDS en comparant les paires de scénarios avec et sans SDU.

En ce qui concerne les intervalles des paramètres de tous les sous-bassins, les diagrammes en toile d'araignée et les analyses comparatives démontrent que parmi les 11 paramètres calés automatiquement, trois ont montré une plus grande variation à la présence ou absence du SDU, c'est-à-dire: les taux de fonte conifère, feuillu et ouvert. Ces trois paramètres ont varié significativement avec la résolution spatiale, comme déjà discuté à la section 4.1. En comparant les scénarios à travers des analyses des différences relatives, les résultats ont démontré qu'à chaque résolution spatiale, les valeurs des paramètres ont eu une tendance générale à augmenter leurs valeurs en présence du SDU.

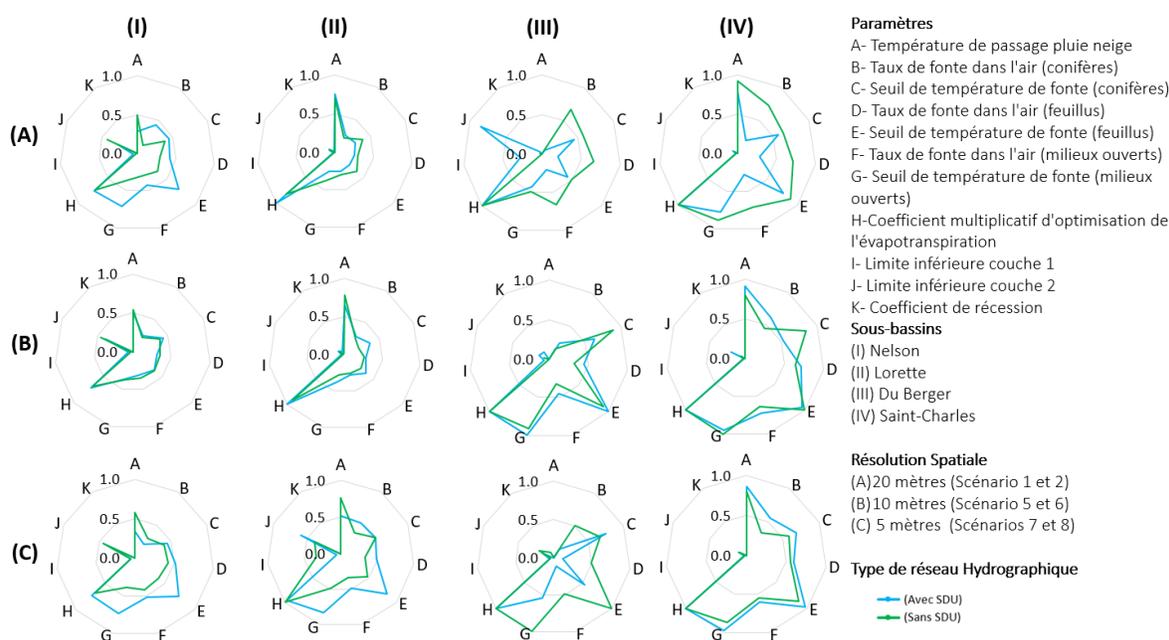


Figure 4.9 Diagrammes en toile d'araignée des 11 paramètres transformés utilisés pour le calage automatique d'HYDROTEL pour chaque sous-bassin des scénarios 1, 5 et 7

Afin de mieux comprendre la valeur ajoutée du SDU à la performance du modèle HYDROTEL, les différences relatives, entre les paires de scénarios ont été comparées au Tableau 4.12. Il est important de noter que les flèches servent à interpréter les valeurs positives ou négatives résultant des différences relatives entre les scénarios avec et sans SDU. La flèche dirigée vers le haut indique une augmentation relative positive des valeurs de paramètres, alors qu'une flèche dirigée vers le bas représente une diminution relative négative des valeurs de paramètres utilisés dans le modèle.

Tableau 4.12 Comparaisons des différences relatives des paramètres utilisés dans chaque sous-bassin

PA	20 mètres (1 et 2)				10 mètres (5 et 6)				5 mètres (7 et 8)			
	Nelson	Lorette	Du Berger	Saint-Charles	Nelson	Lorette	Du Berger	Saint-Charles	Nelson	Lorette	Du Berger	Saint-Charles
(a)	↓	↑	(-)	↓	↓	↓	(-)	↑	↓	↓	↓	↑
(b)	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑
(c)	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑
(d)	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑
(e)	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↑
(f)	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑
(g)	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↓	↑
(h)	↑	↑	(-)	(-)	↑	↑	(-)	(-)	↑	↓	(-)	(-)
(i)	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓
(j)	↓	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑
(k)	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑

Les directions des flèches représentent les diminutions ou les augmentations des valeurs des paramètres des scénarios avec le SDU (1, 5, 7) par rapport aux scénarios sans le SDU (2, 6, 8).

Les résultats illustrent que seulement le paramètre de température de passage pluie-neige (a) a eu une tendance à la diminution dans tous les sous-bassins pour les trois résolutions spatiales (sept flèches pointant vers le bas contre trois flèches vers le haut). Cependant, les trois paramètres de taux de fonte (b, c, d), le seuil de température de fonte conifères (e), les épaisseurs de la couche 1 (i) et 2 (j) et le coefficient de récession (k) ont également augmenté. En plus, les deux paramètres de seuil de température de fonte feuillus (f) et milieux ouverts (g), et le coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration (h), n'ont pas eu une tendance d'augmentation ni de diminution.

En analysant, par exemple, les jeux de paramètres trouvés pour les sous-bassins Du Berger, à l'aide des diagrammes en toile d'araignée à 20 mètres et à 5 mètres, on remarque que les trois paramètres de taux de fonte sont ceux qui varient le plus et qui influencent particulièrement les débits de crue au printemps. En observant également les hydrogrammes de débits moyens journaliers qui seront introduits à la section 4.2.4, pour toute la période, on remarque que quand le SDU est absent, les valeurs de paramètres de taux fonte sont plus élevés pour que le modèle fasse fondre la neige plus vite et évacue de l'eau plus rapidement. Au contraire, avec le SDU, le modèle est capable d'évacuer l'eau moins rapidement en raison des faibles valeurs des paramètres de taux de fonte trouvées avec le calage automatique. Cela, associé à la résolution spatiale plus fine, permet au modèle HYDROTEL de bien reproduire le processus d'écoulement

d'eau dans le bassin versant. On a remarqué également qu'à chaque fois que le SDU est utilisé, pour les trois résolutions spatiales, les valeurs des paramètres de taux de fonte diminuent, en raison de la densité de canalisations de l'eau pluviale présente dans le réseau hydrographique.

La présence du SDU dans la modélisation HYDROTEL influence les valeurs des jeux de paramètres trouvés lors du calage automatique avec DDS. En plus, les résultats montrent que la présence du système en plusieurs résolutions spatiales peut avoir des effets positifs ou négatifs sur l'adéquation entre les régimes d'écoulement du bassin versant semi-urbanisé observé et modélisé. De manière générale ces effets sont plus positifs à mesure que l'on combine le SDU avec une résolution spatiale plus fine. Les jeux de paramètres trouvés selon ces combinaisons permettent d'explorer et de comprendre les effets sur la plateforme de modélisation HYDROTEL. Des futurs travaux sur d'autres bassins hydrographiques seront nécessaires pour confirmer ces effets sur la performance du modèle.

4.2.4 Performance du modèle

Cette section présente les résultats des indicateurs de performance des six scénarios, en utilisant le période entière de la série historique de débits observées et données météorologiques disponibles pour chaque sous-bassin afin d'évaluer la performance du modèle. Les périodes de simulations utilisées ont été présentées à la section 3.6. Il est important de souligner que les six scénarios ont la même carte pédologique et d'occupation du sol (voir la section 3.5). Les résultats associés aux paires de simulations avec et sans la présence du SDU sont présentés au Tableau 4.13.

Le Tableau 4.13 démontre que: (i) les séries de simulations montrent un bon accord entre les débits observés et simulés pour les sous-bassins Nelson, Lorette et Saint-Charles et (ii) la performance du modèle s'est améliorée légèrement lors de l'ajout du SDU et d'une résolution spatiale plus fine. Il est possible de noter une augmentation des valeurs du KGE lors de l'utilisation de la résolution spatiale à 5 m avec le SDU pour les sous-bassins Nelson, Lorette et Du Berger. Les résultats démontrent des différences de performance, principalement dans le sous-bassin Du Berger. Des analyses saisonnières ont été faites pour ce sous-bassin et elles seront aussi discutées dans cette section.

Tableau 4.13 : Performances des modèles pour la période entière avec (+) et sans le SDU.

SC	Sous-Bassins	RS	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)	
1+	Nelson	20 m	0,88	4,0	0,8	
2			0,88	5,0	0,8	
5+		10 m	0,86	6,0	0,9	
6			0,86	6,0	0,9	
7+		5 m	0,86	5,0	0,9	
8			0,85	6,0	0,9	
1+		Lorette	20 m	0,87	-4,0	1,2
2				0,87	-2,0	1,2
5+	10 m		0,87	-4,0	1,2	
6			0,87	-4,0	1,2	
7+	5 m		0,87	-4,0	1,3	
8			0,85	-4,0	1,3	
1+	Du Berger		20 m	0,63	50,0	1,5
2				0,66	25,0	1,3
5+		10 m	0,59	41,0	1,6	
6			0,66	30,0	1,5	
7+		5 m	0,71	17,0	1,2	
8			0,62	39,0	1,6	
1+		Saint- Charles	20 m	0,66	29,0	7,2
2				0,65	30,0	7,3
5*	10 m		0,66	28,0	7,1	
6			0,66	30,0	7,3	
7+	5 m		0,66	29,0	7,6	
8			0,66	28,0	7,0	

***Scénarios avec SDU : SC Scénarios; RS : Résolution Spatiale ; Diff : C'est la différence entre les simulations avec une résolution spatiale de 20 m et les simulations avec une résolution spatiale de 5 m, calculée comme par exemple : Diff= (scénario 1 - scénario 2)/scénario 2);**

Les scénarios avec et sans SDU ont été soumis à une analyse graphique en comparant le comportement des courbes de débits simulés et observés pour les trois résolutions spatiales. Des analyses préliminaires ont montré que les courbes de débits simulés à 10 m se trouvent toujours entre les courbes de ceux à 20 et 5 m, donc elle ne sera pas discutée dans les analyses suivantes. Comme déjà fait précédemment, on a fait l'analyse des hydrogrammes de débits moyens journaliers pour toute le période de données disponibles de chaque sous-bassin.

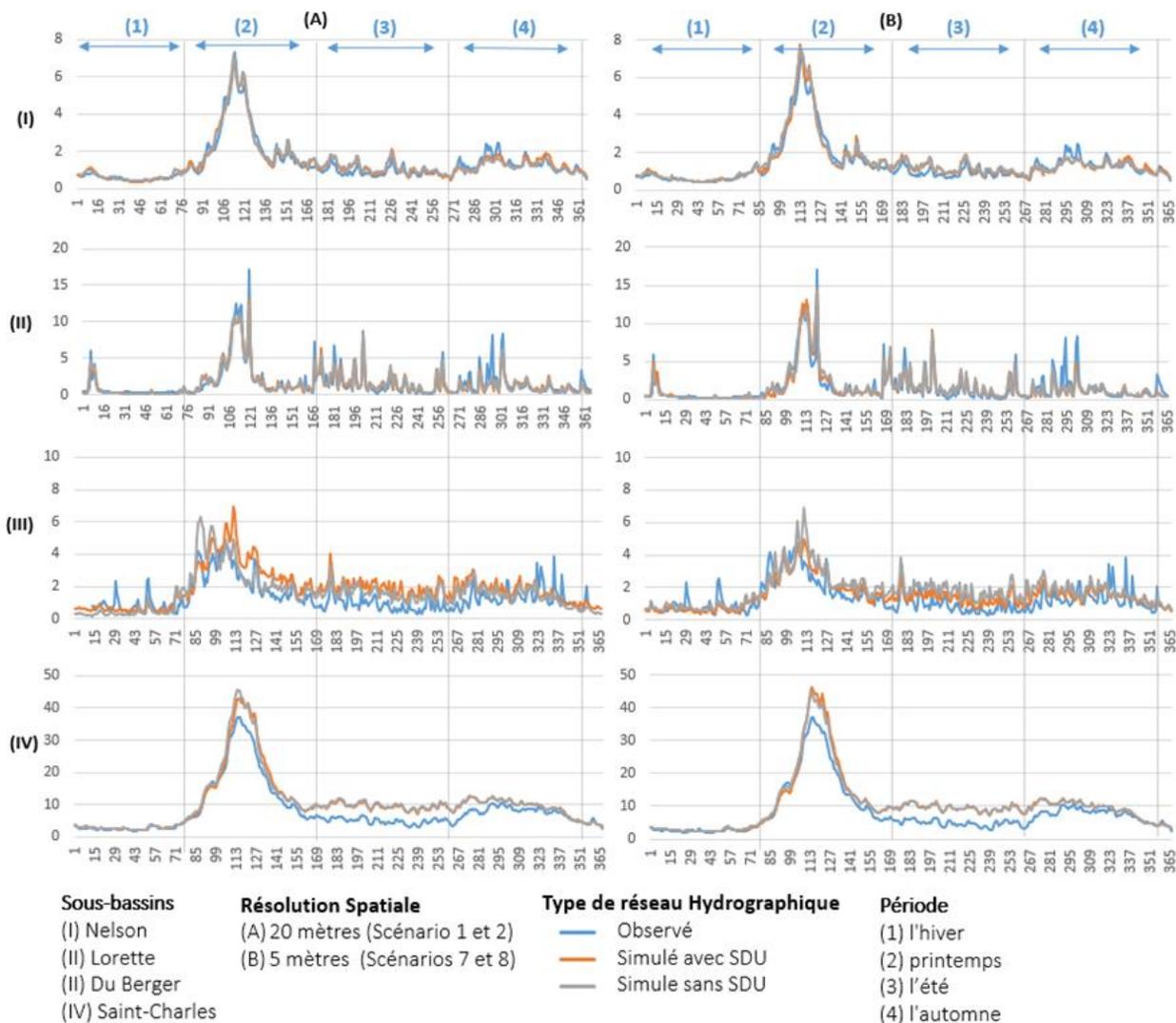


Figure 4.10 : Hydrogrammes des débits moyens journaliers simulés pour chaque sous-bassin avec et sans le SDU.

En comparant les sommes totales des erreurs entre les débits observés et simulés de chaque scénario (voir l'Annexe 10), on observe que les scénarios avec le SDU et le MNA de 5 m de résolution spatiale permettent d'améliorer la performance du modèle. Ces améliorations sont aussi confirmées par les valeurs des indicateurs de performance (le P-BIAS, le RMSE et les coefficients de corrélation et de détermination) introduits au Tableau 4.13 précédemment. De plus, en observant les comportements des débits simulés entre ces scénarios avec ou sans le SDU aux trois résolutions spatiales (Figure 4.10), ces améliorations sont encore plus évidentes. L'objectif de cette partie est d'analyser graphiquement les améliorations au niveau des quatre saisons de l'année (l'hiver, le printemps, l'été, l'automne) pour les sous-bassins de chaque scénario.

En ce qui concerne le sous-bassin de la rivière Nelson, une analyse graphique saisonnière comparant les scénarios 1 et 2, indique que la performance du modèle s'améliore pour le printemps, l'été et l'automne. En comparant les scénarios 7 et 8, on retrouve cette même tendance. En saison hivernale, les deux résolutions spatiales avec le SDU (scénarios 1 et 7) n'ont pas amélioré le modèle. Selon les hydrogrammes de l'Annexe 11, cela peut être expliqué par une augmentation des contributions de volume d'eau transportées par les conduites de l'eau pluviale vers les rivières. Pendant cette période, leur présence a été responsable d'augmenter les faibles débits de pointes et de réduire les débits de base dans la rivière au point de mener le modèle à des erreurs (différences) plus significatives entre les débits simulés et observés.

Les analyses faites pour les sous-bassins Lorette, ont démontré que la performance du modèle a été supérieure sans la présence du SDU (voir l'Annexe 10) pendant l'hiver et le printemps. À 5 m de résolution spatiale, les résultats illustrent que la présence du SDU a amélioré la performance du modèle, plus spécifiquement, pendant les saisons d'hiver, du printemps et de l'été. Au printemps, selon les hydrogrammes de l'Annexe 12, l'ajout du SDU, spécialement à 5 m a contribué significativement à l'augmentation des débits dans les rivières entre les jours juliens 108 et 132. L'augmentation relative de 63,3% de la pente moyenne trouvée pour ce territoire en utilisant la résolution spatiale de 5 m peut aussi avoir interféré sur la vitesse d'écoulement de l'eau vers la rivière et les canalisations en influençant les débits de pointe au printemps. En d'autres mots, la combinaison de ces effets serait vraisemblablement responsable de cette meilleure performance du modèle.

En ce qui concerne le sous-bassin de la rivière Du Berger, selon les valeurs des indicateurs de performance, le scénario 7 avec le SDU, a été le plus performant de tous (Tableau 4.13). En comparant les sommes des erreurs (Annexe 10) à chaque saison de l'année, on note que la présence du SDU a produit des erreurs plus élevées qu'en son absence, à l'exception de l'hiver. Par contre, à 5 mètres de résolution spatiale, le modèle a démontré des erreurs moins significatives, principalement durant le printemps, l'été et l'automne. En analysant les valeurs de KGE des scénarios 7 et 8 pour chaque saison, selon le Tableau 4.14, les résultats ont confirmé également que l'ajout du système de drainage a permis d'améliorer les simulations hydrologiques à 5 m.

Tableau 4.14 : Les valeurs de KGE saisonnier pour le sous-bassin Du Berger à 5 m de résolution spatiale.

Session	Avec SDU (7)	Sans SDU (8)
L'Hiver	0,72	0,62
Le Printemps	0,73	0,63
L'été	0,70	0,61
L'automne	0,71	0,62

En comparant les comportements des débits en été (Annexe 13), avec et sans la présence du SDU à 20 mètres et à 5 mètres de résolution spatiale, on constate que les courbes se comportent de manière contraire. C'est-à-dire que la courbe de débits simulés avec le SDU à 5 m est inférieure à celle sans le SDU à la même résolution et l'inverse se produit avec la résolution à 20 m. L'imperméabilisation du sol et la présence du SDU dans les bassins versants urbanisés est responsable de la diminution des débits de base d'une rivière, spécialement pendant l'été et l'hiver. Lors de la présence du SDU à 5 m de résolution spatiale, le volume d'eau présent dans la rivière pendant l'été a diminué. Cela peut être expliqué en premier lieu par l'analyse des valeurs des paramètres réalisée précédemment; cette dernière a révélé que le coefficient de récession a diminué considérablement avec le SDU avec le MNA à 5 m. Une valeur de coefficient faible implique des débits plus faibles présents dans les rivières. Ces différences peut-être expliquer aussi le nombre plus élevé d'UHRH présents dans les scénarios avec SDU qui aurait permis de mieux reproduire les processus d'écoulement d'eau sur le bassin.

Les analyses faites pour le sous-bassin Saint-Charles à 20 m ont démontré que la performance du modèle était meilleure en présence du SDU (voir l'Annexe 10) pendant toutes les saisons. Par contre, à 5 m, les résultats illustrent le contraire. Comme déjà abordé à l'objectif 1, les surestimations découlant de ces scénarios (Figure 4.5) pour toutes les saisons de l'année sont expliquées par le prélèvement de 2 m³/s à la prise d'eau Château d'Eau qui n'a pas été pris en compte dans cette application du modèle HYDROTEL. En comparant les scénarios en automne, avec et sans le SDU dans les deux résolutions spatiales, les hydrogrammes de l'Annexe 14 indiquent que les comportements des courbes de débit simulés sont très similaires.

Les analyses des courbes de débits classés ont été faites afin de comparer les débits simulés et observés avec la présence ou absence du SDU, à la même résolution spatiale de 20 et 5 m. De manière générale les courbes illustrent un bon ajustement du modèle aux débits à la station hydrométrique de chaque sous-bassin versant. Cela dit, le modèle a sous-estimé légèrement les débits d'étiage et surestimé les débits de crue. Au niveau de chaque sous-bassin, par exemple, cette même tendance a été observée pour les sous-bassins Nelson (Annexe 15), Lorette (Annexe 16) et Du Berger. Les surestimations du modèle dans le sous-bassin Saint-Charles (Annexe 17)

ont déjà été évoquées (la non-prise en compte du prélèvement d'eau par la prise d'eau Château d'Eau).

Sur la base des données du Tableau 4.13, on peut dire que le scénario 7 à l'échelle spatiale de 5 m, spécialement pour le sous-bassin Du Berger, a permis d'obtenir des améliorations significatives suite à l'ajout du SDU. La Figure 4.11 montre les courbes de débits classés pour ce sous-bassin. Les graphiques démontrent que l'ajout du SDU a influencé les débits de crue, à un tel point que la courbe du scénario 7 avec le SDU de la Figure 4.11b a quasiment permis de reproduire les débits mesurés à la station hydrométrique de ce sous-bassin. Au contraire, à 20 m de résolution spatiale (Figure 4.11b), le modèle a sous-estimé les débits observés. Ces résultats démontrent encore une fois que l'utilisation de résolutions spatiales plus grossières en ajoutant les SDU, influence le régime d'écoulement, les directions, les orientations et les pentes du territoire et ces effets sont beaucoup et souvent reflétés dans le débit de crue au printemps. En analysant les faibles débits des courbes à 5 m de résolution spatiale (Figure 4.11c), la présence du SDU a contribué à la réduction des débits de base de la rivière dans la période d'étiage, principalement à cause de l'urbanisation et de l'imperméabilisation de la surface, diminuant la recharge et le transport de l'eau vers les couches plus profondes des UHRH et éventuellement vers la rivière.

Sur la base de ces analyses, on note que l'impact du SDU dans la plateforme de modélisation PHYSITEL/ HYDROTEL se manifeste sur les comportements des débits des rivières et les valeurs des paramètres de calage. Le MNA à haute résolution combiné avec le SDU permet une amélioration significative des résultats de simulation pour les sous-bassins semi-urbanisés. Les travaux futurs devraient s'étendre à d'autres échelles spatiales et d'autres sous-bassins afin de bien comprendre leur effet sur les résultats de simulation avec HYDROTEL.

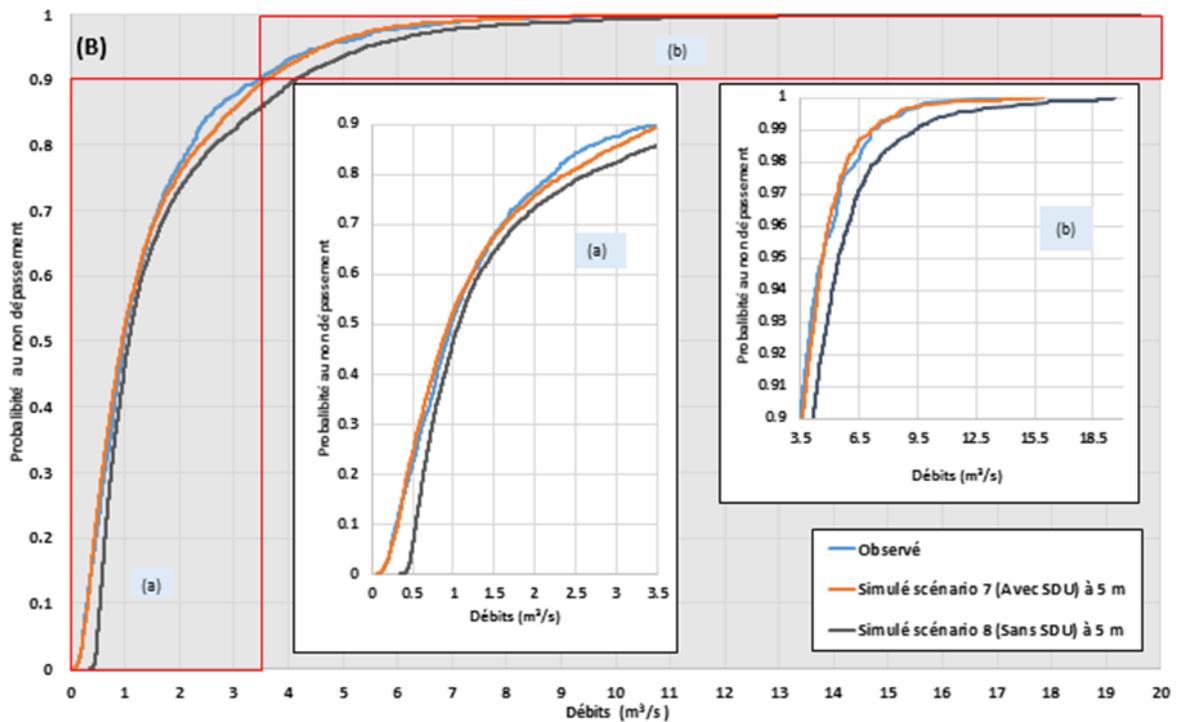
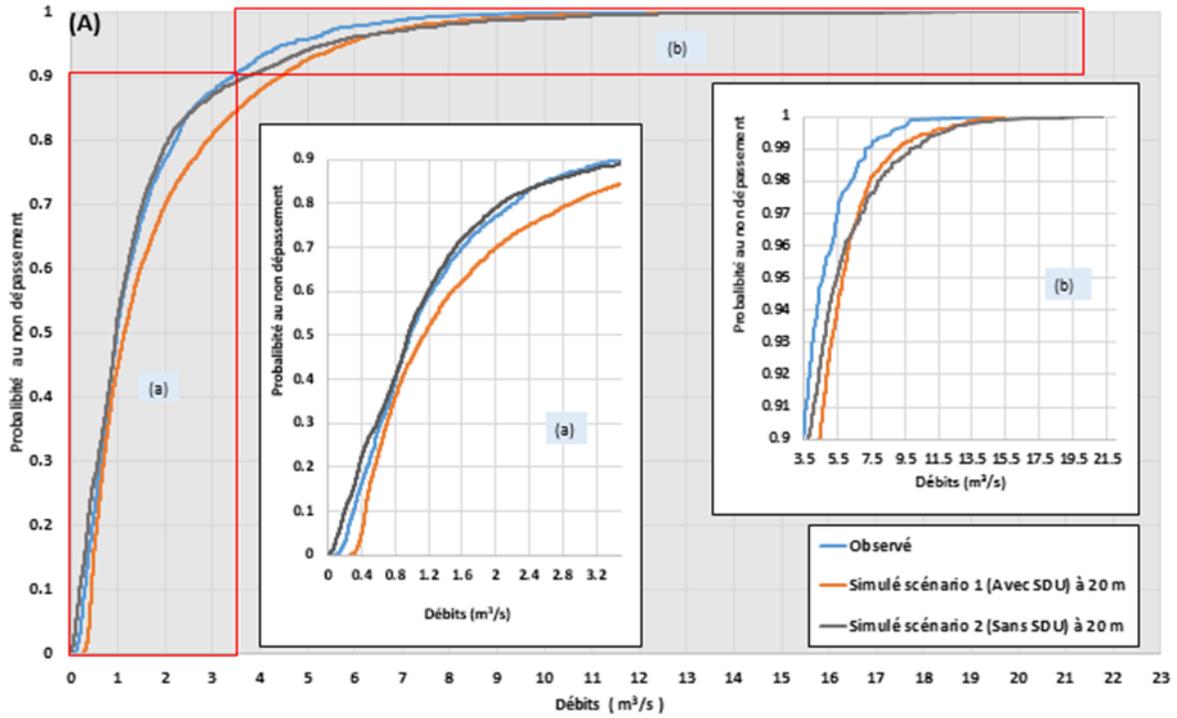


Figure 4.11 : Courbes des débits classés à deux échelles spatiales (A) 20 mètres; (B) 5 mètres du sous-bassin Du Berger en comparant les scénarios avec et sans la présence du SDU.

4.2.5 Sensibilité de la modélisation au réseau hydrographique

Afin d'étudier la valeur ajoutée des données d'entrée, c'est-à-dire avec et sans le SDU à différentes résolutions spatiales, cette section présente les indicateurs de performance et les hydrogrammes afin d'explorer les différences entre les débits simulés de chaque scénario. Les jeux de paramètres utilisés pour les scénarios sans le SDU ont été retenus et placés dans les scénarios avec sa présence. C'est-à-dire que les valeurs des paramètres du modèle HYDROTEL calées du scénario 2 ont été placées dans le scénario 1 et celles des paramètres du scénario 8, placées dans le scénario 7. Les scénarios à 10 m n'ont pas été utilisés, car des analyses préliminaires ont montré que ses résultats sont la réponse moyenne entre les scénarios à 20 m et 5 m, donc les résultats associés ne seront pas montrés dans les paragraphes suivants. Les simulations ont été faites en utilisant toute la période de données disponibles.

Les résultats des indicateurs de performance illustrés au Tableau 4.15 montrent qu'en utilisant les jeux de paramètres des scénarios (2,8) sans le SDU et en les plaçant dans les scénarios (1, 7) avec le SDU, puis dans le sens contraire, la performance du modèle n'a pas été améliorée de manière notable, car on a simulé avec des données qui n'ont pas été prises en compte pour le calage. On a remarqué par ailleurs des augmentations relatives des valeurs de P-BIAS et des diminutions des valeurs de KGE pour la plupart des sous-bassins, en utilisant les deux résolutions spatiales en plaçant les paramètres des scénarios sans le SDU dans les scénarios avec le SDU (Sans SDU → Avec SDU). À l'exception du sous-bassin Du Berger pour lequel on a pu observer une amélioration à 5 m de résolution spatiale. En plaçant les paramètres (Avec SDU → Sans SDU), on a pu constater des résultats hétérogènes et une notable diminution de la valeur de KGE pour le sous-bassin Du Berger à 5 m de résolution spatiale. Les résultats confirment que le changement des paramètres n'a pas apporté des changements très significatifs à la performance du modèle.

Les constats de cet objectif nous ont permis de dégager des conclusions importantes au niveau de l'influence de l'ajout du système de drainage urbain dans le modèle HYDROTEL. Les influences de la résolution spatiale sur l'extraction de cours d'eau sont très discutées dans la revue de littérature (Section 2.4). Cependant, la méthodologie appliquée dans notre étude ne permet pas de faire des comparaisons directes avec ces travaux. L'utilisation du même réseau hydrographique vectoriel de base, soit avec ou sans le système de drainage, à différentes résolutions spatiales, nous a permis d'analyser spécifiquement leur valeur ajoutée dans le processus de simulations d'écoulement d'eau des scénarios de cet objectif.

Tableau 4.15 : Performance des modèles en fonction de la valeur ajoutée par le SDU pour chaque sous-bassin.

Sous-Bassins	Sans SDU→ Avec SDU					Avec SDU→ Sans SDU				
	SC	RS	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)	SC	RS	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)
Nelson	2	20 m	0,88	5,0	0,8	1	20 m	0,88	4,0	0,8
	1-(2)		0,87	5,0	0,8	2-(1)		0,88	4,0	0,8
	8	5 m	0,85	6,0	0,9	7	5m	0,86	5,0	0,9
	7-(8)		0,85	8,0	0,9	8-(7)		0,86	3,0	0,9
Lorette	2	20 m	0,87	-2,0	1,2	1	20 m	0,87	-4,0	1,2
	1-(2)		0,88	2,0	1,2	2-(1)		0,85	-7,0	1,2
	8	5 m	0,85	-4,0	1,3	7	5m	0,87	-4,0	1,3
	7-(8)		0,84	-8,0	1,3	8-(7)		0,87	3,0	1,3
Du Berger	2	20 m	0,66	25,0	1,3	1	20 m	0,63	50,0	1,6
	1-(2)		0,44	37,0	2,0	2-(1)		0,65	29,0	1,2
	8	5 m	0,62	39,0	1,6	7	5m	0,71	17,0	1,3
	7-(8)		0,66	17,0	1,3	8-(7)		0,63	41,0	1,7
Saint-Charles	2	20 m	0,65	30,0	7,3	1	20 m	0,66	29,0	7,2
	1-(2)		0,65	29,0	7,0	2-(1)		0,65	30,0	7,0
	8	5 m	0,66	28,0	7,0	7	5m	0,66	29,0	7,6
	7-(8)		0,60	29,0	7,5	8-(7)		0,66	34,0	7,3

Exemple: 1-(2) fait référence à l'ajout de jeux de paramètres du scénario 2 caractérisé par l'absence du SDU, dans le scénario 1 caractérisé par la présence du SDU, donc ce type de changement se trouve dans la première partie du tableau symbolisé comme: « Sans SDU → Avec SDU ». Au contraire 2-(1) fait référence à l'ajout de jeux de paramètres du scénario 1 caractérisé par la présence du SDU, dans le scénario 2 caractérisé par l'absence du SDU, donc ce type de changement se trouve dans la deuxième partie du tableau symbolisé comme : « Avec SDU→ Sans SDU»

Afin d'explorer les similarités et différences de performances, on a examiné l'allure des hydrogrammes annuels moyens. Les analyses préliminaires ont démontré que les différences les plus significatives des comportements des débits simulés ont été dans les périodes d'hiver et principalement de printemps où la présence du SDU exerce un impact assez considérable sur le transport du volume d'eau dans les rivières. Elles se sont également manifestées pendant les périodes estivales ou dans les périodes de crues. Ces observations peuvent en théorie nous amener à souligner la valeur ajoutée (i.e., la sensibilité des données d'entrée) et principalement de la présence du SDU dans la performance du modèle HYDROTEL. Cependant, une analyse saisonnière pourrait nous indiquer et nous appuyer ces observations, mais elles n'ont pas été faites dans le cadre de cette étude.

La Figure 4.12 illustre le comportement des débits simulés avec et sans le SDU du sous-bassin Du Berger à deux échelles spatiales. Les courbes du débit journalier moyen ont été générées à partir des débits simulés sur toute la période de validation de chaque sous-bassin. Les courbes de débits observés n'ont pas été ajoutées parce que les courbes de débits simulés ne sont pas de toute façon très différentes.

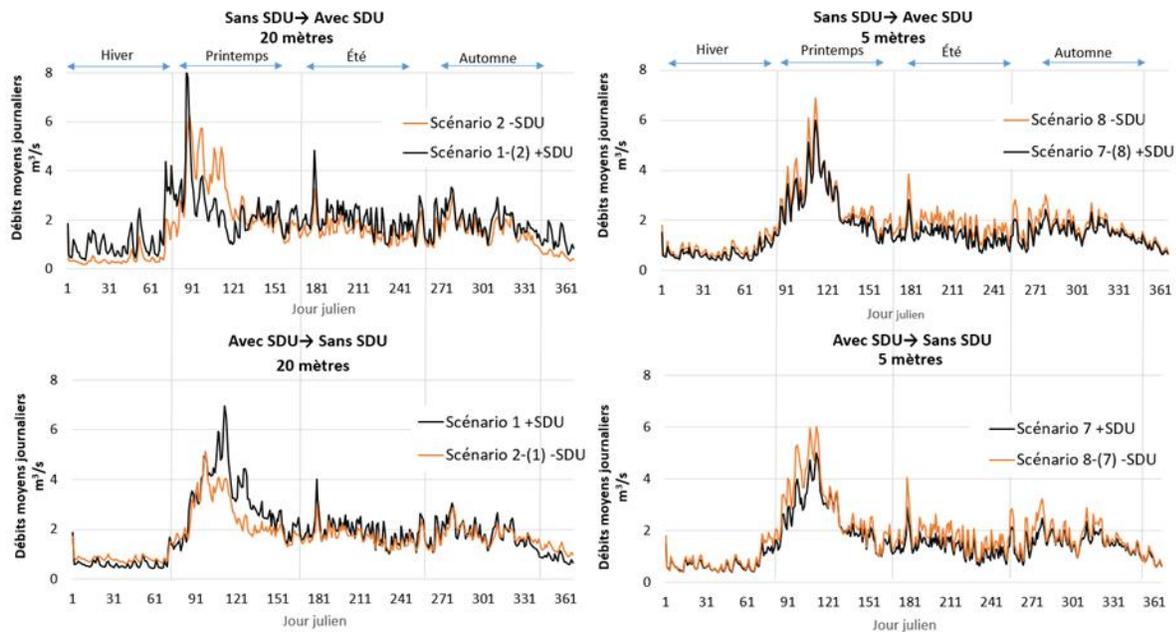


Figure 4.12 : Hydrogrammes annuels moyens suite au changement de paramètres pour le sous-bassin Du Berger.

Les comportements des débits face au changement des paramètres à 20 m de résolution spatiale (Figure 4.12, hydrogrammes à gauche) ont démontré des différences significatives principalement au printemps. Mais, ces différences se sont avérées mineures à 5 m de résolution spatiale (Figure 4.12, hydrogrammes à droite). En comparant les valeurs des paramètres à l'absence ou à la présence du système de drainage dans le réseau hydrographique (Sans SDU → Avec SDU) ou (Avec SDU → Sans SDU), on a pu affirmer que le modèle a mieux performé au changement des paramètres dans la première situation. Les résultats du Tableau 4.15 confirment ce fait. En d'autres termes, l'ajout du SDU peut théoriquement avoir des impacts positifs dans la performance du modèle HYDROTEL (démontrées à travers des indicateurs de performances au Tableau 4.15) en permettant de reproduire et de se rapprocher des débits réels qui se produisent dans le bassin versant.

4.3 Impact hydrologique de la carte pédologique

Pour évaluer la valeur ajoutée de la nouvelle carte pédologique sur la modélisation du bassin versant de la rivière Saint-Charles à Québec, on a utilisé deux scénarios (2, 4) à 20 m de résolution spatiale, ainsi que les scénarios (8, 10) à 5 m de résolution spatiale. Cette section présente, premièrement, les résultats des analyses du type du sol dominant pour chaque scénario, deuxièmement des comparaisons des résultats obtenus à travers des indicateurs de performance calculés pour chaque sous-bassin versant pour les périodes de calage et de validation en utilisant les deux cartes du type de sol. Troisièmement, les scénarios ont été évalués avec les valeurs des paramètres utilisées pour chaque sous-bassin. Les modèles ont été évalués en utilisant la période complète des données hydrométéorologiques de chaque sous-bassin; le tout complémenté par des analyses graphiques afin de comprendre les comportements des débits. Enfin, cette section présente une analyse des valeurs des paramètres, des hydrogrammes ainsi qu'une analyse de sensibilité de l'effet du type de sol.

4.3.1 Analyse des classes pédologiques

Cette section illustre les comparaisons des différents types de texture du sol dominants utilisés dans HYDROTEL au niveau de chaque UHRH pour chacune sous-bassin des quatre scénarios analysés, afin d'évaluer et d'explorer leur valeur ajoutée dans les plateformes PHYSITEL/HYDROTEL. Le Tableau 4.16 illustre les classes de texture du sol pour les cartes pédologiques A (extraite de Soil Landscapes of Canada) et B de l'étude d'Audet *et al.* (1997) à 20 m de résolution spatiale et le changement de la texture du sol par rapport à la carte A pour chaque sous-bassin selon la carte de type du sol B, utilisées dans le cadre de cet objectif.

De manière générale, le Tableau 4.16 montre principalement l'émergence de sept nouvelles classes de texture du sol dans la carte B. Dans la totalité du territoire du bassin de la rivière Saint-Charles, il a été observé un changement total de 41% de la texture du sol dans la carte B par rapport la carte de type de sol A, ce qui représente 52% des UHRH du bassin. En plus, un changement de la texture du sol au sud du bassin versant est observé pour la carte B (Figure 4.13). Le loam argileux présent sur 26% du territoire selon la carte A, est transformé en argile sur la carte B, après la classification de polygones de l'étude d'Audet *et al.* (1997). Le loam sableux, texture la plus représentée dans le bassin versant, a subi une diminution relative de 22% par rapport à la carte B. Au contraire, le sable limoneux a subi une légère différence de 5.57 km² dans ses valeurs de surface (2.09 km² à 7.66 km²).

En analysant les changements de la texture du sol de la carte B par rapport la carte A selon le pourcentage de la surface et le nombre d'UHRH correspondant de chaque sous-bassin, il apparait que les sous-bassins qui ont le plus changé de texture du sol après la reclassification des polygones sont les sous-bassins Saint-Charles (77%), Lorette (70%) et Du Berger (51%). Ces changements influencent les propriétés hydrauliques du sol utilisées par l'algorithme de bilan vertical en trois couches (BV3C) qui sera discuté plus loin.

Tableau 4.16 : Caractéristiques de la texture du sol à 20 m de résolution spatiale pour les cartes de type de sol A et B.

20 mètres - Carte de sol A				
N° Texture	Texture du sol	Surface (km ²)	Surface (%)	Nb UHRH
2	Sable Limoneux	2,09	0,39	1
3	Loam Sableux	399,04	73,89	1502
8	Loam Argileux	138,93	25,73	221
Total		540,06	100,00	1724
20 mètres - Carte de sol B				
N° Texture	Texture du sol	Surface (km ²)	Surface (%)	Nb UHRH
1	Sable	21,91	4,06	176
2	Sable Limoneux	7,66	1,42	174
3	Loam Sableux	310,87	57,56	797
5	Loam Limoneux	19,69	3,65	168
7	Loam Sableux Argileux	14,00	2,59	47
9	Limoneux Argileux	19,87	3,68	29
10	Argile Sableux	3,60	0,67	12
11	Argile Limoneux	4,01	0,74	71
12	Loam	138,45	25,64	250
Total		540,06	100,00	1724
Pourcentage de chaque sous-bassin qui a changé de texture du sol en utilisant la carte B plutôt que la carte A à 20 mètres				
Sous-bassin	Surface (%)	Nb UHRH		
Des Hurons	19,20	223		
Jaune	11,69	105		
Nelson	29,29	106		
Lorette	69,79	101		
Du Berger	51,54	97		
Saint-Charles	76,95	280		
Total	258,46	912		

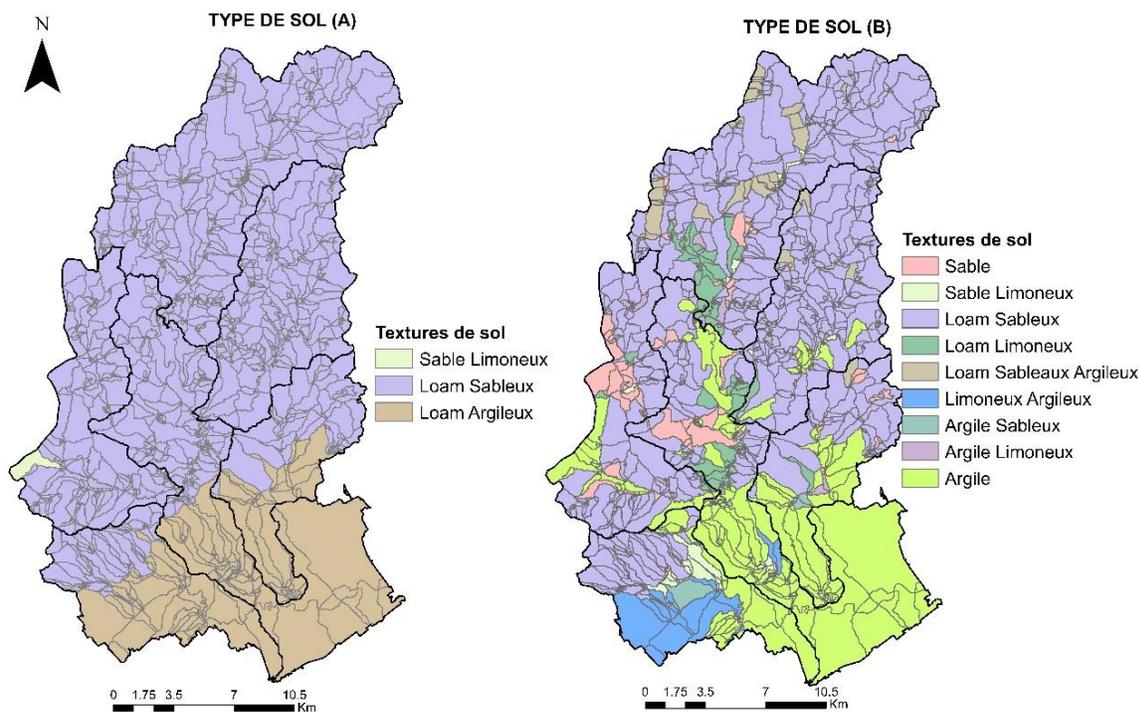


Figure 4.13 : Types de sols utilisés par HYDROTEL dans les simulations hydrologiques à 20 m de résolution spatiale.

La même analyse, effectuée pour une résolution spatiale de 5 m, montre (Tableau 4.17) que la carte (B) représente a subi un changement de 41% de texture du sol plutôt que la carte A (Somme de la surface de texture du sol 1 plus celles de 5 à 12 de la carte B), ce qui représente 53% (962 UHRH) du nombre total des unités hydrologiques présentes sur le territoire (1803 UHRH). Le sable limoneux couvrait 0,2% de la carte (A) mais couvre 1% de la carte (B). Au contraire, la superficie de loam sableux a subi une diminution relative de 22%. Le loam argileux qui couvrait 25% du territoire dans la carte (A), cède se place en majeure partie à la texture du sol loam, tel qu'illustré à la Figure 4.14.

Les sous-bassins ayant le plus changé les pourcentages de la surface de texture du sol en utilisant la carte B plutôt que la carte A après la reclassification des polygones sont les sous-bassins suivants : Saint-Charles (74%), Lorette (73%) et Du Berger (49%). Au total, la texture de 488 UHRH, soit 27% du nombre total, a été modifiée. La Figure 4.14 illustre les différences entre les deux cartes de type du sol à 5 m de résolution spatiale.

Tableau 4.17 : Caractéristiques de la texture du sol à 5 m de résolution spatiale pour les cartes de type de sol A et B.

5 m - Carte de sol A				
N° Texture	Texture du sol	Surface (km ²)	Surface (%)	Nb UHRH
2	Sable Limoneux	0,94	0,17	1
3	Loam Sableux	404,53	74,86	1588
8	Loam Argileux	134,92	24,97	214
Total		540,39	100	1803
5 m - Carte de sol B				
N° Texture	Texture du sol	Surface (km ²)	Surface (%)	Nb UHRH
1	Sable	21,95	4,06	217
2	Sable Limoneux	6,77	1,25	182
3	Loam Sableux	313,42	58,00	820
5	Loam Limoneux	17,30	3,20	161
7	Loam Sableux Argileux	14,88	2,75	43
9	Limoneux Argileux	17,14	3,17	18
10	Argile Sableux	4,78	0,88	18
11	Argile Limoneux	3,63	0,67	75
12	Loam	140,52	26,00	269
Total		540,39	100	1803
Pourcentage de chaque sous-bassin qui a changé de texture du sol en utilisant la carte B plutôt que la carte A à 5 mètres				
Sous-bassin	Surface (%)	Nb UHRH		
Des Hurons	19,77	245		
Jaune	10,73	112		
Nelson	27,15	117		
Lorette	73,65	95		
Du Berger	49,32	118		
Saint-Charles	74,06	275		
Total		962		

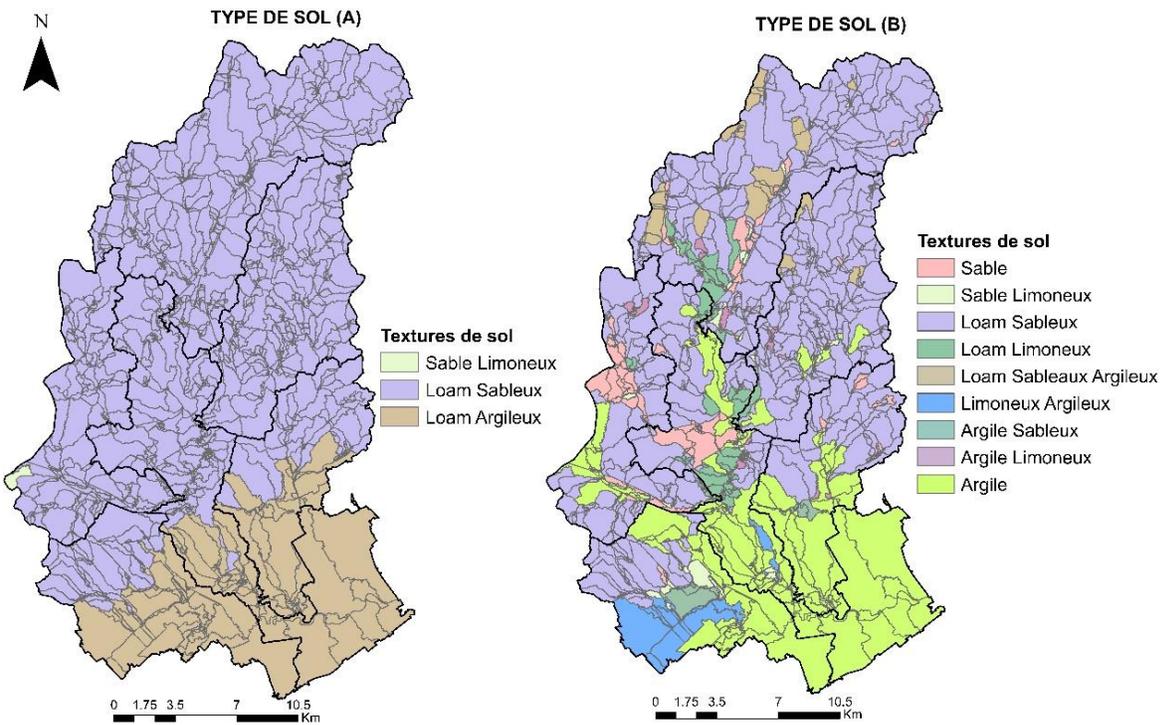


Figure 4.14 : Types de sols utilisés par HYDROTEL dans les simulations hydrologiques à 5 mètres de résolution spatiale.

Les différences trouvées ici peuvent influencer potentiellement les valeurs des paramètres trouvées par calage automatique ainsi que le bilan hydrologique vertical (BV3C). Ces influences seront vérifiées à la section suivante, à travers des simulations des débits dans les rivières présentes sur le territoire de la rivière Saint-Charles. Les analyses du comportement des débits aux changements de types de sols seront présentées plus loin.

4.3.2 Analyses des propriétés hydrauliques des classes pédologiques

Afin de mieux comprendre la valeur ajoutée des changements des textures du sol et leurs impacts sur les processus hydrologiques dans le modèle, on a analysé les propriétés hydrauliques des sols utilisées dans les équations d'HYDROTEL. À partir des valeurs fixes de sept variables (Tableau 4.18) classées selon les types de texture du sol (Rawls et Brakensiek, 1989), des cartes comparatives des paramètres des propriétés hydrauliques de sol ont été créées pour illustrer les changements de chacune des UHRH du bassin versant.

Tableau 4.18 : Propriétés hydrauliques de sol utilisées par PHYSITEL/HYDROTEL.

Textures de sols	Code	θ_s	θ_{cc}	θ_{pf}	K_s	Ψ_s	λ	α
Sable	1	0.417	0.091	0.033	0.2100	0.1598	0.694	10.0
Sable Limoneux	2	0.401	0.125	0.055	0.0611	0.2058	0.553	6.0
Loam Sableux	3	0.412	0.207	0.095	0.0259	0.3020	0.378	4.5
Loam	4	0.434	0.27	0.117	0.0132	0.4012	0.252	3.5
Loam Limoneux	5	0.486	0.330	0.133	0.0068	0.5087	0.234	3.0
Limon	6	0.486	0.330	0.133	0.0068	0.5087	0.234	3.0
Loam Sableux Argileux	7	0.330	0.255	0.148	0.0043	0.5941	0.319	3.5
Loam Argileux	8	0.390	0.318	0.197	0.0023	0.5643	0.242	2.0
Limoneux Argileux	9	0.432	0.366	0.208	0.0015	0.7033	0.177	1.5
Argile Sableux	10	0.321	0.339	0.239	0.0012	0.7948	0.223	1.0
Argile Limoneux	11	0.423	0.387	0.250	0.0009	0.7654	0.150	0.8
Argile	12	0.385	0.396	0.272	0.0006	0.8560	0.165	0.5

θ_s : Teneur en eau à saturation; θ_{cc} : Teneur en eau à la capacité au champ; θ_{pf} : Teneur en eau au point de flétrissement; K_s : Conductivité hydraulique à saturation; Ψ_s : Potentiel matriciel à saturation; λ : Distribution des dimensions des pores; α : Exposant de l'évaluation du coefficient d'assèchement

Dans HYDROTEL, les simulations des flux verticaux et des écoulements de surface pour chaque UHRH sont faites à partir de la subdivision de la colonne de sol en trois couches (Z_1 , Z_2 et Z_3) tel qu'illustré à la Figure 4.15. La première couche contrôle le ruissellement de surface et est particulièrement affectée par l'évaporation du sol nu du fait de son épaisseur relativement fine de moins de 0.4 cm; ceci correspond à la couche dans laquelle certains végétaux prélèvent de l'eau pour la transpiration. La deuxième couche sert à produire les écoulements retardés dans la couche supérieure et la troisième couche contrôle l'écoulement de base quand le sol est près de la saturation. Les caractéristiques hydrauliques de chaque UHRH dépendent du type de sol retenu par HYDROTEL, soit la classe de sol majoritaire présente sur l'UHRH. La pente de chaque unité régule l'écoulement latéral de la deuxième couche dans le modèle. Les analyses réalisées dans le premier objectif ont démontré que la pente pondérée des UHRH augmente à mesure que la résolution spatiale augmente. Cette augmentation affecte directement l'écoulement latéral de l'eau de la deuxième couche du sol. Les analyses qui suivent font uniquement référence à la résolution spatiale de 20 m.

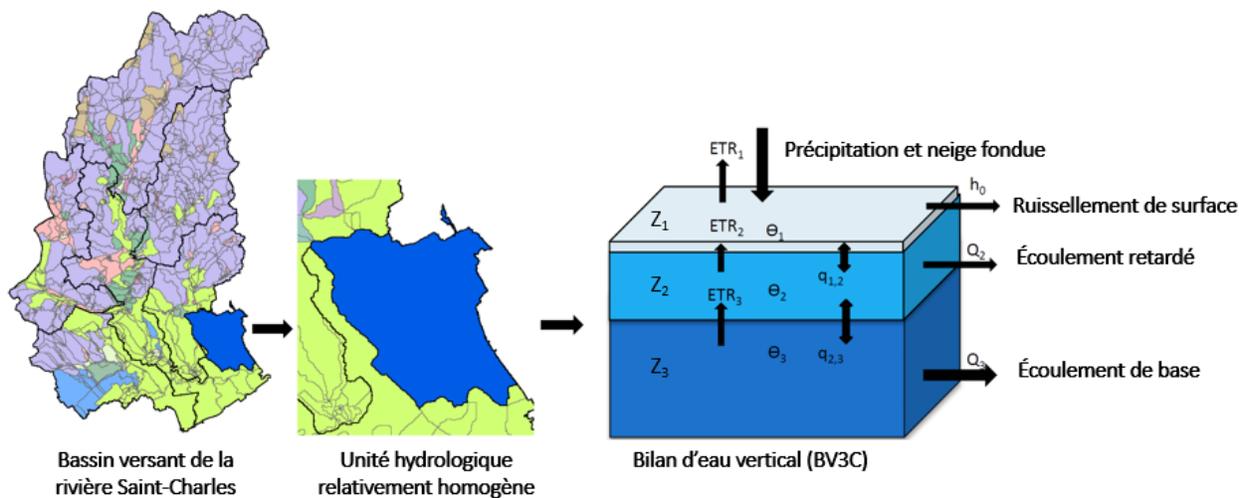


Figure 4.15 : Schéma représentatif du bilan d'eau vertical appliqué à une UHRH de type versant dans le modèle HYDROTEL.

L'infiltration de l'eau dans les trois couches de sol dans le modèle est contrôlée par la pluie et la fonte de la neige lorsque la couche de surface n'est pas saturée et par la conductivité hydraulique à saturation K_s lorsque cette couche est saturée. L'excès d'eau à la surface devient du ruissellement de surface h_0 . Le teneur en eau θ de chaque couche de sol varie en fonction des flux verticaux $q_{1,2}$ et $q_{2,3}$ entre les couches, des écoulements hors de la colonne de sol de la couche 2 (Q_2) et de la couche 3 (Q_3), de la transpiration en provenance de chaque couche et de l'évaporation du sol nu pour la couche de surface.

La conductivité hydraulique est l'un des principaux paramètres permettant de déterminer la capacité de drainage du sol et d'estimer les flux entre les couches et les écoulements vers l'extérieur de la colonne de sol. La conductivité est constante pour chaque type de sol, c'est-à-dire que cela ne dépend que de la texture et de la structure du sol. Dans HYDROTEL, ce paramètre est calculé pour chaque couche et estimé en fonction de sa valeur à saturation K_s , de la valeur de teneur en eau θ , de la valeur de teneur en eau à saturation θ_s et de la distribution des dimensions des pores λ , selon l'équation de Campbell (1974). L'écoulement latéral retardé produit par la deuxième couche est estimé en fonction de la pente de chaque UHRH, de l'épaisseur des couches 1 et 2 et de sa conductivité hydraulique. Les flux verticaux entre les couches sont déterminés à partir de la conductivité hydraulique et du potentiel matriciel de la teneur en eau Ψ . Ce dernière est obtenu à partir de sa valeur à saturation Ψ_s et de la distribution des dimensions des pores λ selon l'équation de Clapp et Hornberger (1978).

Pour la première couche, l'évaporation du sol nu utilisée pour calculer le teneur en eau de la surface est estimée à partir de l'évapotranspiration maximale et du coefficient d'assèchement C_s

(Patoine et Fortin, 1992). Ce coefficient est déterminé en fonction de la teneur en eau relative θ_r , par la relation entre la teneur en eau au point de flétrissement θ_{pf} et la teneur en eau à la capacité au champ θ_{cc} et à partir du coefficient d'exposant de l'évaluation du coefficient d'assèchement α_k dépendant du type de sol. Les équations du sous-modèle BV3C utilisées et décrites brièvement dans cette section peuvent être trouvées dans le rapport de Fortin et Royer (2004).

Les changements des propriétés hydrauliques du sol lors de la reclassification des textures des sols de la carte de type de sol (B) ont été mis en évidence à travers des illustrations des valeurs des différences relatives des variables décrites au Tableau 4.18. La Figure 4.16 présente le comportement de trois variables : la teneur en eau à saturation θ_s , la teneur en eau à la capacité au champ θ_{cc} , et la teneur en eau au point de flétrissement θ_{pf} . Les différences pour les autres variables sont présentées à l'Annexe 18.

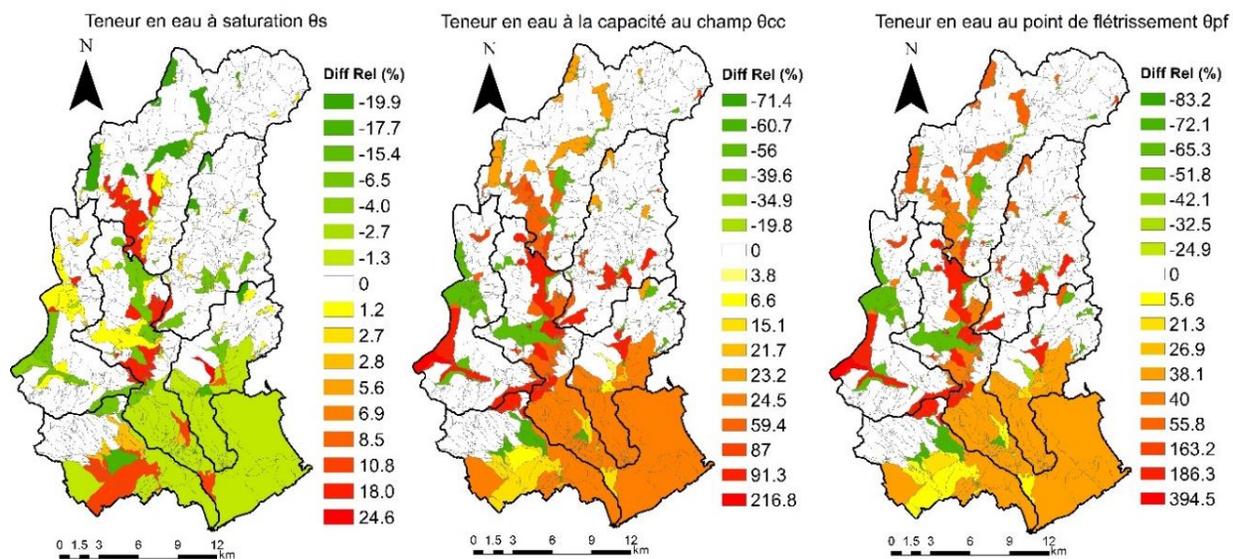


Figure 4.16 : Différences relatives, en pourcentage, des teneurs en eau de sol dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles.

Selon la Figure 4.16, les différences relatives trouvées pour la teneur en eau à saturation θ_s montrent une tendance de diminution relative entre 1,3% et 20% présente dans le sud du bassin versant, c'est-à-dire pour les sous-bassins de la rivière Saint-Charles, Lorette et Du Berger. La diminution de la valeur de ce paramètre peut conduire à la diminution de la capacité de stockage en eau du sol, influencée par la conductivité hydraulique selon l'équation de (Campbell, 1974), et via le processus de transfert vertical de l'eau ($q_{1,2}$ et $q_{2,3}$) selon les équations suivantes :

Équation 4-2

$$q_{1,2} = K_{1,2} \left(2 \frac{\Psi(\theta_2) - \Psi(\theta_1)}{Z_1 + (Z_2 - Z_1)} + 1 \right)$$

Équation 4-3

$$q_{2,3} = K_{2,3} \left(2 \frac{\Psi(\theta_3) - \Psi(\theta_2)}{(Z_2 - Z_1) + (Z_3 - Z_2)} + 1 \right)$$

Où :

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$: Teneur en eau de la couche 1, 2 et 3

Ψ : potentiel matriciel de la teneur en eau;

Z_1, Z_2, Z_3 : Épaisseur des couches 1, 2 et 3;

K : Conductivité hydraulique

Les écoulements latéraux des couches de sol 2 (Q_2) et 3 (Q_3) peuvent diminuer et provoquer une augmentation d'écoulement d'eau de la surface produit par HYDROTEL. Ce processus est représenté par les équations ci-dessous :

Équation 4-4

$$Q_2 = K(\theta_2) \sin[\arctan(S_n)](Z_2 - Z_1)$$

Équation 4-5

$$Q_3 = k_r(Z_3 - Z_2)\theta_3$$

Où :

S_n : Pente de chaque UHRH

K_r : Coefficient de récession

Cette augmentation de l'écoulement superficiel peut augmenter également les débits de crue. Au contraire, des augmentations relatives de 59% de la teneur en eau à la capacité au champ θ_{cc} et 38% de la teneur en eau au point de flétrissement θ_{pf} dans la plupart du territoire de ces sous-bassins sont observées. Les augmentations relatives des valeurs de ces paramètres peuvent conduire à la réduction de la teneur en eau relative de la première couche, en diminuant la valeur

du coefficient d'assèchement et par conséquent une diminution de l'évaporation du sol nu décrit ci-dessous.

Équation 4-6

$$E = C_s E_m$$

Où :

C_s : Coefficient d'assèchement

E_m : Évapotranspiration maximale

Le coefficient d'assèchement est décrit selon l'équation de Patoine et Fortin, (1992) suivante:

Équation 4-7

$$C_s = \left(\frac{1 - e^{-\alpha_k \theta_{r,1}}}{1 - 2e^{-2\alpha_k} + e^{-\alpha_k \theta_{r,1}}} \right)$$

Où :

α_k : Coefficient d'exposant de l'évaluation du coefficient d'assèchement dépendant du type de sol.

$\theta_{r,1}$: Teneur en eau relative de la première couche

La teneur en eau relative $\theta_{r,1}$ peut être calculée à travers l'équation suivante :

Équation 4-8

$$\theta_{r,1} = \frac{\theta_1 - \theta_{pf}}{\theta_{cc} - \theta_{pf}}$$

θ_{pf} : Teneur en eau au point de flétrissement

θ_{cc} : Teneur en eau à la capacité au champ

La teneur en eau relative peut amener à l'augmentation de l'écoulement de l'eau dans la première couche vers l'extérieur de la colonne de sol en impactant les débits dans les cours d'eau. En analysant les variables illustrées à l'Annexe 5, les différences relatives trouvées en termes de conductivité hydraulique K_s ont montré que la majorité des changements consistent en une diminution relative de 61% à 74% au sud du bassin versant, plus spécifiquement dans les sous-

bassins de la rivière Saint-Charles, Lorette et Du Berger. On a observé également une diminution relative de 32% et 75% pour les variables de distribution des dimensions des pores λ et d'exposant de l'évaluation du coefficient d'assèchement α_k . Une diminution de λ implique une réduction des flux vertical et latéral des couches, ayant comme conséquence une possible augmentation d'écoulement vers les rivières. Les diminutions observées de α_k amènent à une diminution de la valeur du coefficient d'assèchement C_s , de l'évaporation du sol nu, de la teneur en eau de la première couche, et à une augmentation de la lame d'eau produite à la surface. Enfin, l'augmentation relative de 52% du potentiel matriciel à saturation Ψ_s sur la plupart du bassin versant peut favoriser les échanges de flux verticaux et horizontaux des couches 1 et 2 en diminuant la production de lame d'eau à la surface.

Il est important de noter que l'évaluation de la valeur ajoutée des types de sols dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles devient un peu partielle au niveau des comportements des débits en raison de la forte imperméabilisation du sol dans les zones urbaines pour lesquelles il y a eu des changements significatifs des textures de sols. En plus, les faibles changements de types de sols observés dans les sous-bassins peu ou non urbanisés comme: Des Hurons, Jaune et Nelson, n'ont pas été suffisants pour avoir un impact sur la modélisation des débits. Cette étude nous apporte toutefois l'opportunité d'établir en théorie l'impact du changement des propriétés hydrauliques des sols sur les valeurs des paramètres calés automatiquement.

4.3.3 Calage et validation

Les résultats de calage et de validation montrent que l'utilisation de la nouvelle carte (B) n'apporte pas d'améliorations très significatives dans le modèle. Le changement le plus marquant a été constaté dans le sous-bassin Nelson à deux échelles spatiales dans la période de validation et dans le sous-bassin Du Berger à 20 m. Le Tableau 4.19 montre les résultats de calage et de validation en comparant les quatre scénarios utilisés pour évaluer la valeur ajoutée du type de sol.

De manière générale, les résultats de calage et de validation pour chaque sous-bassin fournissent un bon ajustement entre les débits simulés et observés. Pour la validation du modèle, selon l'interprétation suggérée par Kling et al. (2012), les résultats du critère KGE sont considérés comme bons ($KGE \geq 0,75$) pour tous les scénarios des sous-bassins Des Hurons, Nelson. Les résultats ont été considérés intermédiaires ($0,75 > KGE \geq 0,5$) pour les sous-bassins Jaune, Du Berger et Saint-Charles. Pour le sous-bassin Lorette, aucune validation n'a été effectuée.

Tableau 4.19 : Performance des modèles dans les périodes de calage et de validation avec les carte de type de sol A et B.

Sous-Bassins	Calage						Validation		
	SC	TS	RS	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)	KGE	P-BIAS (%)	RMSE
Des Hurons	2	A	20 m	0,81	-4,0	2,1	0,75	-3,0	1,8
	4	B		0,81	-2,0	2,2	0,76	-1,0	1,8
	8	A	5 m	0,82	-2,0	2,1	0,78	-2,0	1,7
	10	B		0,82	-2,0	2,1	0,80	-2,0	1,7
Jaune	2	A	20 m	0,63	-5,0	2,2	0,64	-5,0	1,7
	4	B		0,62	-2,0	2,3	0,62	0,0	1,9
	8	A	5 m	0,63	-3,0	2,2	0,65	-3,0	1,8
	10	B		0,63	-3,0	2,3	0,64	-3,0	1,8
Nelson	2	A	20 m	0,90	1,0	0,8	0,85	8,0	0,8
	4	B		0,90	-1,0	0,8	0,86	7,0	0,8
	8	A	5 m	0,88	2,0	0,9	0,82	10,0	1,0
	10	B		0,88	0,0	0,9	0,83	8,0	0,9
Lorette	2	A	20 m	0,87	-2,0	1,2	*		
	4	B		0,88	-5,0	1,2			
	8	A	5 m	0,85	0,0	1,3			
	10	B		0,84	2,0	1,4			
Du Berger	2	A	20 m	0,69	44,0	1,5	0,57	10,0	1,1
	4	B		0,69	44,0	1,5	0,55	18,0	1,0
	8	A	5 m	0,54	60,0	1,9	0,70	22,0	1,3
	10	B		0,56	54,0	1,9	0,64	22,0	1,4
Saint-. Charles	2	A	20 m	0,75	18,0	5,5	0,63	33,0	7,6
	4	B		0,73	20,0	5,7	0,61	35,0	8,1
	8	A	5 m	0,75	17,0	5,4	0,64	31,0	7,3
	10	B		0,75	16,0	5,4	0,64	30,0	7,4

SC= Scénarios; TS= Type de sol; RS : Résolution Spatiale

4.3.4 Analyse de paramètres

Cette section présente les différences absolues et relatives des valeurs des paramètres obtenues pour les deux cartes de types de sols à la même échelle spatiale pour chacun des sous-bassins des quatre scénarios générés pour cet objectif. Les valeurs de chaque paramètre et l'analyse complète des différences relatives et absolues se trouvent à l'Annexe 19 et à l'Annexe 20

respectivement. La Figure 4.17 illustre les comportements des 11 paramètres calés automatiquement avec DDS en comparant les deux cartes de types de sols, à travers des diagrammes en toile d'araignée.

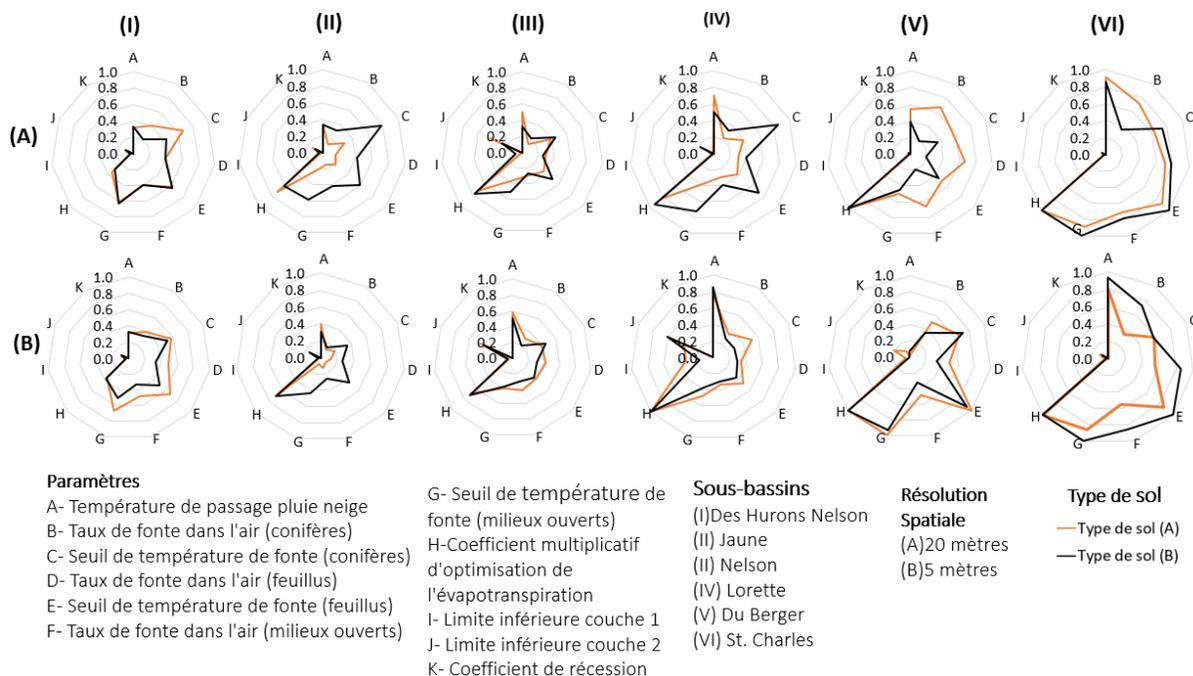


Figure 4.17 : Diagrammes en toile d'araignée des 11 paramètres utilisés pour le calage automatique de HYDROTEL pour chaque sous-bassin des scénarios 2,4, 8 et 10.

À partir des différences absolues entre les valeurs des paramètres, on a pu constater que les trois paramètres qui ont montré une plus grande différence absolue (Tableau 4.20) sont les trois paramètres de taux de fonte dans l'air. Ces trois paramètres, comme discuté aux sections 4.1 et 4.2, influencent la distribution temporelle du volume d'eau dans les rivières spécialement au printemps.

Tableau 4.20 : Rang des différences absolues des paramètres entre le cartes de type de sol A et B.

Paramètres	Des Hurons		Jaune		Nelson		Lorette		Du Berger		Saint-Charles	
	20m	5m	20m	5m	20m	5m	20m	5m	20m	5m	20m	5m
Passage pluie-neige	3				2							
Taux de fonte conifère	1	3			1	3	2	2	2	2	1	1
Taux de fonte feuillu	2		3	2	2				3	3	3	3
Taux de fonte ouvert	1		1	1	1		3	3	1	1	2	2
Seuil fonte conifère	2		2				1	1				
Seuil fonte feuillu					3	3						
Seuil fonte ouvert					3	3						
Coefficient ETP												
Épaisseur couche 1												
Épaisseur couche 2												
Coefficient récession												

Afin de mieux comprendre les jeux des paramètres obtenus dans le calage automatique et utilisés pour chaque scénario, les différences relatives entre les deux cartes de type de sol ont été comparées au Tableau 4.21, afin de trouver les tendances des valeurs des paramètres trouvés dans la carte de type de sol (B). Il est important de noter que les flèches servent à interpréter les valeurs positives ou négatives résultant des différences relatives entre les valeurs de paramètres des scénarios. La flèche dirigée vers le haut indique une augmentation relative positive des valeurs de paramètres de la carte A vers la carte B, alors qu'une flèche dirigée vers le bas représente une diminution relative négative des valeurs de paramètres utilisées (A vers B) dans le modèle.

La présence des nouvelles classes de textures de sols observées dans la carte (B) influence les valeurs des jeux de paramètres trouvés lors du calage automatique avec DDS. Les résultats montrent que la nouvelle classification du type de sol peut avoir des effets positifs, négatifs ou même nuls (Tableau 4.21) sur le régime d'écoulement du bassin versant de la rivière Saint-Charles. De manière générale, ces effets sont plutôt négatifs quand on utilise la carte de type de sol (B), en raison de plusieurs des facteurs déjà expliqués précédemment.

Tableau 4.21 : Comparaison des différences relatives des paramètres utilisés dans chaque sous-bassin.

PA	20 mètres						5 mètres					
	Des Hurons	Jaune	Nelson	Lorette	Du Berger	St. Charles	Des Hurons	Jaune	Nelson	Lorette	Du Berger	St. Charles
(a)	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↑	↑
(b)	↓	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↑
(c)	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑
(d)	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑
(e)	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↓
(f)	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑
(g)	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑
(h)	↓	↓	↑	↑	(-)	(-)	↑	↓	↑	(-)	(-)	(-)
(i)	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓
(j)	↑	↓	↓	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↓
(k)	↑	↓	↓	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	↓	↑

Les directions des flèches représentent les diminutions ou les augmentations des valeurs des paramètres avec la carte de type de sol (B)

4.3.5 Performance du modèle

Cette section présente les résultats des indicateurs de performance en utilisant le période complète de la série historique de débits observées et données météorologiques disponibles pour chaque sous-bassin en utilisant les deux cartes de types de sols. Les résultats associés à chaque scénario sont présentés au Tableau 4.22.

Le tableau démontre que: (i) les séries de simulations montrent un bon accord entre les débits observés et simulés pour tous les sous-bassins et (ii) la performance du modèle n'a pas été améliorée lors du changement de types de sols pour la plupart des sous-bassins.

Tableau 4.22 : Performances des modèles pour le période entière avec la carte de type de sol (A) et (B).

Sous-Bassins	SC	TS	RS	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)
Des Hurons	2	A	20 m	0,80	-4,0	2,0
	4	B		0,80	-2,0	2,0
	8	A	5 m	0,82	-2,0	1,9
	10	B		0,82	-2,0	1,9
Jaune	2	A	20 m	0,67	-5,0	1,8
	4	B		0,64	-1,0	2,0
	8	A	5 m	0,67	-3,0	1,9
	10	B		0,66	-3,0	1,9
Nelson	2	A	20 m	0,88	5,0	0,8
	4	B		0,88	3,0	0,8
	8	A	5 m	0,85	6,0	0,9
	10	B		0,87	5,0	0,9
Lorette	2	A	20 m	0,87	-2,0	1,2
	4	B		0,86	-5,0	1,2
	8	A	5 m	0,85	1,0	1,3
	10	B		0,84	2,0	1,4
Du Berger	2	A	20 m	0,66	25,0	1,3
	4	B		0,65	30,0	1,2
	8	A	5 m	0,62	39,0	1,6
	10	B		0,61	36,0	1,6
Saint-Charles	2	A	20 m	0,65	30,0	7,3
	4	B		0,63	33,0	7,8
	8	A	5 m	0,66	28,0	7,0
	10	B		0,66	28,0	7,2

SC= Scénarios; TS: Type de sol; RS : Résolution Spatiale

Afin d'explorer ces résultats et de déterminer la valeur ajoutée de l'introduction de nouvelles classes de textures de sols dans le processus hydrologique d'HYDROTEL, les scénarios ont été soumis à une analyse graphique en comparant le comportement des courbes de débits simulés et observés à deux échelles spatiales. Comme déjà fait précédemment, on a fait l'analyse des hydrogrammes de débits moyens journaliers pour toute la période de données disponibles de chaque sous-bassin. Cependant, parmi les sous-bassins considérés naturels ou très peu urbanisés, comme les sous-bassins Des Hurons, Jaune et Nelson, on a choisi d'illustrer ici, les

hydrogrammes du sous-bassin Nelson en raison du changement des types de sols le plus significatif et représentatif d'un sous-bassin moins urbanisé. En plus, on a choisi d'illustrer ici, le sous-bassin Lorette en raison des changements très significatifs des types de sols parmi les sous-bassins les plus urbanisés. Il est important de noter que le sous-bassin Saint-Charles a eu les changements les plus élevés, mais il ne sera pas discuté ici en raison de la divergence des débits simulés et observés influencée par la prise d'eau Château d'Eau qui n'a pas été prise en compte dans cette application du modèle HYDROTEL.

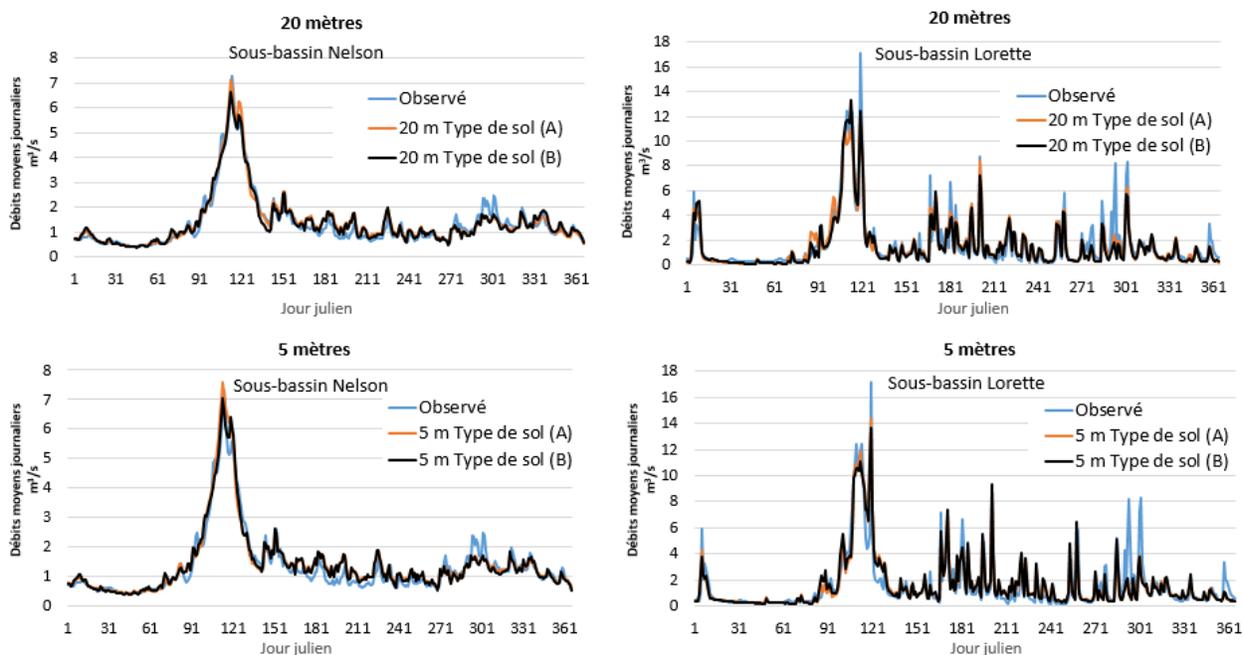


Figure 4.18 : Hydrogrammes de débits moyens journaliers simulés en comparant les types de sol (A) et (B).

En comparant les graphiques, les valeurs des indicateurs de performance et les valeurs des paramètres obtenues avec le calage automatique, les courbes des débits ont démontré des comportements très similaires spécialement à 5 m de résolution spatiale, comme illustré à la Figure 4.18. Le même comportement a été observé pour les autres sous-bassins. Plus spécifiquement, les changements de types de sols dans les sous-bassins Des Hurons, Jaune et Nelson, n'ont pas été suffisants pour influencer les comportements de débits dans les rivières. Les sous-bassins Du Berger, Lorette et Saint-Charles n'ont pas subi de changement en raison principalement de leur urbanisation. La forte imperméabilisation du sol de ces régions annule probablement un quelconque effet, positif ou négatif, en fonction de la carte de type de sols. Les différences les plus significatives trouvées entre les données observées et les données simulées par HYDROTEL dans tous les sous-bassins sont au niveau des débits de crue au printemps, à l'été et à l'automne.

En représentant la distribution des débits moyens à travers des courbes des débits classés, d'une manière générale les courbes illustrent un bon ajustement du modèle aux débits à la station hydrométrique de chaque sous-bassin versant. Cela dit, le modèle avec la carte de type de sol (B) a surestimé les débits d'étiage et sous-estimé les débits de crues pour les sous-bassins Nelson (Annexe 21), Jaune et Des Hurons. Pour les sous-bassins Lorette (Annexe 22), Du Berger et Saint-Charles, semi-urbanisés, des tendances contraires ont été observées. C'est-à-dire que le modèle avec la carte de type de sol (B) a surestimé les débits de crues et sous-estimé les débits d'étiage.

À travers des analyses et comparaisons réalisées dans ce troisième objectif, on peut conclure que l'utilisation des données de types de sols plus détaillées dans la plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL pour le bassin versant de la rivière Saint-Charles n'influence pas les comportements hydrologiques des rivières du territoire. La forte urbanisation du sud du bassin associée au changement de type de sol apporté par la nouvelle classification (carte B) n'ont pas influencé significativement la performance du modèle. En analysant la combinaison de données plus précises de types de sol à l'utilisation des MNA à haute résolution spatiale, les résultats n'ont pas démontré d'amélioration significative de la modélisation des débits. Des travaux futurs devront être réalisés dans d'autres bassins versants naturels afin d'évaluer précisément la possible valeur ajoutée des types de sol dans le modèle HYDROTEL.

4.3.6 Sensibilité de la modélisation aux données d'entrée

Dans un premier temps, les jeux de paramètres utilisés pour les simulations avec les scénarios avec la carte de type de sol (A) ont été retenus et utilisés pour les simulations avec les scénarios avec la carte de type de sol (B) en respectant la même échelle spatiale. C'est-à-dire que les valeurs des paramètres calées dans le scénario 2 ont été placés dans le scénario 4 et celles des paramètres du scénario 8, placés dans le scénario 10. Par la suite, le contraire a été fait en prenant les jeux de paramètres obtenus dans les scénarios avec la carte de type de sol (B) et en les plaçant dans les scénarios avec la carte de type de sol (A) en respectant la même échelle spatiale. Après le changement des paramètres, les simulations ont été faites avec HYDROTEL en utilisant toute la période de données disponibles de chaque sous-bassin et ensuite les résultats ont été comparés.

Les résultats des indicateurs de performance illustrés au Tableau 4.23 montrent qu'en utilisant les jeux de paramètres des scénarios avec le type de sol (A) et en les plaçant dans les scénarios avec le type de sol (B) et en faisant dans le sens opposé, les performances du modèle ne se sont

pas améliorées de manière notable. On a remarqué par ailleurs des diminutions relatives significatives des valeurs de KGE pour le sous-bassin Du Berger dans les deux échelles spatiales.

Tableau 4.23 : Performance des modèles en fonction de la valeur ajoutée par le type de sol pour chaque sous-bassin.

Sous-Bassins	Type de sol (A) → (B)					Type de sol (B) → (A)				
	SC	RS	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)	SC	RS	KGE	P-BIAS (%)	RMSE (m ³ /s)
Des Hurons	2	20 m	0,80	-4,00	2,00	4	20 m	0,80	-2,00	2,02
	4-(2)		0,80	-4,00	2,00	2-(4)		0,80	-2,00	2,02
	8	5 m	0,82	-2,00	1,92	10	5 m	0,82	-2,00	1,89
	10-(8)		0,82	-2,00	1,93	8-(10)		0,83	-2,00	1,88
Jaune	2	20 m	0,67	-5,00	1,84	4	20 m	0,64	-1,00	2,04
	4-(2)		0,66	-5,00	1,90	2-(4)		0,60	-5,00	1,84
	8	5 m	0,67	-3,00	1,91	10	5 m	0,66	-3,00	1,96
	10-(8)		0,66	-3,00	1,92	8-(10)		0,66	-3,00	1,95
Nelson	2	20 m	0,88	5,00	0,82	4	20 m	0,88	3,00	0,81
	4-(2)		0,89	2,00	0,80	2-(4)		0,88	2,00	0,80
	8	5 m	0,85	6,00	0,91	10	5 m	0,87	5,00	0,88
	10-(8)		0,84	6,00	0,95	8-(10)		0,88	4,00	0,85
Lorette	2	20 m	0,87	-2,00	1,19	4	20 m	0,86	-5,00	1,18
	4-(2)		0,86	-1,00	1,24	2-(4)		0,83	-6,00	1,16
	8	5 m	0,85	1,00	1,30	10	5 m	0,84	2,00	1,35
	10-(8)		0,84	1,00	1,32	8-(10)		0,85	2,00	1,33
Du Berger	2	20 m	0,66	25,00	1,32	4	20 m	0,76	30,00	1,24
	4-(2)		0,50	61,00	1,76	2-(4)		0,47	33,00	1,34
	8	5 m	0,62	39,00	1,57	10	5 m	0,61	36,00	1,64
	10-(8)		0,51	39,00	1,63	8-(10)		0,53	56,00	1,84
Saint-Charles	2	20 m	0,65	30,00	7,29	4	20 m	0,63	33,00	7,75
	4-(2)		0,62	33,00	7,70	2-(4)		0,65	30,00	7,35
	8	5 m	0,66	28,00	7,04	10	5 m	0,66	28,00	7,16
	10-(8)		0,67	28,00	7,03	8-(10)		0,67	28,00	7,14

Afin d'explorer les similarités et différences de performance, on a examiné l'allure des hydrogrammes annuels moyens de chaque sous-bassin. Sur la base des pourcentages de changement de la texture du sol pour chacun des sous-bassins des scénarios décrits au Tableau

4.16 et au Tableau 4.17 de la section 4.3.1, on a choisi d'illustrer ici les hydrogrammes de débits moyens journaliers du sous-bassin Lorette qui a présenté des changements très significatifs (69% à 74 % de la superficie) des classes de textures de sol dans le territoire après la reclassification des polygones faite dans la carte de types de sols (B). La Figure 4.19 illustre les comportements des débits simulés du sous-bassin Lorette.

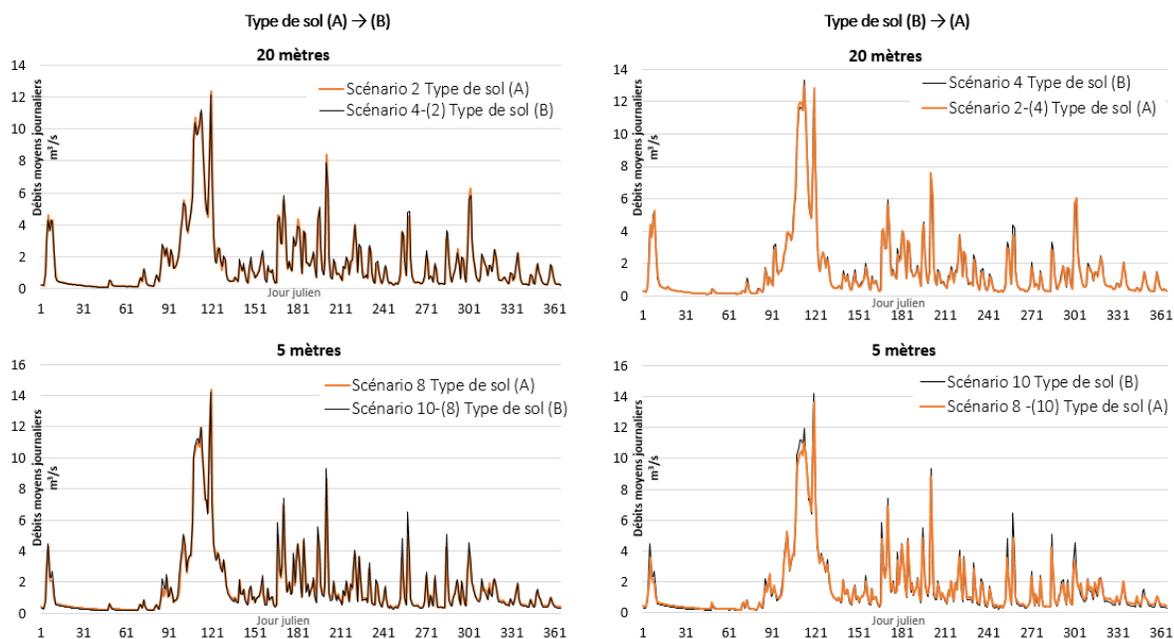


Figure 4.19 : Hydrogrammes annuels moyens suite au changement de paramètres pour le sous-bassin Lorette.

Les analyses préliminaires ont démontré des similarités très significatives du comportement des débits simulés au changement des valeurs de paramètres pour tous les sous-bassins. Les très légères différences trouvées dans les hydrogrammes ont été observées spécialement dans les débits de crues pendant toutes les saisons de l'année. Ces observations nous amènent à souligner que changement des cartes de types de sols HYDROTEL n'a pas apporté une contribution significative.

Les constats de cet objectif nous ont permis de dégager des conclusions importantes au niveau du changement de la résolution des données pédologiques et aussi des différentes sources de données utilisées dans la modélisation du bassin versant de la rivière Saint-Charles. Les résultats trouvés dans cette section ont démontré des différences significatives de la texture du sol lors de l'utilisation de sources de données différentes, mais des résultats similaires au niveau des comportements des débits produits par le modèle. Ces deux facteurs viennent à confirmer les résultats trouvés par Ye *et al.* (2011) et d'autres études citées à la section 2.3.

5 CONCLUSION

L'évaluation de l'utilisation de données à haute résolution spatiale sur la performance de la plateforme de simulation PHYSITEL/HYDROTEL a été la motivation principale de ce travail. Les effets et la valeur ajoutée des données physiographiques à haute résolution, tels que le MNA, le type de sol et le réseau hydrographique en tenant compte du système pluvial de drainage urbain, ont été analysés selon plusieurs points de vue afin de comprendre leurs impacts sur le comportement des débits des rivières d'un bassin pilote, celui de la rivière Saint-Charles et ses sous-bassin Des Hurons, Jaune, Nelson, Lorette, Du Berger et Saint-Charles. Plusieurs combinaisons de scénarios ont été créées avec le but d'évaluer l'influence de chaque donnée d'entrée sur la performance du modèle HYDROTEL. L'utilisation du système d'information géographique de la plateforme, PHYSITEL, a été un point d'importance sur les observations des caractéristiques physiographiques, c'est-à-dire la création des unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH). La performance du modèle pour les différents scénarios construits pour cette étude a été exhaustivement évaluée, en analysant les attributs topographiques, les hydrogrammes des débits moyens annuels, les courbes de débits classés associées à leur fréquence au non-dépassement, et les diagrammes en toile d'araignée des valeurs des paramètres.

L'évaluation de l'impact du MNA a fait l'objet du premier objectif de cette étude. À partir des analyses et des comparaisons réalisées, on a observé que les impacts des données à haute résolution spatiale dans la plateforme de modélisation PHYSITEL/ HYDROTEL se traduisent principalement sur les caractéristiques physiographiques des sous-bassins et sur le découpage en UHRH qui eux peuvent influencer sur les comportements des débits et sur les valeurs des paramètres de calage, sans toutefois affecter substantiellement sur la performance du modèle hydrologique.

Sur la base des analyses réalisées au deuxième objectif, relativement à l'ajout du système de drainage urbain (SDU), on a noté que l'impact de ce dernier dans la plateforme de modélisation PHYSITEL/ HYDROTEL se manifeste dans les comportements des débits des rivières et les valeurs des paramètres de calage. Le MNA à haute résolution s'avère une source de données importantes et en le combinant avec le SDU, il permet une amélioration significative pour les sous-bassins semi-urbanisés (ex. : sous-bassin Du Berger). Les résultats démontrent que l'utilisation de résolutions spatiales plus grossières influence les directions, les orientations d'écoulement de surface et les pentes des UHRH et ces effets sont beaucoup et souvent reflétés

dans le débit de crue au printemps. L'imperméabilisation du sol et la présence du SDU dans les bassins versants urbanisés sont responsables de la diminution des débits de base d'une rivière, spécialement pendant l'été et l'hiver. L'intégration du SDU à un MNA de 5 m de résolution spatiale a permis à HYDROTEL de se rapprocher davantage du volume d'eau écoulé dans la rivière pendant le printemps et l'été (amélioration autour de 15%). L'avantage apporté par le SDU dans le bassin versant Du Berger s'est avéré majeur si on considère le défi de modéliser ce sous-bassin semi-urbanisé avec seulement 34% des données hydrométriques observés disponibles.

À l'aide des analyses et des comparaisons réalisées au troisième objectif, on a observé que l'utilisation d'une carte de types de sol plus détaillée dans la plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL pour le bassin versant de la rivière Saint-Charles n'influence pas les comportements simulés des rivières présentes sur le territoire. La présence de l'urbanisation située dans le sud du bassin a démontré que le changement de type de sol apporté par la nouvelle classification n'a pas influencé significativement la performance du modèle dans les sous-bassins naturels et semi-urbanisés. En analysant la combinaison de données plus précises de types de sol à l'utilisation des MNA à haute résolution spatiale, de plus les résultats n'ont pas démontré des améliorations significatives.

On peut d'ores et déjà avancer que les conclusions dégagées de cette étude sont spécifiques à l'utilisation de la plateforme sur un bassin dont l'hydrologie est dominée par une fonte printanière substantielle. Cette caractéristique étant, la performance du modèle dépend largement de sa capacité à reproduire la crue printanière et donc des valeurs des paramètres du modèle qui la modulent. Par ailleurs, dans un modèle déterministe semi-distribué comme HYDROTEL, on peut en partie expliquer a priori quel pourrait être l'effet de données à hautes résolutions spatiales en étudiant l'influence des paramètres des équations directrices du modèle. Mais le nombre élevé de paramètres de calage vient en quelque sorte apporter un effet tampon sur la valeur ajoutée de ces données. Bien qu'il ne soit pas toujours possible de trouver tous les détails techniques d'un travail publié, la revue de littérature a permis d'illustrer que nos conclusions ne sont pas en contradiction avec celles émergeant de l'utilisation de données à hautes résolutions avec un autre modèle semi-distribué, le modèle SWAT. Enfin, les constats de cette étude apportent des éléments de réponse à plusieurs questions pertinentes pour le cas du bassin versant de la rivière Saint-Charles. Cependant, des travaux futurs sur d'autres bassins doivent être réalisés avant d'émettre des conclusions générales sur la valeur ajoutée de données à hautes résolutions spatiales dans l'utilisation de la plateforme de modélisation PHYSITEL/HYDROTEL.

6 BIBLIOGRAPHIE

- Adams D. S., Trauth K. M., Adhityawarma J., Peyton R. L. & Corrêa A. C. (2001) Water quality modeling for watershed management: using AGNPS 98 and satellite remote sensing image information. *ASCE World Water and Environmental Resources Congress*. p 20-24.
- APEL (2014) Guide d'introduction aux enjeux de la prise d'eau potable de la rivière Saint-Charles (Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord, Québec), p 12.
- APEL (2016) Lac Saint-Charles : suivi de l'état trophique et étude de la communauté cyanobactérienne – Faits saillants de la campagne d'échantillonnage 2015. (Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord, Québec), p 14.
- APEL (2017) Diagnose du lac Delage – 2016. (Association pour la protection de l'environnement du lac Saint-Charles et des Marais du Nord, Québec), p 60
- Ariza-Villaverde A. B., Jimenez-Hornero F. J. & de Rave E. G. (2015) Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis. *Geomorphology* 241:243-254.
- Arnold J. G., Williams J. R. & Maidment D. R. (1995) Continuous-Time Water and Sediment Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* 121(2):171-183.
- ASCE (1993) Criteria for Evaluation of Watershed Models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, p 429-442.
- Audet G., Bérubé D., Ducruc J.-P. & Gerardin V. (1997) Les cartes écologiques du bassin versant de la rivière Saint-Charles, Québec - Notice explicative. (Direction de la conservation et du patrimoine écologique - Ministère de l'Environnement et de la Faune), p 110.
- Beaulieu J., Dulude P., Falardeau I., Murray S. & Villeneuve C. (2014a) Cartographie détaillée des milieux humides du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (mise à jour 2013). (Canards Illimités Canada et le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec).
- Beaulieu J., Dulude P., Falardeau I., Murray S. & Villeneuve C. (2014b) Cartographie détaillée des milieux humides du territoire de la Communauté métropolitaine de Québec (mise à jour 2013) - Rapport technique. (Canards Illimités Canada et le Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs), p 54.
- Ben Nasr I. (2014) *Incertitudes sur les débits simulés par le modèle HYDROTEL attribuables aux incertitudes sur les paramètres. Application au bassin de la rivière Beaurivage, Québec, Canada.* (Institut National de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec). 94 p
- Berod D. D., Singh V. P., Devred D. & Musy A. (1995) A Geomorphologic Nonlinear Cascade (Gnc) Model for Estimation of Floods from Small Alpine Watersheds. *Journal of Hydrology* 166(1-2):147-170.
- Beven K. & Freer J. (2001) Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology* 249(1-4):11-29.

- Beven K. J. & Kirkby M. J. (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin* 24(1):43-69.
- Blanchette M., Rousseau A. N., Foulon E., Savary S. & Poulin M. (2019) What would have been the impacts of wetlands on low flow support and high flow attenuation under steady state land cover conditions? *Journal of Environmental Management* 234:448-457.
- Bloschl G., Sivapalan M., Gupta V., Beven K. & Lettenmaier D. (1997) Preface to the special section on scale problems in hydrology. *Water Resources Research* 33(12):2881-2881.
- Bormann H. (2006) Impact of spatial data resolution on simulated catchment water balances and model performance of the multi-scale TOPLATS model. *Hydrology and Earth System Sciences* 10(2):165-179.
- Bouda M., Rousseau A. N., Gumiere S. J., Gagnon P., Konan B. & Moussa R. (2014) Implementation of an automatic calibration procedure for HYDROTEL based on prior OAT sensitivity and complementary identifiability analysis. *Hydrological Processes* 28(12):3947-3961.
- Bouda M., Rousseau A. N., Konan B., Gagnon P. & Gumiere S. J. (2012) Bayesian Uncertainty Analysis of the Distributed Hydrological Model HYDROTEL. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(9):1021-1032.
- Bouilloud L., Chancibault K., Vincendon B., Ducrocq V., Habets F., Saulnier G. M., Anquetin S., Martin E. & Noilhan J. (2010) Coupling the ISBA Land Surface Model and the TOPMODEL Hydrological Model for Mediterranean Flash-Flood Forecasting: Description, Calibration, and Validation. *Journal of Hydrometeorology* 11(2):315-333.
- Brasington J. & Richards K. (1998) Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for topmodel. *Computers & Geosciences* 24(4):299-314.
- Bruneau P., Gascuelodoux C., Robin P., Merot P. & Beven K. (1995) Sensitivity to Space and Time Resolution of a Hydrological Model Using Digital Elevation Data. *Hydrological Processes* 9(1):69-81.
- Campbell G. S. (1974) A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Science* 117(6):311-314.
- Chaplot V. (2005) Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. *Journal of Hydrology* 312(1-4):207-222.
- Chaplot V. (2014) Impact of spatial input data resolution on hydrological and erosion modeling: Recommendations from a global assessment. *Physics and Chemistry of the Earth* 67-69:23-35.
- Chaplot V., Walter C. & Curmi P. (2000) Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma* 97(3-4):405-422.
- Chaubey I., Cotter A. S., Costello T. A. & Soerens T. S. (2005) Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes* 19(3):621-628.
- Chiew F. H. S. & McMahon T. A. (1993) Assessing the Adequacy of Catchment Streamflow Yield Estimates. *Australian Journal of Soil Research* 31(5):665-680.
- Clapp R. B. & Hornberger G. M. (1978) Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research* 14(4):601-604.

- Cochrane T. A. & Flanagan D. C. (2005) Effect of DEM resolutions in the runoff and soil loss predictions of the WEPP watershed model. *Transactions of the Asae* 48(1):109-120.
- Corwin D. L., Loague K. & Corwin D. L. (1996) GIS Applications of Deterministic Solute Transport Models for Regional-Scale Assessment of Non-Point Source Pollutants in the Vadose Zone. *Applications of GIS to the Modeling of Non-Point Source Pollutants in the Vadose Zone*, (SSSA Special Publication: 10.2136/sssaspecpub48.c5. p 69-100.
- Davenport I. J., Silgram M., Robinson J. S., Lamb A., Settle J. J. & Willig A. (2003) The use of earth observation techniques to improve catchment-scale pollution predictions. *Physics and Chemistry of the Earth* 28(33-36):1365-1376.
- Dehviri A. & Heck R. J. (2013) Effect of LiDAR derived DEM resolution on terrain attributes, stream characterization and watershed delineation. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 6:949-967.
- Deng Y., Wilson J. P. & Bauer B. O. (2007) DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape. *International Journal of Geographical Information Science* 21(1-2):187-213.
- Dissanska M., Bernier M. & Payette S. (2009) Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands. *Canadian Journal of Remote Sensing* 35(2):189-215.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI) (2017) ArcGIS for Desktop. Redlands, California, USA).
- Falorni G., Teles V., Vivoni E. R., Bras R. L. & Amaratunga K. S. (2005) Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface* 110(F2).
- Famiglietti J. S. & Wood E. F. (1994) Multiscale Modeling of Spatially-VARIABLE Water and Energy-Balance Processes. *Water Resources Research* 30(11):3061-3078.
- Farajalla N. S. & Vieux B. E. (1995) Capturing the Essential Spatial Variability in Distributed Hydrological Modeling - Infiltration Parameters. *Hydrological Processes* 9(1):55-68.
- FitzHugh T. W. & Mackay D. S. (2000) Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. *Journal of Hydrology* 236(1-2):35-53.
- Fortin J. P. & Royer A. (2004) Le modèle hydrologique HYDROTEL Bases théoriques. Guide théorique adressé aux utilisateurs du modèle hydrologique HYDROTEL. (INRS-ETE), p 104.
- 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.
- Fossey M., Rousseau A. N., Bensalma F., Savary S. & Royer A. (2015) Integrating isolated and riparian wetland modules in the PHYSITEL/HYDROTEL modelling platform: model performance and diagnosis. *Hydrological Processes* 29(22):4683-4702.
- Foulon E. & Rousseau A. N. (2018) Equifinality and automatic calibration: What is the impact of hypothesizing an optimal parameter set on modelled hydrological processes? *Canadian Water Resources Journal* 43(1):47-67.
- Gaume E., Borga M., Llassat M. C., Maouche S., Lang M. & Diakakis M. (2016) Mediterranean extreme floods and flash floods. *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*, Ird (Édit.). p 133-144.

- Geza M. & McCray J. E. (2008) Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management* 88(3):393-406.
- Groupe de travail sur les Pédopaysages du Canada (2010) Pédopaysages du Canada. Édité Agriculture et Agroalimentaire Canada).
- Hanief A. & Laursen A. (2019) Modeling the Natural Drainage Network of the Grand River in Southern Ontario: Agriculture May Increase Total Channel Length of Low-Order Streams. *Geosciences* 9(1) 155.
- Houghton–Carr H. A. (1999) Assessment criteria for simple conceptual daily rainfall–runoff models. *Journal Hydrology Sciences* 44(2):237-261.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, p 155.
- Kalin L., Govindaraju R. S. & Hantush M. M. (2003) Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds. *Journal of Hydrology* 276(1-4):89-111.
- Kenward T., Lettenmaier D. P., Wood E. F. & Fielding E. (2000) Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. *Remote Sensing of Environment* 74(3):432-444.
- Kling H., Fuchs M. & Paulin M. (2012) Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424:264-277.
- Legates D. R. & McCabe G. J. (1999) Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1):233-241.
- Levick L. R., Semmens D. J., Guertin D. P., Burns I. S., Scott S. N., Unkrich C. L. & Goodrich D. C. (2004) Adding Global Soils Data to the Automated Geospatial Watershed Assessment Tool (AGWA). *Proceedings of the Second International Symposium on Transboundary Waters Management*. (Tucson, AZ, 16–19 November 2004), p 8.
- Li R. K., Zhu A. X., Song X. F., Li B. L., Pei T. & Qin C. Z. (2012) Effects of spatial aggregation of soil spatial information on watershed hydrological modelling. *Hydrological Processes* 26(9):1390-1404.
- Lin K. R., Zhang Q. A. & Chen X. H. (2010) An evaluation of impacts of DEM resolution and parameter correlation on TOPMODEL modeling uncertainty. *Journal of Hydrology* 394(3-4):370-383.
- Linacre E. T. (1977) A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology* 18(6):409-424.
- Liu Y. B., Gebremeskel S., De Smedt F., Hoffmann L. & Pfister L. (2003) A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modelling. *Journal of Hydrology* 283(1-4):91-106.
- Lobligeois F. (2014) Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues? Diagnostic sur 181 bassins versants français. (AgroParisTech, Irstea).
- Lovat A., Vincendon B. & Ducrocq V. (2019) Assessing the impact of resolution and soil datasets on flash-flood modelling. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(3):1801-1818.

- MacMillan R. A., Martin T. C., Earle T. J. & McNabb D. H. (2003) Automated analysis and classification of landforms using high-resolution digital elevation data: applications and issues. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(5):592-606.
- Melsen L. A., Teuling A. J., Torfs P. J. J. F., Zappa M., Mizukami N., Mendoza P. A., Clark M. P. & Uijlenhoet R. (2019) Subjective modeling decisions can significantly impact the simulation of flood and drought events. *Journal of Hydrology* 568:1093-1104.
- Ministry of Sustainable Development the Environment and the Fight Against Climate Change (2017) Daily hydrometric data at station 050904. http://www.cehq.gouv.qc.ca/depot/historique_donnees/fichier/050904_Q.txt (Consulté le mars 17,2019)
- Mitas L. & Mitasova H. (1998) Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research* 34(3):505-516.
- Mitasova H., Hofierka J., Zlocha M. & Iverson L. R. (1996) Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International journal of geographical information systems* 10(5):629-641.
- Mitasova H., Mitas L., Brown W. M., Gerdes D. P., Kosinovsky I. & Baker T. (1995) Modeling Spatially and Temporally Distributed Phenomena - New Methods and Tools for Grass Gis. *International journal of geographical information systems* 9(4):433-446.
- Moeys J. (2014) The soil texture wizard: R functions for plotting, classifying, transforming and exploring soil texture data. https://cran.r-project.org/web/packages/soiltexture/vignettes/soiltexture_vignette.pdf (Consulté le Mars 15, 2019)
- Monteith J. L. (1965) Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology* 19:205-234.
- Moriasi D. N., Arnold J. G., Van Liew M. W., Bingner R. L., Harmel R. D. & Veith T. L. (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900.
- Muttiah R. S. & Wurbs R. A. (2002) Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model. *Journal of Hydrology* 256(3-4):264-285.
- Nagaveni C., Kumar K. P. & Ravibabu M. V. (2019) Evaluation of TanDEMx and SRTM DEM on watershed simulated runoff estimation. *Journal of Earth System Science* 128(1).
- Nazari-Sharabian M., Karakouzian M. & Ahmad S. (2019) Effect of DEM Resolution on Runoff Yield, and 3 Sensitivity of Parameters Contributing to Runoff in a 4 Watershed. *Journal Hydrology Sciences*. 10.20944/preprints201901.0192.v1.
- Ndomba P. M. & Birhanu B. Z. (2008) Problems and Prospects of SWAT Model Applications in NILOTIC Catchments: A Review. *Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine* 1:41-52.
- Noël P., Rousseau A. N., Paniconi C. & Nadeau D. F. (2014) Algorithm for Delineating and Extracting Hillslopes and Hillslope Width Functions from Gridded Elevation Data. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(2):366-374.
- Ocallaghan J. F. & Mark D. M. (1984) The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision Graphics and Image Processing* 28(3):323-344.
- Olden J. D. & Poff N. L. (2003) Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Research and Applications* 19(2):101-121.

- Osuch M., Romanowicz R. J. & Booij M. J. (2015) The influence of parametric uncertainty on the relationships between HBV model parameters and climatic characteristics. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques* 60(7-8):1299-1316.
- Patoine M. & Fortin J. P. (1992) Ajustement d'un modèle informatisé de gestion de l'irrigation. *Canadian Agricultural Engineering* 34(4):305-317.
- Paul D., Mandla V. R. & Singh T. (2017) Quantifying and modeling of stream network using digital elevation models. *Ain Shams Engineering Journal* 8(3):311-321.
- Pool S., Vis M. & Seibert J. (2018) Evaluating model performance: towards a non-parametric variant of the Kling-Gupta efficiency. *Journal Des Sciences Hydrologiques* 63(13-14):1941-1953.
- Priestley C. H. B. & Taylor R. J. (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review* 100:81-92.
- Québec (2017) Données hydrométriques journalières à la station 050904. *Ministry of Sustainable Development the Environment and the Fight Against Climate Change, Québec.*
- Raimbault A., Poulin M. & Cimon-Morin J. (2016a) *Carte d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Saint-Charles pour l'année 1965*. Université Laval, Québec, Canada,
- Raimbault A., Poulin M. & Cimon-Morin J. (2016b) *Carte d'occupation du sol du bassin versant de la rivière Saint-Charles pour l'année 2014*. Université Laval, Québec, Canada,
- Ramadhari S., Mal B. C. & Tiwari K. N. (2012) Effect of Spatial Resolution on Watershed Characteristics and the AGNPS Model Hydrologic Simulations. in *21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment Conference Proceedings, May 27-June 1, 2012, Bari, Italy*.
- Rawls W. J. & Brakensiek D. L. (1989) " Estimation of soil water retention and hydraulic properties" in *Unsaturated flow in hydrologic modeling: Theory and practice. NATO Advanced Research Workshop (ARW). Series C: Mathematical and physical sciences.* H.J. Morel-Seytoux (Édit.) Kluwer Academic, Boston, p 275–300.
- Ressources naturelles Canada (2013) *Modèle numérique d'élévation du Canada*.
- Reusser D. E., Blume T., Schaeffli B. & Zehe E. (2009) Analysing the temporal dynamics of model performance for hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences* 13(7):999-1018.
- 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. *Water News - Official Magazine of the Canadian Water Resources Association* 31(1):18-20.
- Rousseau A. N., Savary S. & Royer A. (2009) Étude de risques de contamination de la prise d'eau de Château-d'Eau, située dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles, Ville de Québec. (INRS-ETE, Québec).
- Santos L., Thirel G. & Perrin C. (2018) Technical note: Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 10.5194/hess-2018-298:1-14.
- Singh J., Knapp H. V. & Demissie M. (2004) *Hydrologic modeling of the iroquois river watershed using HSPF and SWAT*. Illinois State Water Survey, Champaign, Illinois,

- Singh V. P. & Woolhiser D. A. (2002) Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering* 7(4):270-292.
- Sorensen R. & Seibert J. (2007) Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components. *Journal of Hydrology* 347(1-2):79-89.
- Suliman A. H. A., Katimon A., Darus I. Z. M. & Shahid S. (2016) TOPMODEL for Streamflow Simulation of a Tropical Catchment Using Different Resolutions of ASTER DEM: Optimization Through Response Surface Methodology. *Water Resources Management* 30(9):3159-3173.
- Teng J., Vaze J., Tuteja N. K. & Gallant J. C. (2008) A GIS-Based Tool for Spatial and Distributed Hydrological Modelling: CLASS Spatial Analyst. *Transactions in Gis* 12(2):209-225.
- Thompson J. A., Bell J. C. & Butler C. A. (2001) Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma* 100 (1-2):67-89.
- Thornthwaite C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38:55-94.
- Tolson B. A. & Shoemaker C. A. (2007) Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research* 43(1).
- 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.
- Turcotte R., Fortin L. G., Fortin V., Fortin J. P. & Villeneuve J. P. (2007) Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Quebec, Canada. *Nordic Hydrology* 38(3):211-234.
- Turcotte R., Lacombe P., Dimnik C. & Villeneuve J. P. (2004) Distributed hydrological prediction for the management of Quebec's public dams. *Canadian Journal of Civil Engineering* 31(2):308-320.
- Turcotte R., Rousseau A. N., Fortin J.-P. & Villeneuve J.-P. (2003) A Process-Oriented, Multiple-Objective Calibration Strategy Accounting for Model Structure. *Calibration of Watershed Models*, Duan Q, Gupta HV, Sorooshian S, Rousseau AN & Turcotte R (Édit.) American Geophysical Union, Washington, D. C. p 153-163.
- Usery E. L., Finn M. P., Scheidt D. J., Ruhl S., Beard T. & Bearden M. (2004) Geospatial data resampling and resolution effects on watershed modeling: A case study using the agricultural non-point source pollution model. *Journal of Geographical Systems* 6(3):289-306.
- Vaze J., Teng J. & Spencer G. (2010) Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices. *Environmental Modelling & Software* 25(10):1086-1098.
- Vieux B. E. & Needham S. (1993) Nonpoint-Pollution Model Sensitivity to Grid-Cell Size. *Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE* 119(2):141-157.
- Vincendon B., Edouard S., Dewaele H., Ducrocq V., Lespinas F., Delrieu G. & Anquetin S. (2016) Modeling flash floods in southern France for road management purposes. *Journal of Hydrology* 541:190-205.
- W. Chu T., Shirmohammadi A., Montas H. & Sadeghi A. (2004) Evaluation of the SWAT model's sediment and nutrient components in the piedmont physiographic region of Maryland. *Transactions of the ASAE* 47(5):1523-1538.

- Wang X. & Melesse A. M. (2007) Effects of STATSGO and SSURGO as Inputs on SWAT Model's Snowmelt Simulation. *Journal of the American Water Resources Association* 42(5):1217-1236.
- Wheater H. S., Jakeman A. J. & Beven K. J. (1993) Progress and directions in rainfall-runoff modelling. *Modelling Change in Environmental Systems*, Jakeman AJ, Beck MB & Mcaleer MJ (Édit.). p 101-132.
- Wilcoxon F. (1945) Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin* 1(6).
- Woolhiser D. A., Smith R. E. & Goodrich D. C. (1990) KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. Édit Agriculture USDO, p 130
- Wu M., Shi P., Chen A., Shen C. & Wang P. Y. (2017) Impacts of DEM resolution and area threshold value uncertainty on the drainage network derived using SWAT. *Water SA* 43(3):450-462.
- Wu S.-s., Usery L. E., Finn M. P. & Bosch D. D. (2008a) An Assessment of the Effects of Cell Size on AGNPS Modeling of Watershed Runoff. *Cartography and Geographic Information Science* 35(4):265-278.
- Wu S., Li J. & Huang G. H. (2008b) A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. *Applied Geography* 28(3):210-223.
- Wu W., Fan Y., Wang Z. & Liu H. (2008c) Assessing effects of digital elevation model resolutions on soil–landscape correlations in a hilly area. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 126(3-4):209-216.
- Xu J., Ren L. L., Yuan F. & Liu X. F. (2012) The solution to DEM resolution effects and parameter inconsistency by using scale-invariant TOPMODEL. *Hydrology Research* 43(1-2):146-155.
- Yang P., Ames D. P., Glenn N. F. & Anderson D. (2010) Effects of LiDAR Derived DEM Resolution on Hydrographic Feature Extraction.
- Yapo P. O., Gupta H. V. & Sorooshian S. (1996) Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology* 181(1-4):23-48.
- Ye X., Zhang Q. & Viney N. R. (2011) The effect of soil data resolution on hydrological processes modelling in a large humid watershed. *Hydrological Processes* 25(1):130-140.
- Young R. A., Onstad C. A., Bosch D. D. & Anderson W. P. (1989) AGNPS: A Non-Point-Source Pollution Model for Evaluating Agricultural Watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation Society* 44(2):168-173.
- Zhang W. H. & Montgomery D. R. (1994) Digital Elevation Model Grid Size, Landscape Representation, and Hydrologic Simulations. *Water Resources Research* 30(4):1019-1028.
- Zhang X., Feng, Z.-D. (2004) Scale effects of DEM on erosion potentials in the western Chinese Loess Plateau. in *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, p 4636-4639.
- Zhang X. Y., Drake N. A., Wainwright J. & Mulligan M. (1999) Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: Scaling issues and a fractal method for their solution. *Earth Surface Processes and Landforms* 24(9):763-779.

Zhao G. J., Hörmann G., Fohrer N. & Gao J. F. (2009) Impacts of spatial data resolution on simulated discharge, a case study of Xitiaoxi catchment in South China. *Advanced Geosciences*. 21:131-137.

7 ANNEXE

Annexe 1 : Valeurs des paramètres fixés pour tous les sous-bassins.

Paramètres	Des Hurons	Jaune	Nelson	Lorette	Du Berger	Saint-Charles
Gradient vertical des précipitations (mm/100m)				0		
Gradient vertical de la température (°C/100m)				-0,5		
Taux de fonte neige-sol (mm/jour)				0,59		
Densité maximal du couvert nival (kg/m ³)				466		
Constante de tassement de la neige				0,001		
Seuil Albédo				1		
Limite inférieure couche 3 (m)				1		
Humidité relative initiale couche 1				0,75		
Humidité relative initiale couche 2				0,75		
Humidité relative initiale couche 3				0,75		
Coefficient d'extinction				0,6		
Coefficient multiplicatif d'optimisation de l'assèchement				1		
Variation maximale de l'humidité relative par pas de temps				0,3		
Coefficient additif d'optimisation du type du sol	-1	-1	0	0	-3	-1
Coefficient de Manning forêts				0,1		
Coefficient de Manning eau				0,015		
Coefficient de Manning autres milieux				0,04		
Hauteur de la lame d'eau de référence pour le calcul des HGM (m)				0,006		
Coefficient d'optimisation de la rugosité				1		
Coefficient d'optimisation des largeurs de rivières				1		

Annexe 2 : Les jeux de paramètres trouvés avec le calage automatique pour les scénarios (2, 6, 8) pour les sous-bassins Des Hurons, Jaune et Nelson, sans la présence du SDU.

Des Hurons		Sans SDU		
Paramètres	20 m (2)	10 m (6)	5 m (8)	
A	-1,83	-1,92	-1,81	
B	10,17	7,90	9,62	
C	4,35	2,68	3,32	
D	8,58	8,64	10,20	
E	0,73	0,89	1,04	
F	11,41	11,50	13,57	
G	-0,23	-0,07	0,08	
H	0,47	0,49	0,49	
I	0,06	0,06	0,06	
J	0,10	0,11	0,11	
K	9,1E-08	4,0E-07	1,7E-06	

Jaune		Sans SDU		
Paramètres	20 m	10 m	5 m	
A	-1,63	-1,14	-1,07	
B	3,99	2,60	3,00	
C	-0,75	0,41	-0,85	
D	3,90	3,90	3,09	
E	-1,73	-1,73	-2,51	
F	5,19	5,19	4,37	
G	-2,68	-2,68	-3,46	
H	0,77	0,81	0,76	
I	0,03	0,06	0,03	
J	0,15	0,12	0,15	
K	1,1E-07	2,0E-07	8,7E-08	

Nelson		Sans SDU		
Paramètres	20 m	10 m	5 m	
A	0,40	0,41	0,76	
B	3,59	5,69	7,32	
C	1,26	1,21	1,43	
D	6,58	7,72	9,10	
E	-0,90	-0,77	-0,65	
F	8,74	10,27	12,11	
G	-1,85	-1,72	-1,61	
H	0,78	0,74	0,74	
I	0,04	0,04	0,08	
J	0,44	0,46	0,46	
K	7,8E-07	3,6E-07	2,8E-07	

A: Température de passage pluie neige (°C); **B:** Taux de fonte dans l'air (conifères) (mm/jour); **C:** Seuil de température de fonte (conifères) (°C); **D:** Taux de fonte dans l'air (feuillus) (mm/jour); **E:** Seuil de température de fonte (feuillus) (°C); **F:** Taux de fonte dans l'air (milieux ouverts) (mm/jour); **G:** Seuil de température de fonte (milieux ouverts) (°C); **H:** Coefficient multiplicatif ETP; **I:** Épaisseur couche 1; **J:** Épaisseur couche 2; **K:** Coefficient de récession (m/h)

Annexe 3 : Les jeux de paramètres trouvés avec le calage automatique pour les scénarios (2, 6, 8) pour les sous-bassins Lorette, Du Berger et Saint-Charles sans la présence du SDU.

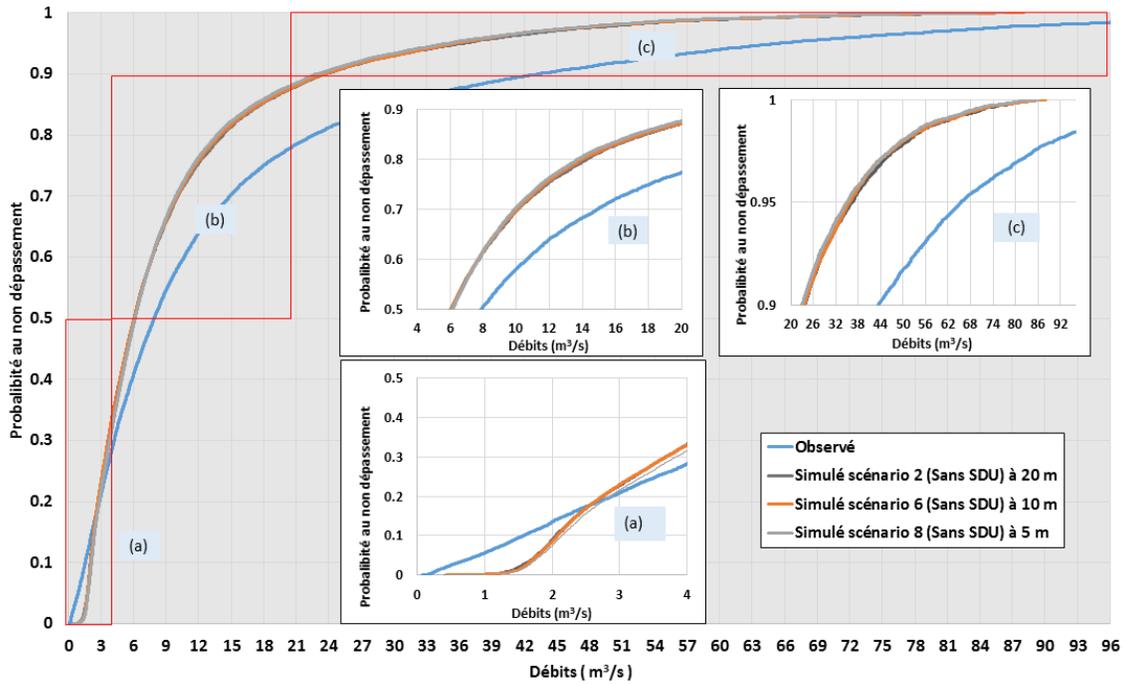
Lorette		Sans SDU		
Paramètres	20 m (2)	10 m (6)	5 m (8)	
A	2,00	2,79	2,65	
B	5,63	6,38	8,40	
C	1,31	-0,84	2,70	
D	6,62	5,87	7,38	
E	-0,77	-1,31	-0,13	
F	8,80	7,81	9,81	
G	-1,73	-2,27	-1,08	
H	0,86	0,93	1,00	
I	0,02	0,03	0,50	
J	0,09	0,07	0,40	
K	2,0E-06	1,5E-05	8,0E-07	

Du Berger		Sans SDU		
Paramètres	20 m	10 m	5 m	
A	-5,00	-5,00	-4,86	
B	16,27	4,18	12,35	
C	3,29	6,87	4,28	
D	13,56	7,18	10,30	
E	-0,04	2,46	2,98	
F	18,04	9,54	13,69	
G	-0,99	1,50	2,03	
H	1,00	1,00	1,00	
I	0,00	0,00	0,07	
J	0,04	0,07	0,22	
K	9,7E-08	3,2E-07	8,2E-05	

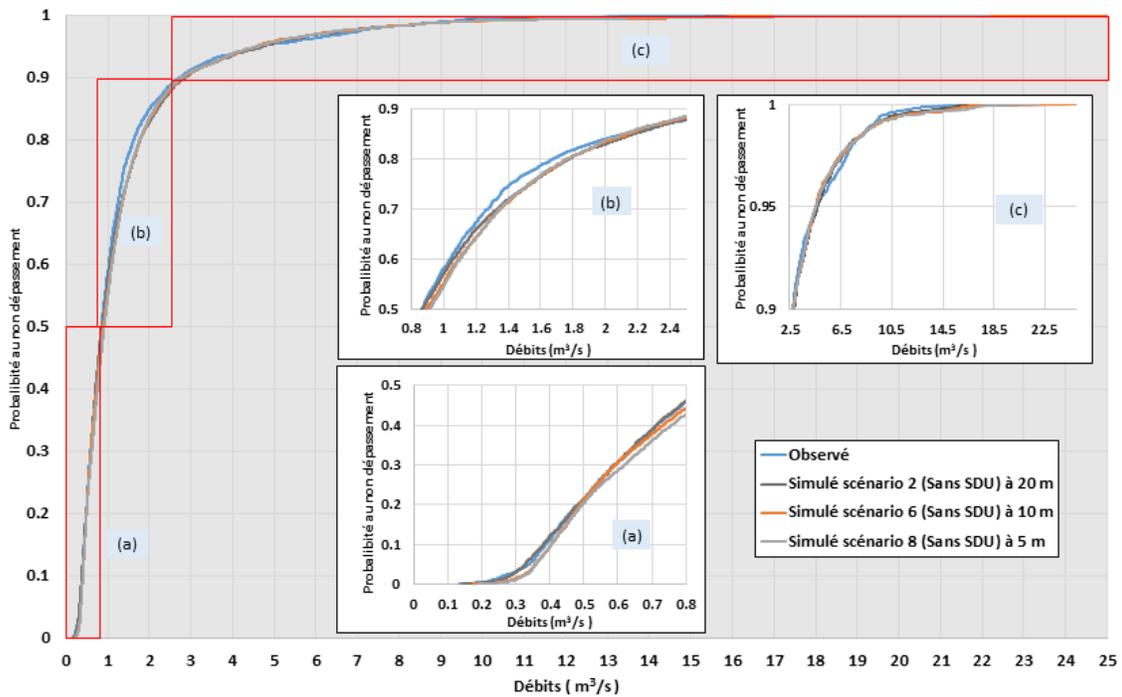
Saint-Charles		Sans SDU		
PA	20 m	10 m	5 m	
A	4,17	3,03	3,04	
B	17,46	11,16	8,44	
C	3,97	6,32	3,42	
D	14,55	13,18	11,53	
E	2,33	3,00	2,17	
F	19,35	17,52	15,33	
G	1,37	2,04	1,22	
H	1,00	1,00	1,00	
I	0,02	0,03	0,04	
J	0,06	0,06	0,10	
K	1,6E-07	1,0E-07	9,1E-08	

A: Température de passage pluie neige (°C); **B:** Taux de fonte dans l'air (conifères) (mm/jour); **C:** Seuil de température de fonte (conifères) (°C); **D:** Taux de fonte dans l'air (feuillus) (mm/jour); **E:** Seuil de température de fonte (feuillus) (°C); **F:** Taux de fonte dans l'air (milieux ouverts) (mm/jour); **G:** Seuil de température de fonte (milieux ouverts) (°C); **H:** Coefficient multiplicatif ETP; **I:** Épaisseur couche 1; **J:** Épaisseur couche 2; **K:** Coefficient de récession (m/h)

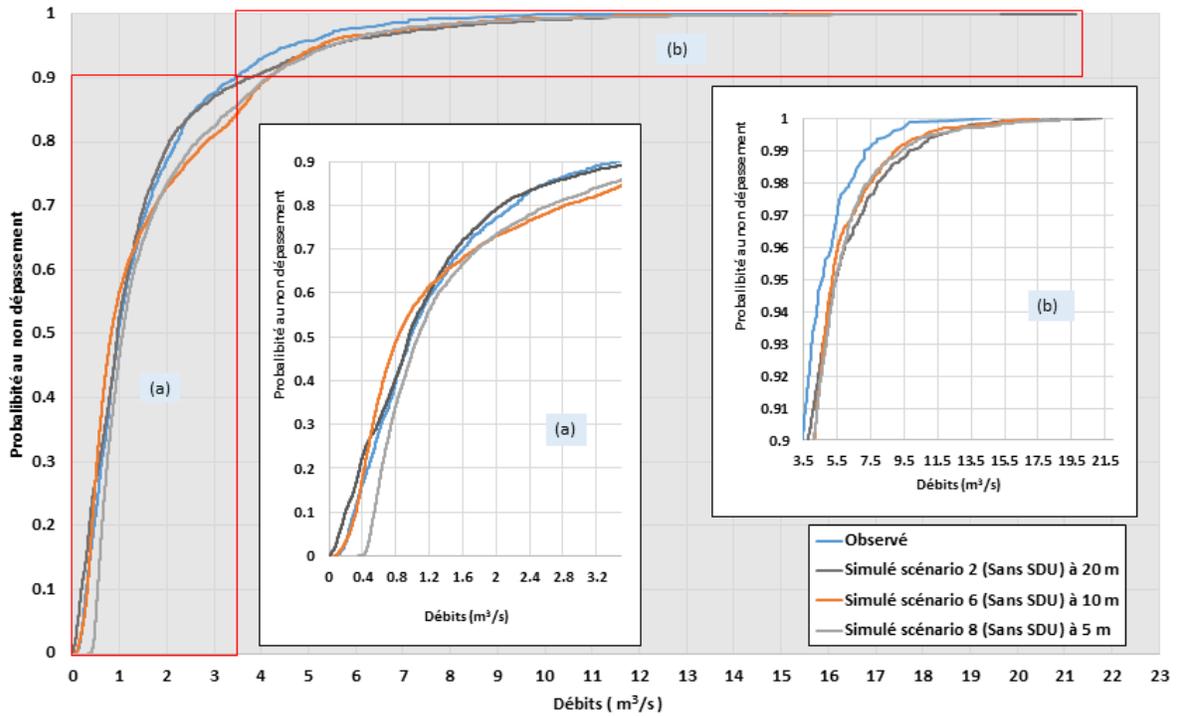
Annexe 4 : Débits classés du sous-bassin Saint-Charles en comparant les scénarios à différentes échelles spatiales.



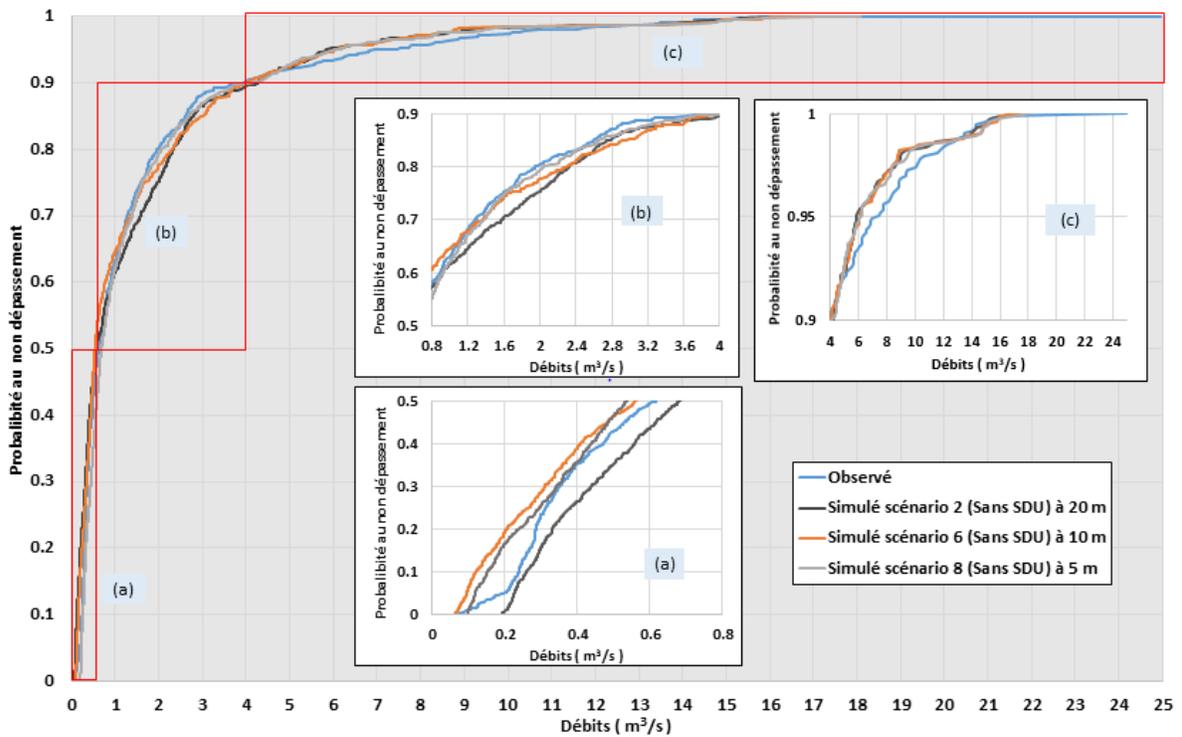
Annexe 5 : Débits classés du sous-bassin Nelson en comparant les scénarios à différentes échelles spatiales.



Annexe 6 : Débits classés du sous-bassin Du Berger en comparant les scénarios à différentes échelles spatiales.



Annexe 7 : Débits classés du sous-bassin Lorette en comparant les scénarios à différentes échelles spatiales.



Annexe 8 : Les valeurs de chaque paramètre entre les paires de scénarios avec et sans le SDU à trois échelles spatiales pour les sous-bassins Nelson, Lorette et Du Berger.

Nelson	20 m		10 m		5 m	
	+ SDU	- SDU	+ SDU	- SDU	+ SDU	- SDU
Paramètres						
A	-2,11	0,40	0,01	0,41	-1,62	0,76
B	10,81	3,59	6,24	5,69	5,43	7,32
C	5,90	1,26	1,71	1,21	1,92	1,43
D	9,01	6,58	6,86	7,72	10,86	9,10
E	1,23	-0,90	-0,82	-0,77	1,44	-0,65
F	11,98	8,74	9,13	10,27	14,45	12,11
G	0,28	-1,85	-1,78	-1,72	0,48	-1,61
H	0,79	0,78	0,77	0,74	0,78	0,74
I	0,09	0,04	0,08	0,04	0,08	0,08
J	0,29	0,44	0,40	0,46	0,34	0,46
K	2E-06	8E-07	9E-08	4E-07	2E-07	3E-07

Lorette	20 m		10 m		5 m	
	+ SDU	- SDU	+ SDU	- SDU	+ SDU	- SDU
Paramètres						
A	2,59	2,00	1,48	2,79	0,18	2,65
B	6,55	5,63	7,05	6,38	12,27	8,40
C	0,23	1,31	0,97	-0,84	2,73	2,70
D	5,87	6,62	6,31	5,87	10,28	7,38
E	-1,49	-0,77	-0,75	-1,31	1,97	-0,13
F	7,81	8,80	8,39	7,81	13,67	9,81
G	-2,44	-1,73	-1,71	-2,27	1,01	-1,08
H	1,00	0,86	1,00	0,93	0,97	1,00
I	0,02	0,02	0,06	0,03	0,08	0,50
J	0,08	0,09	0,10	0,07	0,60	0,40
K	3E-05	2E-06	5E-05	2E-05	6E-08	8E-07

Du Berger	20 m		10 m		5 m	
	+ SDU	- SDU	+ SDU	- SDU	+ SDU	- SDU
Paramètres						
A	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-5,00	-4,86
B	2,00	16,27	6,39	4,18	3,82	12,35
C	1,90	3,29	3,97	6,87	5,23	4,28
D	4,91	13,56	9,43	7,18	3,22	10,30
E	-0,39	-0,04	3,00	2,46	0,23	2,98
F	6,53	18,04	12,54	9,54	4,28	13,69
G	-1,35	-0,99	2,04	1,50	-0,73	2,03
H	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
I	0,41	0,00	0,09	0,00	0,07	0,07
J	0,85	0,04	0,15	0,07	0,17	0,22
K	4E-05	1E-07	1E-04	3E-07	1E-07	8E-05

A: Température de passage pluie neige (°C); B: Taux de fonte dans l'air (conifères) (mm/jour); C: Seuil de température de fonte (conifères) (°C); D: Taux de fonte dans l'air (feuillus) (mm/jour); E: Seuil de température de fonte (feuillus) (°C); F: Taux de fonte dans l'air (milieux ouverts) (mm/jour); G: Seuil de température de fonte (milieux ouverts) (°C); H: Coefficient multiplicatif ETP; I: Épaisseur couche 1; J: Épaisseur couche 2; K: Coefficient de récession (m/h)

Annexe 9 : Les valeurs de chaque paramètre entre les paires de scénarios avec et sans le SDU à trois échelles spatiales pour le sous-bassin Saint-Charles.

St. Charles	20 m		10 m		5 m	
	+ SDU	- SDU	+ SDU	- SDU	+ SDU	- SDU
A	2,82	4,17	4,10	3,03	3,66	3,04
B	5,13	17,46	14,73	11,16	13,60	8,44
C	3,25	3,97	2,84	6,32	4,57	3,42
D	6,38	14,55	14,69	13,18	12,37	11,53
E	1,63	2,33	2,71	3,00	2,86	2,17
F	8,49	19,35	19,54	17,52	16,45	15,33
G	0,67	1,37	1,75	2,04	1,90	1,22
H	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
I	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04
J	0,08	0,06	0,20	0,06	0,12	0,10
K	7E-07	2E-07	1E-07	1E-07	2E-07	9E-08

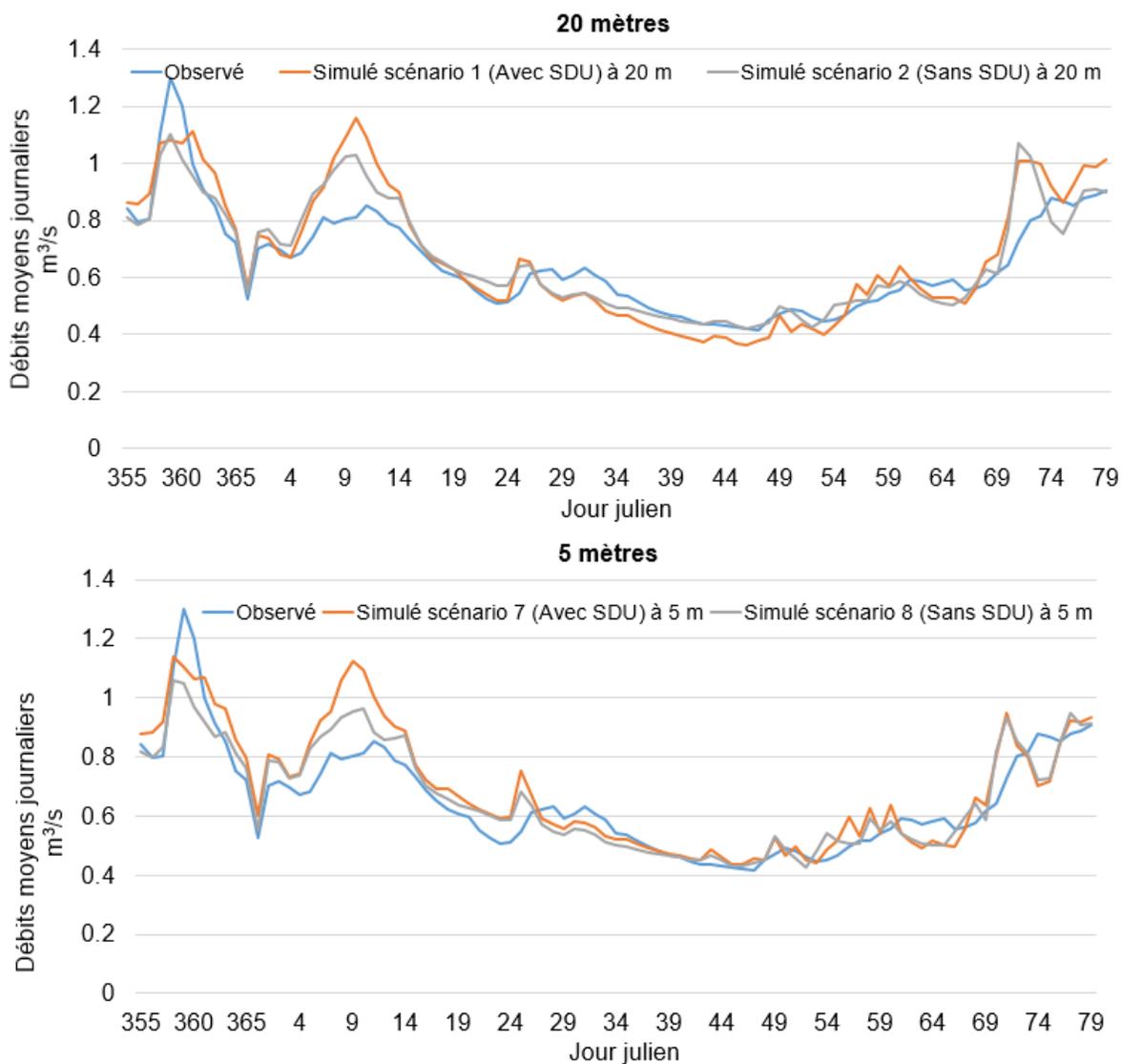
A: Température de passage pluie neige (°C); **B:** Taux de fonte dans l'air (conifères) (mm/jour); **C:** Seuil de température de fonte (conifères) (°C); **D:** Taux de fonte dans l'air (feuillus) (mm/jour); **E:** Seuil de température de fonte (feuillus) (°C); **F:** Taux de fonte dans l'air (milieux ouverts) (mm/jour); **G:** Seuil de température de fonte (milieux ouverts) (°C); **H:** Coefficient multiplicatif ETP; **I:** Épaisseur couche 1; **J:** Épaisseur couche 2; **K:** Coefficient de récession (m/h)

Annexe 10 : Carré des erreurs entre les débits observés et simulés avec et sans le SDU pour chaque sous-bassin des paires des scénarios à la même résolution spatiale.

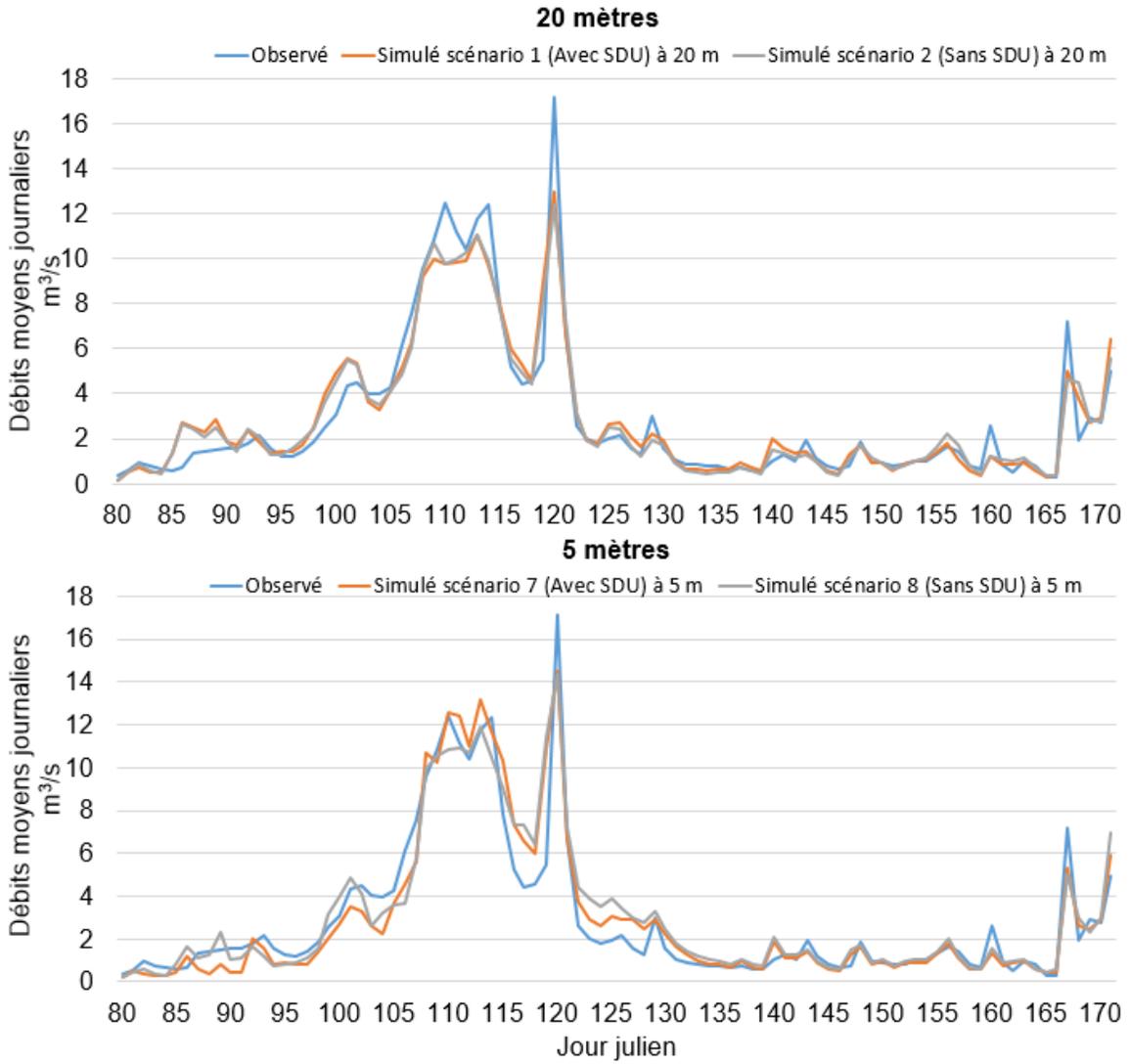
Nelson				
	20 mètres		5 mètres	
Session	Avec SDU (1)	Sans SDU (2)	Avec SDU (7)	Sans SDU (8)
Hiver	0,81	0,54	0,74	0,41
Printemps	9,72	10,33	16,64	17,79
Été	4,90	7,18	7,54	9,02
Automne	5,61	6,27	4,58	5,52
Somme	21,04	24,31	29,50	32,74
Lorette				
	20 mètres		5 mètres	
Session	Avec SDU (1)	Sans SDU (2)	Avec SDU (7)	Sans SDU (8)
Hiver	15,26	14,56	15,48	18,89
Printemps	86,35	83,21	98,14	121,45
Été	38,58	43,54	51,30	54,68
Automne	80,20	87,31	136,71	134,35
Somme des erreurs	220,40	228,62	301,64	329,37
Du Berger				
	20 mètres		5 mètres	
Session	Avec SDU (1)	Sans SDU (2)	Avec SDU (7)	Sans SDU (8)
Hiver	22,29	29,68	15,30	14,16
Printemps	128,42	73,79	43,33	93,94
Été	110,52	52,30	37,71	99,44
Automne	66,65	50,46	42,34	63,61
Somme des erreurs	217,53	-105,32	-71,62	-177,49
Saint-Charles				
	20 mètres		5 mètres	
Session	Avec SDU (1)	Sans SDU (2)	Avec SDU (7)	Sans SDU (8)
Hiver	8,92	7,64	11,10	11,45
Printemps	1296,46	1389,37	1696,15	1160,04
Été	1915,83	2126,75	2005,38	1950,89
Automne	478,90	515,80	450,62	449,25
Somme des erreurs	-852,75	-898,96	-856,45	-842,35

Les chiffres en gras indiquent le réseau hydrographique plus performant. Valeurs : (Débit observés – Débit simulés)

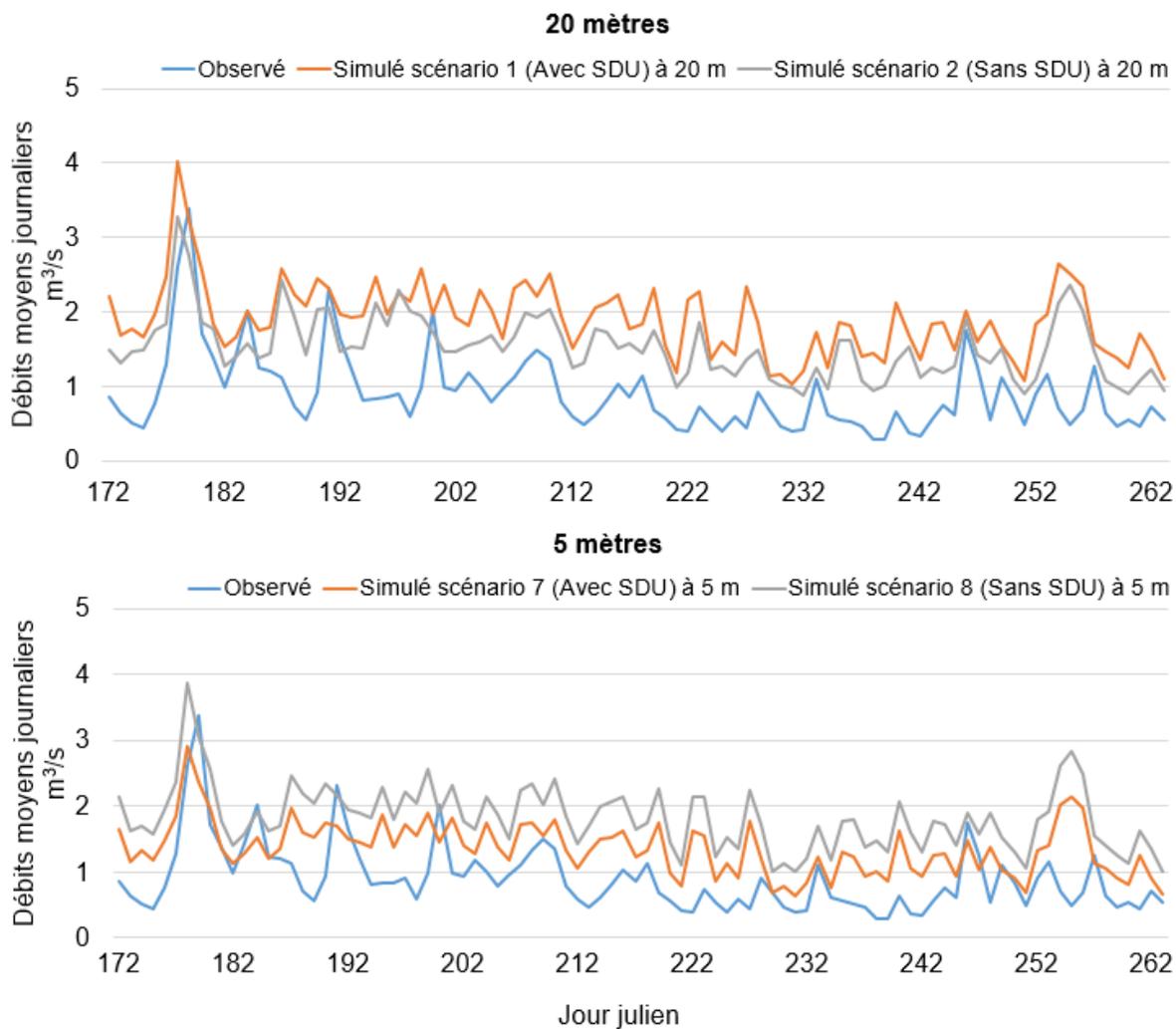
Annexe 11 : Hydrogrammes comparatifs des débits moyens journaliers du sous-bassin Nelson pour l'hiver.



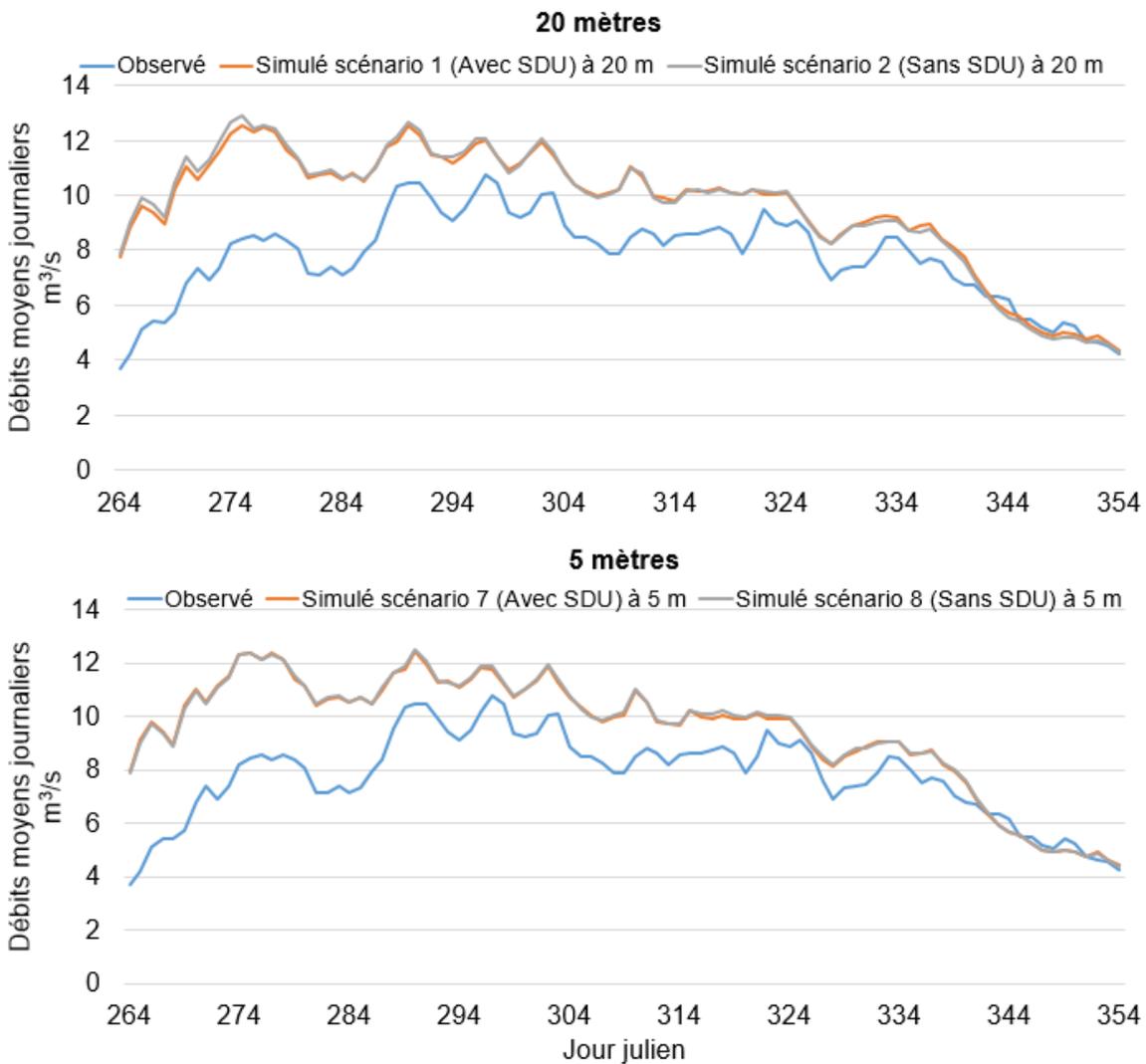
Annexe 12 : Hydrogrammes comparatifs des débits moyens journaliers du sous-bassin Lorette pour le printemps.



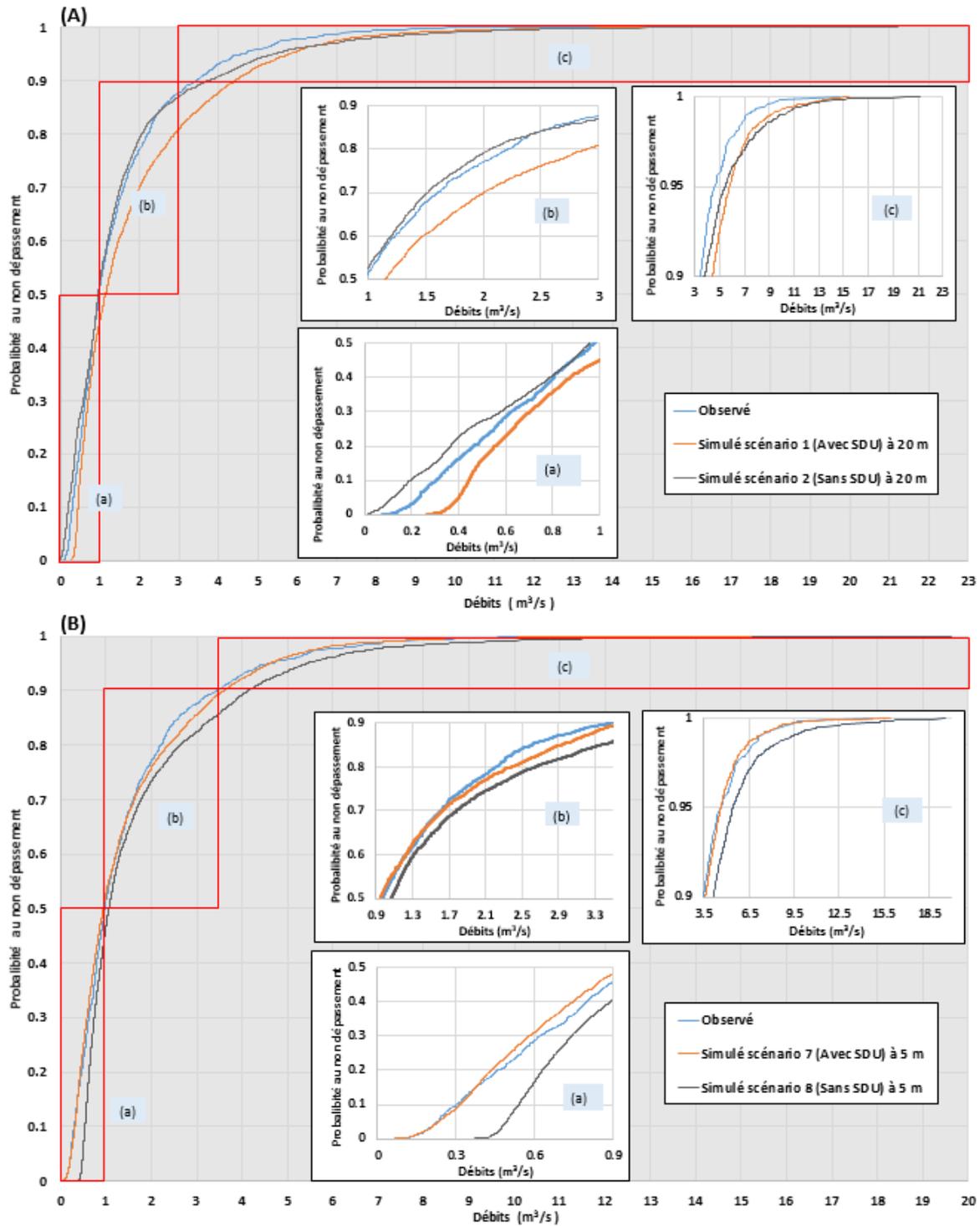
Annexe 13 : Hydrogrammes comparatifs des débits moyens journaliers du sous-bassin Du Berger pour l'été.



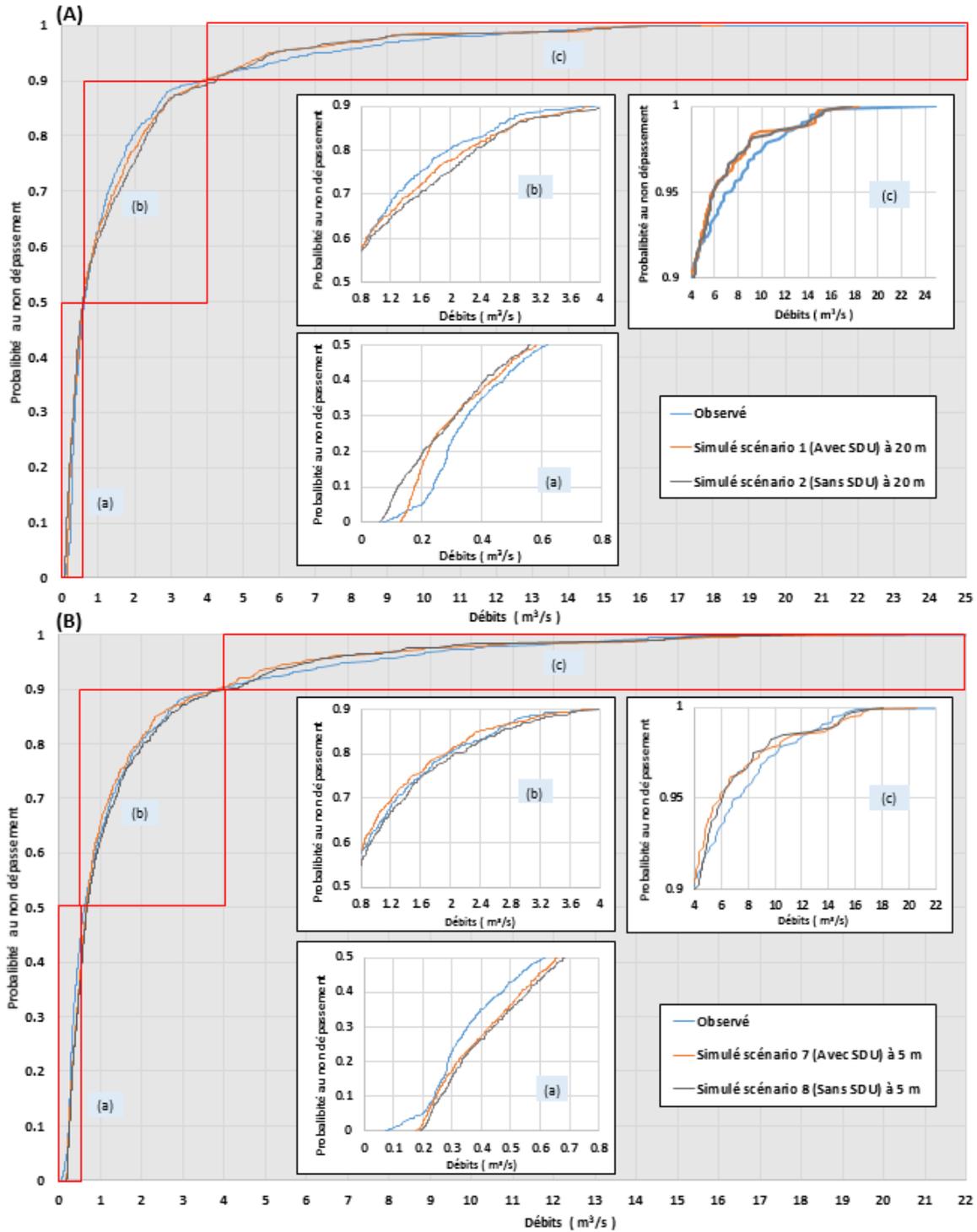
Annexe 14 : Hydrogrammes comparatifs des débits moyens journaliers du sous-bassin Saint-Charles pour l'automne.



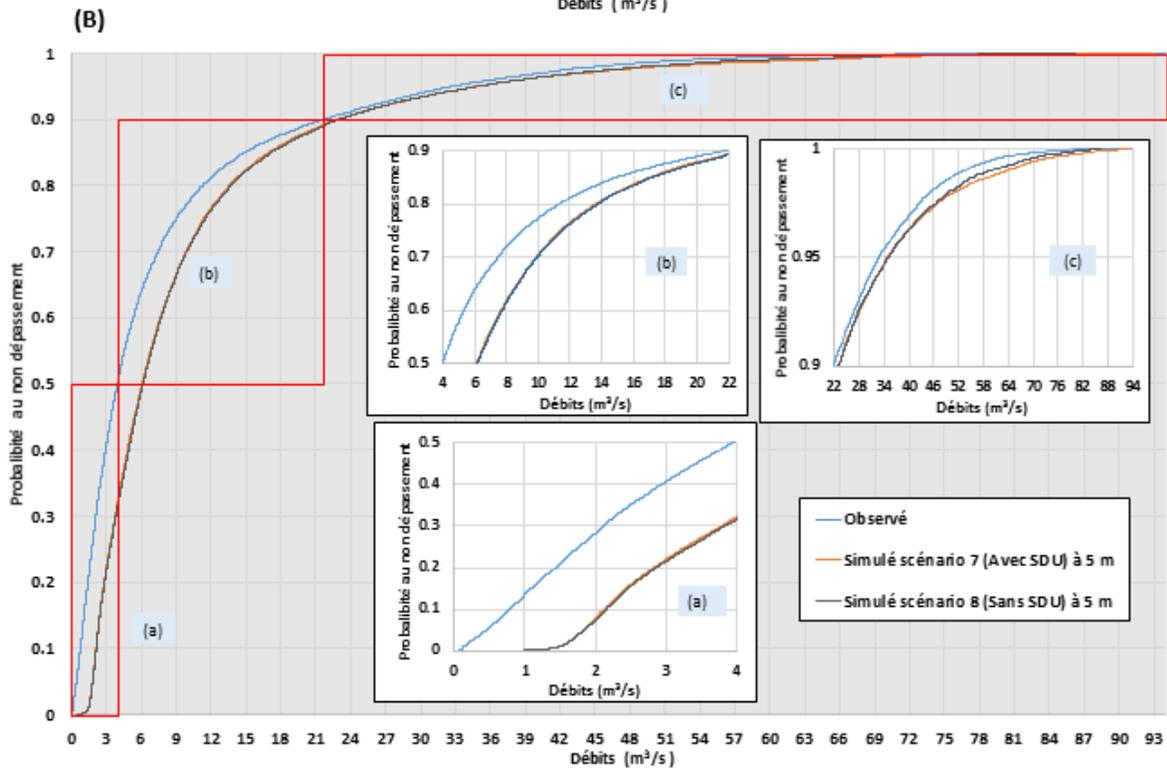
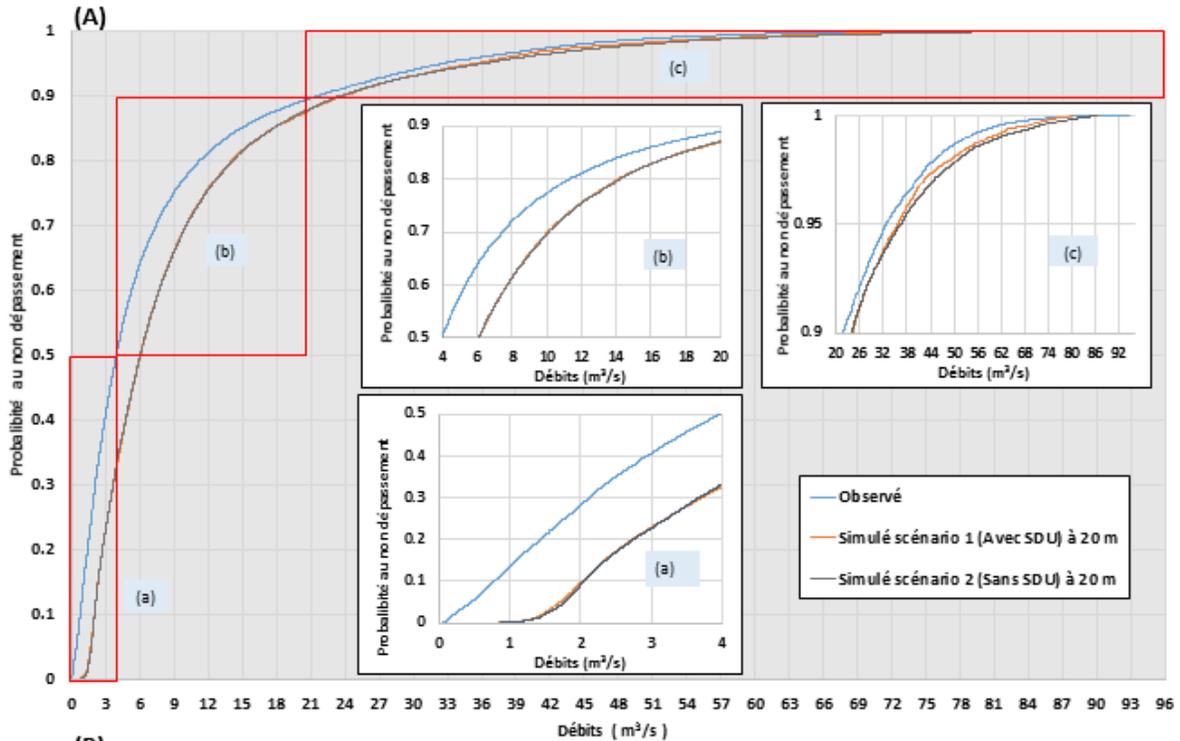
Annexe 15 : Courbes des débits classés à deux échelles spatiales (A) 20 mètres; (B) 5 mètres du sous-bassin Nelson en comparant les scénarios avec et sans la présence du SDU.



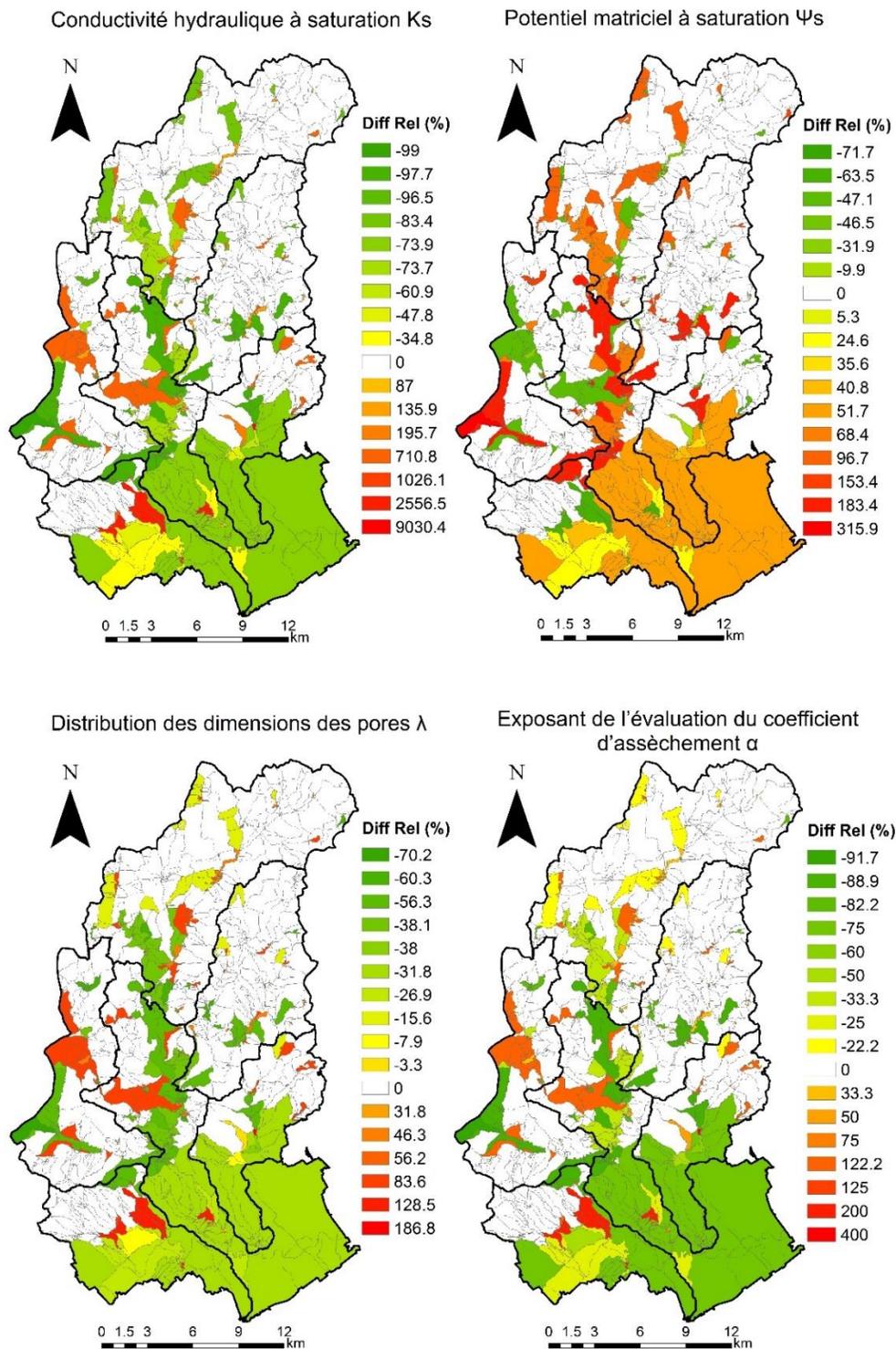
Annexe 16 : Courbes des débits classés à deux échelles spatiales (A) 20 mètres; (B) 5 mètres du sous-bassin Lorette en comparant les scénarios avec et sans la présence du SDU.



Annexe 17 : Courbes des débits classés à deux échelles spatiales (A) 20 mètres; (B) 5 mètres du sous-bassin Saint-Charles en comparant les scénarios avec et sans la présence du SDU.



Annexe 18 : Les différences relatives en pourcentage des paramètres des propriétés hydraulique de sols dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles.



Annexe 19 : Les valeurs de chaque paramètre pour les deux cartes de sols à deux échelles spatiales pour les sous-bassins Des Hurons, Jaune et Nelson.

Hurons		20 m		5 m	
PA	Carte de sol A	Carte de sol B	Carte de sol A	Carte de sol B	
A	-1,83	-1,71	-1,81	-1,72	
B	10,17	5,50	9,62	8,22	
C	4,35	1,79	3,32	2,68	
D	8,58	8,58	10,20	7,25	
E	0,73	0,78	1,04	0,00	
F	11,41	11,41	13,57	9,64	
G	-0,23	-0,18	0,08	-0,96	
H	0,47	0,43	0,49	0,49	
I	0,06	0,06	0,06	0,07	
J	0,10	0,11	0,11	0,11	
K	9,1E-08	3,0E-07	1,7E-06	9,0E-07	
Jaune		20 m		5 m	
PA	Carte de sol A	Carte de sol B	Carte de sol A	Carte de sol B	
A	-1,63	-1,60	-1,07	-2,00	
B	3,25	7,88	3,09	3,84	
C	0,17	5,52	-0,94	0,88	
D	3,90	8,89	3,29	5,89	
E	-1,73	0,52	-2,51	-0,35	
F	5,19	11,82	4,37	7,83	
G	-2,68	-0,44	-3,46	-1,31	
H	0,77	0,69	0,76	0,75	
I	0,03	0,07	0,03	0,04	
J	0,15	0,11	0,15	0,15	
K	1,1E-07	9,2E-08	8,7E-08	1,6E-07	
Nelson		20 m		5 m	
PA	Carte de sol A	Carte de sol B	Carte de sol A	Carte de sol B	
A	-0,02	-1,81	0,76	0,01	
B	3,59	5,42	7,32	5,10	
C	1,26	2,01	1,43	2,05	
D	6,58	5,92	9,10	6,86	
E	-0,90	0,02	-0,65	-0,82	
F	8,74	7,87	12,11	9,13	
G	-1,85	-0,94	-1,61	-1,78	
H	0,78	0,81	0,74	0,77	
I	0,01	0,12	0,08	0,09	
J	0,44	0,28	0,46	0,40	
K	7,8E-07	4,0E-07	2,8E-07	1,6E-07	

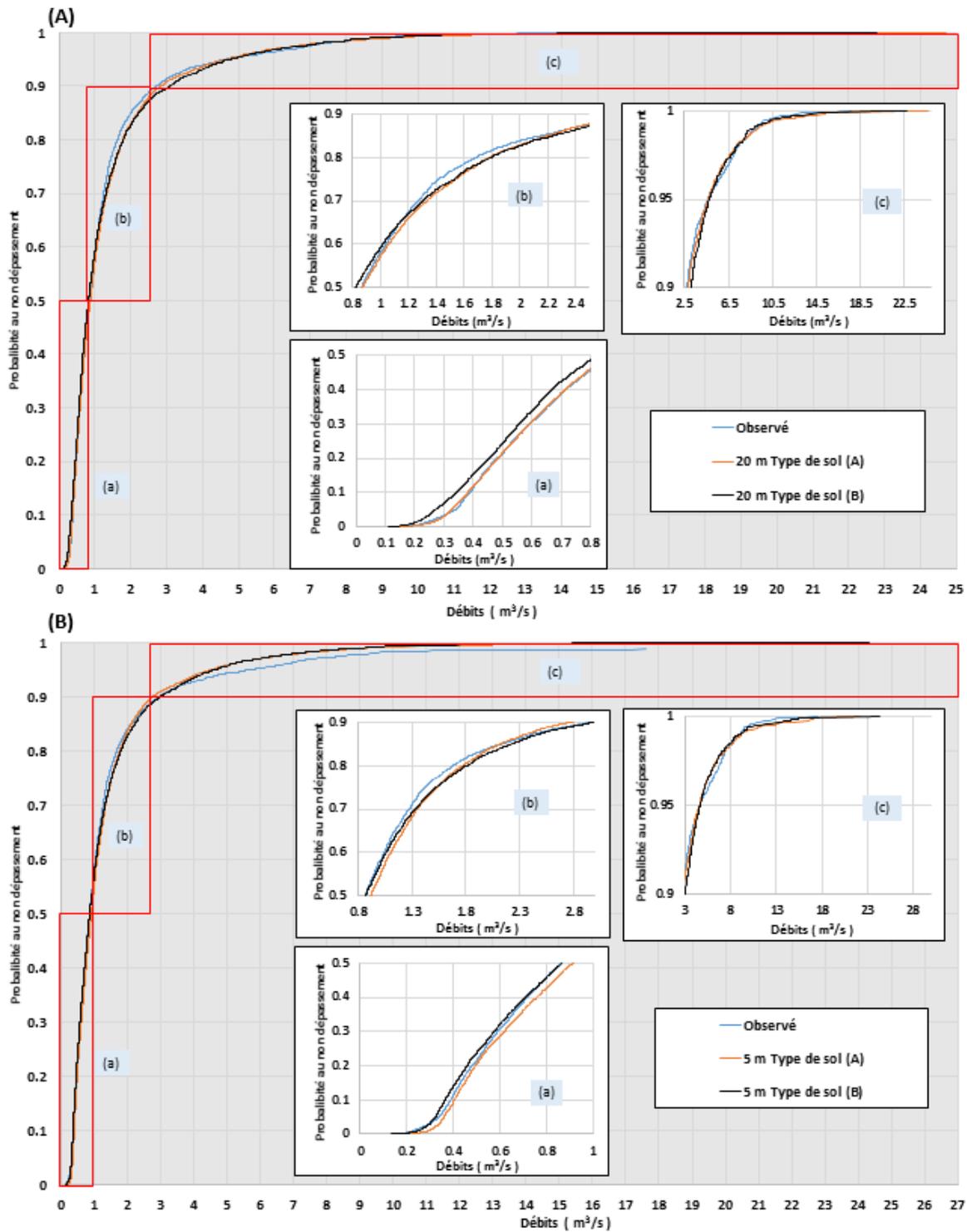
A: Température de passage pluie neige (°C); B: Taux de fonte dans l'air (conifères) (mm/jour); C: Seuil de température de fonte (conifères) (°C); D: Taux de fonte dans l'air (feuillus) (mm/jour); E: Seuil de température de fonte (feuillus) (°C); F: Taux de fonte dans l'air (milieux ouverts) (mm/jour); G: Seuil de température de fonte (milieux ouverts) (°C); H: Coefficient multiplicatif ETP; I: Épaisseur couche 1; J: Épaisseur couche 2; K: Coefficient de récession (m/h)

Annexe 20 : Les valeurs de chaque paramètre pour les deux cartes de sols à deux échelles spatiales pour les sous-bassins Lorette, Du Berger et St. Charles.

Lorette		20 m		5 m	
PA	Carte de sol A	Carte de sol B	Carte de sol A	Carte de sol B	
A	2,00	0,00	2,65	3,50	
B	5,63	8,16	8,40	7,01	
C	1,31	6,34	2,70	0,02	
D	6,62	8,41	7,38	6,62	
E	-0,77	1,34	-0,13	-0,77	
F	8,80	11,18	9,81	8,80	
G	-1,73	0,38	-1,08	-1,73	
H	0,86	0,95	1,00	1,00	
I	0,02	0,02	0,50	0,26	
J	0,09	0,18	0,40	0,61	
K	2,0E-06	2,1E-07	8,0E-07	4,1E-07	
Berger		20 m		5 m	
PA	Carte de sol A	Carte de sol B	Carte de sol A	Carte de sol B	
A	0,40	-1,06	-4,86	-4,26	
B	16,27	4,93	12,35	8,69	
C	3,29	0,93	4,28	4,89	
D	13,56	4,69	10,30	7,24	
E	-0,04	-0,31	2,98	2,56	
F	18,04	6,24	13,69	9,63	
G	-0,99	-1,27	2,03	1,60	
H	1,00	1,00	1,00	1,00	
I	0,00	0,02	0,07	0,01	
J	0,04	0,04	0,22	0,01	
K	9,7E-08	6,4E-07	8,2E-05	6,4E-07	
St. Charles		20 m		5 m	
PA	Carte de sol A	Carte de sol B	Carte de sol A	Carte de sol B	
A	4,17	3,56	3,04	4,38	
B	17,46	8,68	8,44	17,58	
C	3,97	5,17	3,42	3,38	
D	14,55	15,78	11,53	17,18	
E	2,33	3,00	2,17	3,00	
F	19,35	20,99	15,33	22,85	
G	1,37	2,04	1,22	2,04	
H	1,00	1,00	1,00	1,00	
I	0,02	0,04	0,04	0,02	
J	0,06	0,06	0,10	0,09	
K	1,6E-07	9,4E-08	9,1E-08	1,2E-07	

A: Température de passage pluie neige (°C); B: Taux de fonte dans l'air (conifères) (mm/jour); C: Seuil de température de fonte (conifères) (°C); D: Taux de fonte dans l'air (feuillus) (mm/jour); E: Seuil de température de fonte (feuillus) (°C); F: Taux de fonte dans l'air (milieux ouverts) (mm/jour); G: Seuil de température de fonte (milieux ouverts) (°C); H: Coefficient multiplicatif ETP; I: Épaisseur couche 1; J: Épaisseur couche 2; K: Coefficient de récession (m/h)

Annexe 21 : Courbes de débit classé à deux échelles spatiales (A) 20 mètres; (B) 5 mètres du sous-bassin Nelson en comparant les scénarios avec le type de sol (A) et (B).



Annexe 22 : Courbes de débit classé à deux échelles spatiales (A) 20 mètres; (B) 5 mètres du sous-bassin Lorette en comparant les scénarios avec le type de sol (A) et (B).

