

MODELISATION HYDROLOGIQUE DES MILIEUX HUMIDES DANS LES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT

ACTIVITE EN VULNERABILITE, IMPACTS ET ADAPTATION PACC 26

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

Rapport final du volet hydrologique présenté à Ouranos

Par

Alain Rousseau, ing., Ph.D.¹
Stéphane Savary, ing. jr., M.Sc.¹
Maxime Fossey¹

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

31 Mars 2013

¹ Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre et Environnement

© 2013, INRS-Eau, Terre et Environnement

ISBN :

Rousseau, A.N., S. Savary, M. Fossey. 2013. Modélisation hydrologique des milieux humides dans les Basses-terres du Saint-Laurent. Rapport final du volet hydrologique du projet : Outils d'analyses hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses-terres du Saint-Laurent : adaptations aux changements climatiques. Rapport R-1436, Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ : x, 82 p.

ISBN : 978-2-89146-776-6

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ACRONYMES	ix
1. INTRODUCTION	1
2. CONTEXTE/OBJECTIFS	3
3. CADRE THÉORIQUE / COMPTE RENDU DE LA REVUE DE LITTÉRATURE	5
3.1 Définition des Milieux Humides	5
3.2 Classification des MH pour la modélisation hydrologique	5
3.3 BSÉ propres à l'hydrologie	7
3.4 Le contexte de changement climatique	7
3.5 Le modèle hydrologique HYDROTEL	8
4. MÉTHODOLOGIE / DONNÉES	11
4.1 Les sites d'étude.....	11
4.2 Préparation de la base de données.....	12
4.2.1 Échelle spatiale de modélisation.....	12
4.2.2 Données cartographiques.....	13
4.2.3 Données hydrométéorologiques.....	15
4.2.4 Données climatiques	15
4.3 Modélisation hydrologique - Livrable 2A.....	17
4.3.1 Intégration au sein du SIG PHYSITEL.....	17
4.3.2 Intégration au sein du modèle hydrologique HYDROTEL.....	21
4.3.3 Calage et validation du modèle hydrologique HYDROTEL.....	31
4.3.4 Méthodes d'analyses	32
4.4 Rôle des MH en conditions actuelles - Livrable 2B.....	34
4.4.1 Définitions des conditions hydrologiques	34
4.4.2 Définition des indicateurs hydrologiques.....	35
4.4.3 Détermination de l'impact des MH.....	36
4.5 Rôle des MH en conditions futures - Livrable 2C.....	37
4.5.1 Évaluation du rôle des MH en condition de CC.....	37
4.5.2 Évaluation de l'impact des MH en mode prédictif.....	37
5. RÉSULTATS	39
5.1 Modélisation hydrologique - Livrable 2A.....	39
5.1.1 Intégration au sein du SIG PHYSITEL.....	39
5.1.2 Intégration au sein du modèle hydrologique HYDROTEL.....	44

5.1.3	Calage et validation du modèle hydrologique HYDROTEL.....	46
5.1.4	Analyse de sensibilité.....	49
5.2	Rôle des MH en conditions actuelles - Livrable 2B.....	51
5.2.1	Impact des MH.....	51
5.2.2	Impact respectif des MH isolés et riverains	53
5.3	Rôle des MH en conditions futures - Livrable 2C.....	55
5.3.1	Les changements climatiques	55
5.3.2	Évolution de l'impact des MH en condition de CC	57
5.3.3	Évaluation de l'impact des MH en mode prédictif	59
6.	ANALYSE ET DISCUSSION	65
6.1	La modélisation hydrologique - Livrable 2A.....	65
6.1.1	Intégration des BV dans la modélisation hydrologique.....	65
6.1.2	L'analyse de sensibilité	65
6.2	Rôle des MH en conditions actuelles - Livrable 2B.....	66
6.2.1	Impact général des MH sur les processus hydrologiques.....	66
6.2.2	Impact respectif des MH isolé et riverain sur les processus hydrologiques	67
6.3	Rôle des MH en conditions futures - Livrable 2C.....	68
6.3.1	Impact des CC sur l'hydrologie	68
6.3.2	Évolution de l'impact des MH en condition de CC	70
6.3.3	Évolution de l'impact des MH en mode prédictif	70
7.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	73
8.	Références	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Description des scénarios climatiques du MRCC	17
Tableau 2	Processus simulés et algorithmes disponibles pour les simulations hydrologiques	21
Tableau 3	Seuils de fréquence de non-dépassement et débits associés aux conditions hydrologiques.....	34
Tableau 4	Variations de l'indicateur IMH et interprétations en condition actuelle	36
Tableau 5	Variations de l'indicateur IMH et interprétations en CC	38
Tableau 6	Pourcentage de couverture des classes d'occupation des sols sur le BV Bécancour.....	41
Tableau 7	Couverture et aires drainées pour les MH isolés et riverains sur les BV	44
Tableau 8 :	Stations hydrométriques associées aux simulations hydrologiques sur les BV Bécancour et Yamaska.....	46
Tableau 9	Performance du modèle HYDROTEL pour l'ensemble des tronçons des deux BV pour les périodes de calage et de validation.....	49
Tableau 10	Paramètres descriptifs des milieux humides lors de l'analyse de sensibilité.....	49
Tableau 11	Variations annuelle, estivale et hivernale des précipitations et des températures pour les bassins de la Bécancour et de la Yamaska évaluées sur l'ensemble des 10 scénarios climatiques du MRCC.....	55
Tableau 12	Évolution des classes d'occupation des sols (km ²) à l'échelle des BV de la Bécancour et de la Yamaska en fonction des scénarios d'occupation des sols futurs (2050).....	60
Tableau 13	Évolution des MH à l'échelle des BV de la Bécancour et de la Yamaska en fonction des scénarios d'occupation des sols futurs (2050).....	61

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Situation géographique des bassins versants à l'étude au sein des Basses-terres du fleuve Saint-Laurent et du Québec (sources : MDDEFP, 2006 ; MRN, 2006 ; Agriculture Canada, 2008)	11
Figure 2 :	Schéma illustrant le HEW (ou MHE) et le découpage de l'UHRH en versant	20
Figure 3 :	Algorithme de calcul pour l'estimation des flux associés aux MH isolés	27
Figure 4 :	Algorithme de calcul pour l'estimation des flux associés aux MH riverain.....	28
Figure 5 :	Segmentation en UHRH du BV de la Bécancour.....	39
Figure 6 :	Segmentation en UHRH du BV de la Yamaska.....	39
Figure 7 :	Carte d'occupation du sol sur le BV Bécancour	40
Figure 8 :	Carte d'occupation du sol sur le BV Yamaska.....	41
Figure 9 :	Carte des MH et de leurs aires drainées sur le BV Bécancour	42
Figure 10 :	Carte des MH et de leurs aires drainées sur le BV Yamaska	43
Figure 11 :	Intégration du BV Bécancour au modèle HYDROTEL.....	45
Figure 12 :	Intégration du BV Yamaska au modèle HYDROTEL.....	45
Figure 13 :	Exemple de comparaison des débits observés et simulés sur le BV Bécancour pour le calage du modèle HYDROTEL au tronçon TR-102 (01 octobre 2005-30 septembre 2010)	47
Figure 14 :	Exemple de comparaison des débits observés et simulés et simulés sur le BV Yamaska pour le calage du modèle HYDROTEL au tronçon TR-61 (01 octobre 2005-30 septembre 2010)	47
Figure 15 :	Exemple de comparaison des débits observés et simulés sur le BV Bécancour pour la validation du modèle HYDROTEL au tronçon TR-102 (01 octobre 2000-30 septembre 2005)	48
Figure 16 :	Exemple de comparaison des débits observés et simulés sur le BV Yamaska pour la validation du modèle HYDROTEL au tronçon TR-61 (01 octobre 2000-30 septembre 2005)	48
Figure 17 :	Analyse de sensibilité des débits en conditions de crue (a), étiage (b) et normale (c) aux variations des paramètres descriptifs des MH.....	50
Figure 18 :	Courbes de fréquences cumulées des débits simulés (AMH et SMH) à l'exutoire de la Bécancour pour l'ensemble des années hydrologiques (1961-2010) en conditions de crue (a), normale (b) et d'étiage (c)	53
Figure 19 :	Impact relatif respectif des MH isolés et riverains sur les phénomènes de crues et d'étiages sur le groupe amont (TR 255) du bassin de la Bécancour (01 octobre 1970 – 30 septembre 2010)	54
Figure 20 :	Impact relatif respectif des MH isolés et riverains sur les phénomènes de crues et d'étiages sur le groupe amont (TR 240) du bassin de la Yamaska (01 octobre 1970 – 30 septembre 2010)	54
Figure 21 :	Évolution de l'hydrogramme simulé à l'exutoire de la Bécancour (a) et de la Yamaska (b) pour les périodes de référence (H1), actuelle (H2) et future (H3).....	57

Figure 22 :	Impact relatif des MH en condition de CC, sur la Bécancour, pour les périodes de référence (H1), actuelle (H2) et future (H3)	58
Figure 23 :	Impact relatif des MH en condition de CC, sur la Yamaska, pour les périodes de référence (H1), actuelle (H2) et future (H3).	58
Figure 24 :	Effets des changements d'occupation des sols et variations moyennes des indicateurs hydrologiques calculés sur le bassin de la Bécancour pour l'horizon H3 (2051-2099) en comparaison à la situation de 2011	63
Figure 25 :	Effets des changements d'occupation des sols et variations moyennes des indicateurs hydrologiques calculés sur le bassin de la Yamaska pour l'horizon H3 (2051-2099) en comparaison à la situation de 2011	63

LISTE DES ACRONYMES

BSE	Biens et Services Environnementaux
BTSL	Basses-Terres du Saint Laurent
BV	Bassin Versant
CC	Changement Climatique
CCMAC	Centre Canadien de la Modélisation et de l'Analyse Climatique
CIC	Canards Illimités Canada
CEHQ	Centre d'Expertise Hydrique du Québec
DCE	Débit Caractéristique d'Étiage
ET	Evapotranspiration
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
HEW	Hydrologic Equivalent Wetland
HGM	Hydrogramme Géomorphologique
IH	Indicateur Hydrologique
IMH	Indicateur d'impact des Milieux Humides
MCG	Modèle Climatiques Globaux
MDDEFP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MEA	Millennium Ecosystem Assessment
MH	Milieux Humides
MHE	Milieu Humide Equivalent
MNA	Modèle Numérique d'Altitude
MRC	Modèle Régionaux du Climat
MRCC	Modèle Régional Canadien du Climat
NS	Nash - Sutcliffe
SIG	Système d'Information Géographique
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
UCM	Unité Cartographique Minimale
UHRH	Unité Hydrologique Relativement Homogène

1. INTRODUCTION

Jusqu'alors peu considérés, les problèmes environnementaux, en général, et les milieux humides (MH), en particulier, occupent une place prépondérante dans nos sociétés depuis 40 ans avec l'adoption de la convention de Ramsar en 1971 (Matthews, 1993). Souvent méconnus du public, les MH ont pourtant subi bon nombre de transformations, dépendamment de nos besoins (Léveillé, 2007) et se retrouvent aujourd'hui au cœur des préoccupations environnementales. L'intérêt qui leur est porté est d'autant plus fort que la moitié des MH aurait disparu (Dugan, 1990, Zedler *et al.*, 2005) et que leur dégradation est plus rapide que tout autre type d'écosystème (MEA, 2005).

Le contexte actuel de changement climatique (CC), soutenu par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) à travers les prévisions annoncées de l'intensification des extrêmes climatiques (GIEC, 2007), a renforcé significativement le besoin d'en quantifier les risques et d'analyser les options d'adaptation. L'accent mis sur les biens et services environnementaux (BSÉ) rendus par les MH et notamment sur leur capacité à mitiger les effets attendus des CC (MEA, 2005) a contribué au développement d'outils permettant l'évaluation tant quantitative que qualitative du rôle de ces milieux. Parmi ces outils, la modélisation du comportement hydrologique des bassins versants (BV) est incontournable dès lors que l'on s'intéresse à des domaines relatifs à la gestion de la ressource en eau, à l'aménagement du territoire, ou plus généralement à l'une des composantes du risque hydrologique. Elle doit permettre de répondre au mieux aux interrogations concernant la dynamique des écoulements et notamment décrire les processus liés à la formation des crues et à l'apparition des étiages.

Applicable à petite échelle, les instrumentations de sites deviennent vite coûteuses et fastidieuses à l'échelle du BV et la modélisation devient alors une alternative indispensable (Wang *et al.*, 2010). Le développement successif des modèles hydrologiques les a rendus efficaces pour notamment examiner les conditions hydrologiques qui régissent les MH et évaluer les conséquences des changements d'occupation des sols (Nie *et al.*, 2011) ou encore des CC (Grillakis *et al.*, 2011). Leur adaptation par l'intégration de nouveaux concepts propres

aux MH, tels que celui de « Milieux Humides Équivalents » (MHE) développé par Wang *et al.* (2008), leur permet d'évaluer le rôle particulier de ces milieux dans le comportement hydrologique à l'échelle du BV. Le modèle hydrologique semi-distribué HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001) a été développé dans le but de prévoir le comportement hydrologique de BV de tailles très diverses. De plus, considérant que les processus hydrologiques varient dans le temps et dans l'espace en fonction des variations des conditions climatiques et de l'occupation du territoire, ce modèle a été développé dans un souci de compatibilité avec les informations disponibles en télédétection et en Système d'Information Géographique (SIG). Ainsi, PHYSITEL (Rousseau *et al.*, 2011; Turcotte *et al.*, 2001), un SIG dédié à la formation de la base de données nécessaire au modèle hydrologique HYDROTEL a été développé dans le même temps.

L'objet du présent rapport consiste à rendre compte des *travaux de modélisation hydrologique pour évaluer et quantifier le rôle des MH en conditions climatiques actuelles et en contexte de changement climatique.*

2. CONTEXTE/OBJECTIFS

Les basses-terres du Saint-Laurent (BTSL) accueillent la plus forte densité démographique du Québec (Li *et al.*, 1999) et également la plus forte activité agricole (Jobin *et al.*, 2004). Cette région se caractérise alors par de nombreux écosystèmes perturbés par les activités humaines. Parmi ces écosystèmes, les MH sont les plus fortement touchés par ces perturbations et plus de 45 % auraient d'ores et déjà disparus (Joly *et al.*, 2008).

Reconnus pour leurs BSE dont le soutien aux étiages et l'atténuation des crues (MEA, 2005), la perte des MH pourrait avoir des impacts négatifs sur le régime hydrique des BV, les rendant plus vulnérables en réduisant leur résilience aux effets négatifs causés par les CC (Wang *et al.*, 2008). Dans un contexte de CC, le rôle des MH pourrait devenir encore plus critique, notamment en ce qui concerne les fonctions hydrologiques telles que la rétention et la distribution des eaux de surface qui assurent le contrôle des crues et des étiages. Dès lors, la prise en compte explicite de ces milieux dans la modélisation hydrologique devient pertinente pour quantifier leur rôle particulier dans les réponses hydrologiques à l'échelle des BV ainsi que dans leur potentiel d'usage dans le développement de stratégies d'adaptation aux CC.

Les objectifs annoncés du volet hydrologique ont été décomposés en trois livrables et couvrent l'ensemble du volet hydrologique :

Livable 2A

- Rapport sur la mise en place et le fonctionnement d'un nouveau module pour l'inclusion explicite des MH dans le système de modélisation hydrologique HYDROTEL/PHYSITEL

Livable 2B

- Rapport sur le fonctionnement du système de modélisation hydrologique avec une analyse du rôle des MH modélisés dans les deux bassins versants d'intérêt avec les conditions climatiques actuelles

Livrable 2C

- Rapport sur le fonctionnement du modèle hydrologique avec une analyse du rôle des MH modélisés dans les deux bassins versants à l'étude dans un mode prédictif selon les patrons climatiques prescrits par le modèle régional canadien du climat (MRCC)

Pour ce faire, le modèle hydrologique HYDROTEL et son SIG PHYSITEL ont alors été adaptés afin d'être en capacité d'intégrer les MH au sein du processus de modélisation (Livrable 2A) afin d'évaluer et de quantifier le rôle des MH en climat actuel (Livrable 2B) et en climat futur (Livrable 2C). Pour ce faire, les activités ont été réalisées dans la région des BTSL qui accueillent la plus forte densité démographique du Québec (Canada) et où les BV des rivières Bécancour et Yamaska, représentatifs des situations de cette région, ont été plus précisément étudiés. À noter que l'ensemble de ces livrables est regroupé dans le présent rapport.

3. CADRE THÉORIQUE / COMPTE RENDU DE LA REVUE DE LITTÉRATURE

3.1 Définition des Milieux Humides

Les définitions des MH sont nombreuses et cette profusion s'explique en partie par la difficulté à en définir précisément les limites (Mitsch *et al.*, 2007). Cependant, la définition la plus largement répandue est celle établie lors de la Convention de Ramsar (1971) et qui est toujours en vigueur auprès du secrétariat de la Convention (2006) :

« ... étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres. »

Cette définition, extrêmement large, a conduit à la nécessité de concevoir une classification de la vaste gamme des zones humides (Scott, 1989) appartenant à la définition de Ramsar. Zoltai et Vitt (1995), tout comme Brinson (2011) s'accordent sur le fait que les premières classifications élaborées à des fins d'inventaires et de reconnaissance des milieux, basées sur des considérations physiques, se sont peu à peu complexifiées, intégrant des critères liés à la perception des milieux et à l'usage souhaité du système de référence, pour répondre à des objectifs spécifiques tels que la gestion des milieux.

3.2 Classification des MH pour la modélisation hydrologique

Les MH ont fait l'objet de nombreuses classifications au niveau mondial, national, provincial et même régional qui peut répondre à différents besoins. Ainsi, Brinson (2011) identifie trois catégories de systèmes de classification, soit ceux basés sur la structure (leur apparence), sur les fonctions et sur l'utilité des MH. Le bilan détaillé des systèmes de classification des MH ainsi que les méthodes de cartographie actuelle sont présentées dans le rapport : *Cartographie des milieux humides dans les basses-terres du Saint-Laurent* (livrable 4A).

Dans cet objectif de modélisation hydrologique, la classification selon l'approche fonctionnelle (ou approche hydrogéomorphologique) reposant sur des paramètres géomorphologique et sur des critères de végétation, et intégrant préférentiellement les conditions hydrologiques (source des entrées d'eau et régime hydrologique) s'est imposée comme approche de référence (Brinson, 2009, Brinson *et al.*, 1996) pour les évaluations de projet de gestion des MH (Gwin *et al.*, 1999). L'ensemble des MH ont ainsi été discriminés selon les systèmes suivants :

- Les systèmes riverains ou ripariens

Les MH riverains se définissent comme des zones où les sols sont périodiquement inondés par les crues. Ils englobent les zones humides et eaux peu profondes comprises dans le réseau hydrographique (Cowardin *et al.*, 1979) et les secteurs bordant ce dernier (Brooks *et al.*, 2011) notamment les plaines inondables, les prairies humides et les milieux adjacents aux cours d'eau, dont l'hydrologie est régie principalement par l'apport des eaux de surface provenant du réseau hydrographique connexe (Middleton, 2002) ainsi que par l'eau souterraine (Mitsch *et al.*, 2007).

- Les systèmes non-riverains ou isolés

Les MH isolés se définissent comme des zones où l'on trouve des eaux plus ou moins permanentes. Ils englobent les marécages, les marais ou encore les tourbières, dont l'hydrologie est régie principalement par les fluctuations de la nappe phréatique (Yetter, 2004) alimentée par les précipitations et les apports du bassin versant drainé par les MH isolés (Buteau *et al.*, 1994).

3.3 BSÉ propres à l'hydrologie

En accord avec le secrétariat de la Convention de Ramsar (2007), les BSÉ ayant les plus grands liens avec l'hydrologie et étant les plus propices à la modélisation hydrologique sont les services de régulation suivants :

- La maîtrise des crues. Les apports et les niveaux d'eau varient selon les saisons. Tolérant les inondations et leur existence étant, pour bon nombre d'entre eux, dépendants de ces variations, les MH jouent un rôle majeur dans la régulation des phénomènes hydrologiques tels que les crues (Padmanabhan *et al.*, 2001). Les MH, en agissant comme des réservoirs, peuvent alors « absorber » les précipitations, ralentissant les débits en limitant les volumes ruisselés.
- La recharge des eaux souterraines. La capacité de rétention des MH augmente les temps de résidence des eaux, favorisant ainsi les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines (Burt *et al.*, 2002) et, notamment, les phénomènes de percolation vers les nappes souterraines.
- L'atténuation des effets des changements climatiques. Le dernier rapport du GIEC (2007) souligne la hausse moyenne des températures et l'intensification des extrêmes climatiques. Les zones humides, réservoirs de carbone (Zhou *et al.*, 2009) peuvent, si elles sont protégées, atténuer les effets des températures en limitant l'émission des Gaz à Effet de Serre (GES) ou encore limiter les dommages causés par les inondations.

3.4 Le contexte de changement climatique

La réalité du CC fait à présent l'objet d'un certain consensus (Houghton *et al.*, 2001) reposant sur la convergence de faits relatifs : (i) aux tendances évolutives des températures au cours des derniers siècles (Mann *et al.*, 1998), (ii) à la comparaison des tendances avec la variabilité climatique naturelle (Hegerl *et al.*, 1997) et (iii) aux simulations par les modèles de circulation générale. Et il est admis que ces changements climatiques pourraient affecter les distributions spatiale et temporelle de la ressource en eau telle l'intensification et la fréquence des phénomènes hydrologiques extrêmes (Huntington, 2006).

Les Modèles Climatiques Globaux (MCG) sont les outils actuellement disponibles pour appréhender les probables CC et les projections qui en découlent sont largement utilisées pour étudier les impacts du CC et notamment sur les hydrosystèmes continentaux, par le biais des prévisions issues des modèles hydrologiques. Ensuite, l'intégration de modèles à aire limitée, configurés comme Modèles Régionaux du Climat (MRC), à l'intérieur de MCG, est devenue une technique courante de réduction d'échelle pour simuler le climat sur un domaine limité (Bae *et al.*, 2011).

Ces modèles restent pourtant entachés de certaines incertitudes, inhérentes à leurs paramétrages et aux scénarios d'émissions en GES, qui restent difficiles à estimer (New *et al.*, 2007). Leurs projections sont également soumises à ces mêmes incertitudes et de par l'équiprobabilité de ces dernières, il apparaît indispensable de disposer de plusieurs scénarios de projection. Cette limite dans la méthode n'autorise pas une quantification précise des sorties de la modélisation hydrologique mais seulement de définir une enveloppe de réponse relative à l'incertitude du CC.

3.5 Le modèle hydrologique HYDROTEL

Le modèle hydrologique semi-distribué HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001) a été développé dans le but de prévoir le comportement hydrologique de BV de tailles très diverses. De plus, considérant que les processus hydrologiques varient dans le temps et dans l'espace en fonction des variations des conditions climatiques et de l'occupation du territoire, ce modèle a été développé dans un souci de compatibilité avec les informations disponibles en télédétection et en SIG. Ainsi les suivis temporel et spatial des classes d'occupation du territoire sont obtenus d'images satellitaires alors que les types de sols proviennent de données SIG.

Sur le plan spatial, HYDROTEL est un modèle hydrologique semi-distribué, signifiant que la variabilité spatiale est prise en compte à travers des classes ayant des comportements hydrologiques supposés similaires. La formation de la base de données dans PHYSITEL (R. Turcotte *et al.*, 2001) est réalisée à partir du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et permet d'obtenir des Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH) formant l'unité

spatiale de référence. Chacune de ces unités est caractérisée par son type de sol majoritaire et par les pourcentages de chacune des classes d'occupation du territoire. Sur le plan temporel, HYDROTEL est un modèle continu.

Les simulations hydrologiques à l'aide du modèle HYDROTEL sont basées sur une approche en cascade facilitant l'ajout de sous-modèles, tels que ceux visant à simuler les MH.

4. MÉTHODOLOGIE / DONNÉES

4.1 Les sites d'étude

Les sites d'étude choisis pour le projet sont situés dans les BTSL, qui reposent sur la plateforme du Saint-Laurent, et possèdent une superficie de 29 000 km². Les critères de sélection et la description détaillée des BV des BTSL sont identifiés dans le rapport : *Documentation et sélection des bassins versants à l'étude, partenariats et synthèse des données disponibles*.

Pour le présent projet, les BV de la rivière Bécancour et de la rivière Yamaska ont été sélectionnés (figure 1) selon des critères fondamentaux (Labbé *et al.*, 2011) en lien à l'application du MRC, à l'étendue spatiale des BV dans les BTSL, à la représentativité des MH et à la disponibilité des données (e.g., mesures hydrométriques, climatiques et géomatiques).

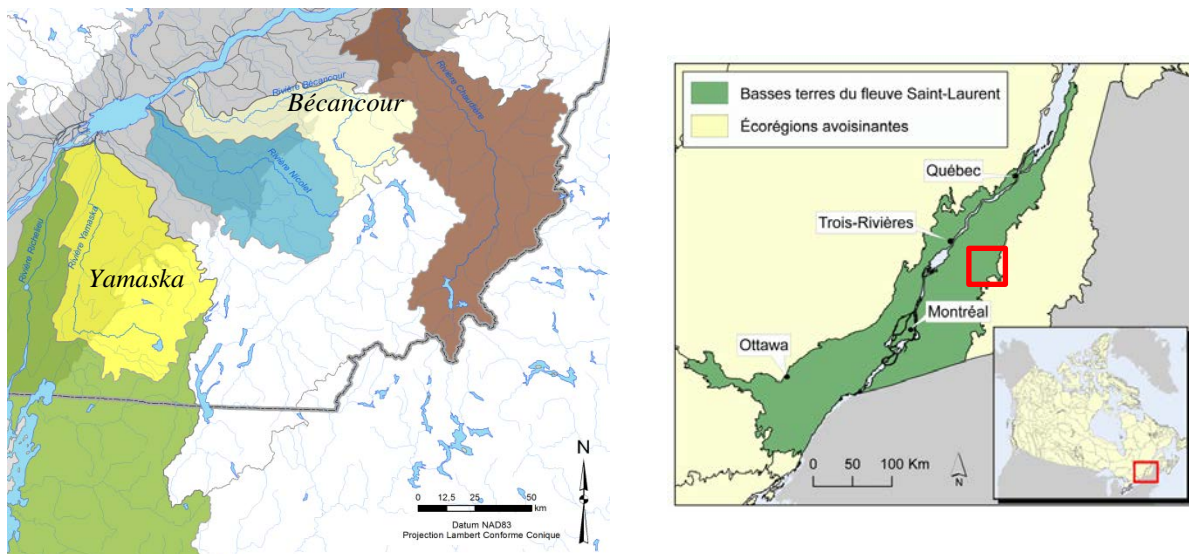


Figure 1 : Situation géographique des bassins versants à l'étude au sein des Basses-terres du fleuve Saint-Laurent et du Québec (sources : MDDEFP, 2006 ; MRN, 2006 ; Agriculture Canada, 2008)

Ces deux BV possèdent des caractéristiques d'intérêts pour le projet de modélisation hydrologique et notamment une bonne distribution des stations hydrométriques dans le réseau hydrographique permettant un calage et une validation du modèle hydrologique.

Le BV de la rivière Bécancour couvre une superficie de 2 620 km², et la rivière prend sa source dans le lac Bécancour, près de Thetford Mines en Chaudière-Appalaches. Ce bassin possède la plus grande superficie des MH (12 %), avec environ 300 km². Le BV de la rivière Yamaska draine un territoire de 4 784 km². La rivière prend sa source au lac Brome dans les Appalaches. Les MH représentent 4 % de la superficie du bassin, ce qui représente approximativement 200 km².

4.2 Préparation de la base de données

4.2.1 Échelle spatiale de modélisation

L'hétérogénéité spatiale du milieu est un facteur primordial devant être pris en compte dans la modélisation hydrologique. Une manière de caractériser cette hétérogénéité spatiale est de discrétiser le territoire d'étude (BV) en sous bassins versants ou Unités Hydrologiques Relativement Homogènes (UHRH), c'est-à-dire des aires sur lesquelles les caractéristiques physiques et les processus hydrologiques modélisés sont considérés comme comparables ou similaires dans leur nature et dans leur importance relative. Ces unités hydrologiques définissent alors la plus fine échelle spatiale de calcul intégrée dans le modèle hydrologique. La division en UHRH est basée sur des caractéristiques physiographiques du BV telles que le réseau hydrographique et la topographie. Par la suite, ces UHRH sont définies par les caractéristiques de type d'occupation du sol et de pédologie.

Pour cette étude, les outils de modélisation utilisés que sont le SIG PHYSITEL (Rousseau *et al.*, 2011) et le modèle hydrologique HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001) utilisent ce concept d'UHRH. Ces unités spatiales, à l'échelle du versant et associées à un tronçon unique du réseau hydrographique, présentent des avantages :

- S'assurer de la bonne prise en compte de l'hétérogénéité spatiale du BV
- Définir un nombre d'unités spatiales raisonnables permettant de restreindre le temps de calcul lors des simulations
- Préserver un niveau d'intégration des cours d'eau satisfaisant

La méthodologie spécifique à la conception des UHRH au sein du SIG PHYSITEL est plus spécifiquement décrite dans la section 4.3.1 *Intégration au sein du SIG PHYSITEL*.

Dans le cadre des travaux présentés, une subdivision théorique de chacun des BV en trois secteurs, basée sur des critères physiques et correspondant à un regroupement d'UHRH a été réalisée. Cette subdivision correspond pour la Bécancour à un secteur aval (AV), médian (MED) et amont (AM) et pour la Yamaska à un secteur aval (AV), un premier secteur amont (AM1) et un second secteur amont (AM2). Cette subdivision délimite ainsi des secteurs relativement homogènes accueillant des stations hydrométriques à leurs exutoires ou au voisinage de ces derniers. Cette échelle d'étude est celle utilisée lors des processus de calage et de validation du modèle hydrologique et pour la présentation des résultats.

4.2.2 Données cartographiques

Dans le cadre de l'intégration des BV des rivières Bécancour et Yamaska aux outils de modélisation PHYSITEL et HYDROTEL, nous avons eu recours d'une part, à un MNA d'une résolution de 30 m. Cette résolution assure une représentation suffisamment détaillée du BV décrivant la variabilité spatiale de la topographie du bassin et du réseau hydrographique. Les données matricielles du MNA agissent comme base d'information dans la détermination de la pente et des orientations d'écoulement liées aux UHRH. D'autre part, le réseau vectoriel utilisé a été défini par un degré élevé de détail allant jusqu'à l'ordre 5 de la classification de Strahler. Le niveau de détail dans l'arborescence du réseau hydrographique déterminé par l'utilisateur est primordial car il intervient dans la segmentation du BV en UHRH.

Pour le projet, l'ensemble des cartes et éléments vectoriels (réseau filamenteux) nous ont été transmises par l'équipe de travail de l'Université de Sherbrooke (UdS).

- ***Données en condition actuelle***

La carte d'occupation actuelle du territoire des deux BV a été produite à l'aide de mosaïques d'images satellitaires du capteur TM Landsat 5 normalisées radiométriquement. La couche des MH en 2011 provient de la cartographie détaillée des MH en 2010 effectuée par photo-interprétation par le Ministère du développement durable, de l'Environnement, de la Faune et

des Parcs (MDDEFP) et par Canards Illimités Canada (CIC). L'unité cartographique minimale (UCM) est de 0,3 hectares, ce qui signifie que tous les MH ayant une superficie de 0,3 hectares ou plus ont été systématiquement cartographiés.

- ***Données en condition future***

Les cartes d'occupation future du territoire (2050) ont été effectuées par une simulation selon les tendances de changement de transition d'un état d'occupation du sol à un autre à partir de l'observation de ces changements sur une période de référence (1984 et 2011).

La carte d'occupation historique (1984) du territoire des deux BV a été produite également à l'aide de mosaïques d'images satellitaires du capteur TM landsat 5 normalisées radiométriquement. La couche des MH en 1984 a été produite par l'entreprise Effigis Géo-Solutions avec l'aide de deux mosaïques d'images satellitaires du capteur TM Landsat 5 (été 1984 et printemps 1985).

Les cartes d'occupation future (2050) ont pour objectif d'analyser le rôle des MH modélisés selon les conditions climatiques prescrites par le MRCC. Ainsi, quatre scénarios de gestion des MH ont été élaborés :

- **Scénario 1 : *La tendance actuelle (TA)*** correspondant à une projection en 2050 du changement d'occupation des sols à partir de l'observation de ces changements sur la période de référence (1984-2011)
- **Scénario 2 : *Le Statu-quo (SQ)*** correspondant au même traitement que celui appliqué à la tendance actuelle, excepté pour la classe des MH. En effet, il n'y a aucun changement pour la classe MH par rapport à l'état de référence (2011)
- **Scénario 3 : *L'optimiste (Op)*** correspondant à celui de la tendance actuelle avec une augmentation imposée pour la classe des MH. L'emplacement de la restauration des MH a été établi selon la pente, la distance au cours d'eau, le drainage, le type de sol, l'occupation existante des MH au sein des sous-unités de traitement et la proximité des milieux anthropiques

- **Scénario 4 : *Le pessimiste (Pe)*** correspondant à celui de la tendance actuelle avec une diminution imposée pour la classe des MH.

4.2.3 Données hydrométéorologiques

Les données hydrométéorologiques requises pour le modèle HYDROTEL et pour la modélisation hydrologique sont les suivantes :

- Des données hydrométriques de mesures de débits en rivière
- Les données météorologiques de précipitations journalières
- Les données météorologiques de températures journalières (minimale et maximale)

Dans le contexte actuel, l'ensemble des données sont fournies par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). Les données hydrométriques correspondent aux mesures des débits des stations localisées sur le réseau hydrographique des deux BV. Les données météorologiques calculées aux points de la grille météorologique du CEHQ, respectivement 28 points pour la Bécancour et 52 points pour la Yamaska, seront utilisées dans le modèle HYDROTEL. À titre de précision, les données météorologiques sur grille (précipitations et températures) produites par le CEHQ et couvrant la période de 1960-2010, sont issues de l'interpolation des données recueillies aux stations du Programme de surveillance du climat du MDDEFP. Elles n'ont pas le statut de données officielles et leur usage vise l'alimentation de modèles hydrologiques tirant avantage de l'utilisation de données sur grille. La méthode d'interpolation par krigeage isotrope est détaillée dans le rapport de Poirier *et al.* (2012).

4.2.4 Données climatiques

Les scénarios climatiques proposés reposent sur une approche de modélisation climatique régionale à l'aide du MRCC (Caya *et al.*, 1999) et plus spécifiquement diverses versions 4. du modèle (de Elia *et al.*, 2010, Paquin, 2010) sur des domaines centrés, notamment sur : (i) le Québec, formé par 111*87 tuiles ayant une résolution horizontale de 45 km (vraie à 60°N), et (ii) l'Amérique du Nord, formé par 200*192 tuiles de même résolution horizontale. Toutes ces simulations futures intègrent le scénario A2 d'émission de gaz à effet de serre (Nakicenovic *et al.*, 2000).

Plus particulièrement, pour ce projet, et afin de tenir compte de l'incertitude liée à la modélisation climatique, dix scénarios de projections climatiques du MRCC (tableau 1), couvrant la période 1961-2099, ont été fournis par le consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, Ouranos.

Tableau 1 : Description des scénarios climatiques du MRCC

Simulation	acu	adc	adj	adl	aet	aev	afx	agr	agx	aha
Version du MRCC	4.1.1	4.1.1	4.2.0	4.2.0	4.2.3	4.2.3	4.2.3	4.2.3	4.2.3	4.2.3
Pilote	MCGC3	MCGC3	MCGC3	MCGC3	MCGC3	MCGC3	MCGC3	MCGC3	ECHAM5	ECHAM5
Membre	4	5	4	5	4	5	4	5	1	1
Domaine	Québec	Québec	Québec	AMNO	AMNO	AMNO	Québec	Québec	AMNO	Québec

Ces simulations diffèrent notamment par les pilotes, soit la source de données fournissant les conditions aux frontières du domaine. Les huit simulations pilotées par des modèles climatiques globaux (MCG) ont été réalisées par les membres 4 et 5 de la troisième génération du modèle couplé climatique global (MCGC3) (Flato *et al.*, 2001, Scinocca *et al.*, 2008), qui diffèrent par leurs conditions initiales, produits par le Centre Canadien de la Modélisation et de l'Analyse Climatique (CCMAC). La résolution horizontale du MCGC3 est de 3,75°. Les deux dernières simulations sont pilotées par le membre 1 du modèle couplé climatique global allemand ECHAM5 (Junglaus *et al.*, 2006) possédant une résolution horizontale d'environ 1,87°.

La qualité d'une projection en climat futur produite à partir de modèles de climat dépend de la capacité de ces derniers à reproduire adéquatement le climat. Dans le cadre du projet actuel, la validation des données du MRCC n'a pas été nécessaire dans la mesure où Ouranos a remis des données débiaisées (Mpelasoka *et al.*, 2009) de précipitations et de températures maximales et minimales au centre des tuiles de la grille météorologique du CEHQ d'une résolution de 25 km.

4.3 Modélisation hydrologique - Livrable 2A

4.3.1 Intégration au sein du SIG PHYSITEL

PHYSITEL (Rousseau *et al.*, 2011, R. Turcotte *et al.*, 2001) est un SIG dédié à la préparation des données descriptives d'un bassin versant en support à la modélisation hydrologique par le modèle HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001, R.; Turcotte *et al.*, 2003). PHYSITEL détermine alors la structure d'écoulement d'un BV à partir (i) d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et (ii) d'une représentation vectorielle du réseau hydrographique. De plus, il permet d'intégrer

les données spatiales d'occupation et de type de sols. PHYSITEL réalise cette caractérisation physique à l'échelle de petites sous-unités spatiales, les UHRH, issues de la subdivision du BV, pour lesquelles les caractéristiques physiques, spatiales et hydrologiques sont considérées comme homogènes.

La représentation détaillée du réseau hydrographique et de la structure d'écoulement du BV permet de raffiner l'identification des lacs, réservoirs et petites étendues d'eau ne pouvant être repérés par la simple analyse du MNA. Pour le projet, le degré de détail a été défini pour les BV de la Bécancour et de la Yamaska par respectivement un ordre 2 et 3. Les ordres ainsi définis, aboutissent à l'obtention d'un nombre raisonnable d'UHRH permettant de restreindre le temps de calcul lors des simulations tout en préservant un niveau d'intégration des cours d'eau satisfaisant.

L'étape suivante requise par PHYSITEL est la détermination d'altitudes modifiées sous le réseau hydrographique et sur les berges des cours d'eau. Ce processus permet de simplifier la structure d'écoulement et le drainage de l'eau de la partie terrestre jusqu'au cours d'eau. Par la suite, en se basant sur le MNA et sur le réseau hydrographique vectoriel, PHYSITEL effectue le calcul de pente de chaque pixel composant la matrice du MNA selon les couples voisins d'altitudes nord-sud et est-ouest. Ces pentes sont à la base de la détermination des directions d'écoulement calculées à l'aide de l'algorithme D8-LTD (Orlandini *et al.*, 2003).

Suite au processus d'identification de la structure de drainage du BV, l'étape suivante consiste à régénérer ou imposer (comme c'est le cas présentement pour le projet) le réseau hydrographique en accord avec la représentation existante du réseau intégrée au préalable à PHYSITEL, effectuant ainsi un calque de ce réseau. L'application de ce réseau nouvellement imposé permet la segmentation du bassin versant en UHRH, définie alors comme des surfaces d'écoulement vers un tronçon de ce réseau hydrographique. Plus précisément, dans le projet en cours, chaque UHRH représente un versant du cours d'eau, ainsi, deux UHRH sont associées à un tronçon du cours d'eau et trois UHRH sont associées au tronçon de tête, avec respectivement deux UHRH pour les rives et un UHRH pour l'aire drainée en amont du point source du tronçon (figure 2). Chacune des UHRH est alors associée à un tronçon unique.

La caractérisation complète du bassin versant au sein de PHYSITEL nécessite finalement l'intégration de l'occupation et des types de sol pour chaque UHRH (Fortin *et al.*, 2001), ainsi que celle des milieux humides. Pour l'occupation du sol, le SIG PHYSITEL procède au calcul des pourcentages de chacune des classes d'occupation du sol pour chacun des UHRH constituant le BV. Pour les types de sol, il est à noter que la version actuelle du modèle HYDROTEL intègre les valeurs des propriétés hydrodynamiques des types de sol comme des constantes sur les différents horizons verticaux des sols. Des valeurs par défaut, basées sur les tables de Rawls et Brakensiek (1989), sont disponibles et peuvent être attribuées aux caractéristiques des sols selon les textures de ces derniers (pourcentages sable, limon, argile), par contre, l'utilisateur peut attribuer des valeurs plus appropriées. Dans le cas présent, les types de sol sur les BV à l'étude ont été déterminés en associant les textures de la carte des types de sol avec les classes de type de sol présents dans la table de Rawls et Brakensiek (1989) déjà intégrées dans le SIG PHYSITEL. Ainsi, le SIG PHYSITEL procède au calcul des propriétés hydrodynamiques des sols pour chacun des UHRH constituant le bassin versant.

Pour les besoins de l'étude en cours, la définition des MH achève l'intégration complète du BV au SIG PHYSITEL. Sur la base de la carte détaillée de l'occupation des sols, incluant les MH, le SIG PHYSITEL procède alors au calcul de l'aire de chacun des MH. Cette aire est considérée comme l'aire maximale occupée par le MH. Par la suite, en associant la carte des orientations des écoulements, l'aire drainée par chacun des MH est calculée. À ce stade, la distinction typologique entre MH riverain et isolé se fait alors selon un pourcentage de contact (ou seuil d'adjacence) avec le réseau hydrographique, versus l'aire totale du MH. Ce seuil est fixé par l'utilisateur (dans notre cas, ce pourcentage vaut 1 %). Finalement, une nouvelle carte est produite par le SIG PHYSITEL visant à illustrer les MH riverains et isolés ainsi que leurs aires drainées respectives.

La représentation des MH au sein du modèle HYDROTEL et leur définition au sein du SIG PHYSITEL s'appuient aussi sur le concept de MHE proposé par Wang *et al.* (2008). Ce concept assume que, pour un sous-bassin donné, l'aire occupée par l'ensemble des MH peut être considérée comme une aire unique égale à la somme des aires des MH comprises dans le sous-bassin.

Ce concept s'applique pour chacune des typologies précédemment définies (riveraines et isolées) par la sommation des paramètres définis (aire maximale et aire drainée) à l'échelle de l'UHRH.

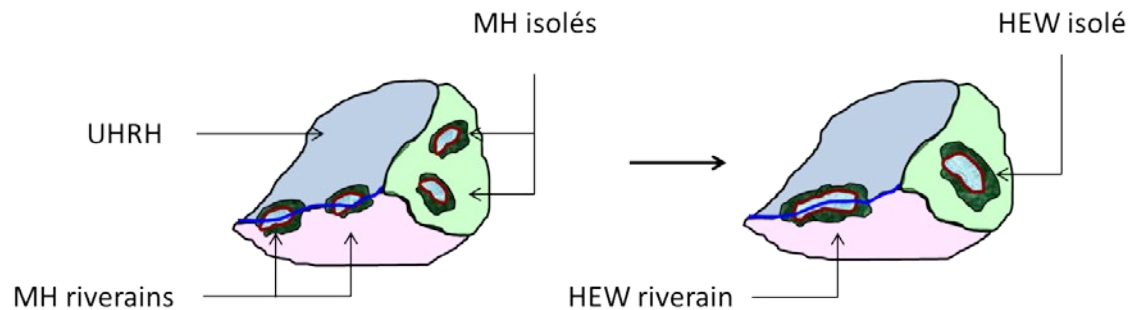


Figure 2 : Schéma illustrant le HEW (ou MHE) et le découpage de l'UHRH en versant

Deux points sont à noter lors de cette étape. Une UHRH ne peut accueillir qu'un seul MHE par typologie, soit un MHE isolé et un MHE riverain. Aussi, un MHE situé sur plusieurs UHRH est alors réparti sur chacun des UHRH en respectant les proportions de recouvrement initiales. De cette manière chacun des UHRH se retrouve avec un unique MHE par typologie dont l'aire maximale et l'aire drainée respectent les conditions initiales issues du traitement cartographique basé sur les orientations d'écoulements. Enfin, le MHE isolé n'est pas spatialisé sur l'UHRH et ne correspond alors qu'à une seule intégration numérique. Le MHE riverain, quant à lui est localisé sur le tronçon du réseau hydrographique et son centre correspond au centroïde (ou barycentre) de chacun des MH riverains avec l'hypothèse d'une répartition égale de part et d'autre de son centre. Cette localisation intervient lors du calcul ultérieur de la hauteur d'eau au sein du modèle HYDROTEL. L'aire drainée, quant à elle, est conservée et intégrée comme valeur numérique.

L'intégration du BV au SIG PHYSITEL est complétée par l'ajout au besoin des stations météorologiques et hydrométriques. Ces stations sont décrites selon leurs noms et emplacements géographiques sur le bassin. En ce sens, PHYSITEL permet l'ajout et l'affichage des différentes stations météorologiques et hydrométriques, qui sont reprises par le modèle HYDROTEL. Finalement PHYSITEL permet la création et l'exportation des fichiers d'entrée du modèle HYDROTEL.

4.3.2 Intégration au sein du modèle hydrologique HYDROTEL

- *Le modèle hydrologique HYDROTEL*

Suite à l'application du SIG PHYSITEL, le BV visé doit être intégré au modèle hydrologique HYDROTEL. Ce dernier constitue un modèle hydrologique semi-distribué compatible avec la télédétection et supporté par le SIG PHYSITEL. Les calculs effectués par le modèle sont faits sur les UHRH, qui forment l'unité spatiale de calcul. Sur le plan temporel, HYDROTEL est un modèle qui fonctionne en continu (pas de temps variables de 1h, 2h, 3h, 4h, 6h, 8h, 12h, 24h (journalier)), par opposition à un modèle par évènement.

Les simulations hydrologiques à l'aide du modèle HYDROTEL sont basées sur une approche en cascade facilitant la modification des différents paramètres affectant les sous-modèles hydrologiques ou encore l'ajout de sous-modèles supplémentaires. Actuellement, HYDROTEL divise la simulation des processus hydrologiques en six sous-modèles. Pour chacun des processus hydrologiques, HYDROTEL offre le choix entre un ou plusieurs algorithmes (tableau 2). La disponibilité de ces divers algorithmes permet de sélectionner le sous-modèle le plus adapté possible sur un bassin versant compte tenu de la disponibilité des données d'entrée. Au tableau 2, les algorithmes de simulations des processus hydrologiques mis en évidence (caractères en gras) sont ceux utilisés lors des simulations hydrologiques courantes.

Tableau 2 : Processus simulés et algorithmes disponibles pour les simulations hydrologiques

Processus hydrologiques	Algorithmes disponibles
1. Interpolation des données météorologiques	1.1 Polygones de Thiessen 1.2 Moyenne pondérée aux 3 stations les plus proches
2. Évolution du couvert nival	2.1. Approche mixte (degrés-jour) et bilan énergétique
3. Évapotranspiration potentielle	3.1. Thornthwaite 3.2. Linacre 3.3. Penman-Monteith 3.4. Priestley-Taylor 3.5. Hydro-Québec
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 5.2 Onde diffusante

L'écoulement sur la partie terrestre du bassin est simulé par la production initiale d'un hydrogramme géomorphologique spécifique (HGM) à chaque UHRH et généré par

l'écoulement de pixel en pixel sur une UHRH d'une lame d'eau de référence (0.6 mm). Il est important de noter que les flux entre les algorithmes qui simulent les cinq premiers processus hydrologiques sont réalisés au niveau des UHRH. Ainsi, 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 l'hydrogramme géomorphologique précédemment estimé à partir de la structure spécifique d'écoulement interne à l'UHRH. Finalement, l'écoulement par le réseau hydrographique est simulé sur les tronçons du réseau. Les entrées de chaque tronçon proviennent alors du tronçon amont et des apports latéraux des UHRH connexes.

À titre indicatif, les paramètres du bassin qui doivent être ajustés au cours de l'étape de calage du modèle HYDROTEL sont essentiellement les suivants :

- ***Interpolation des données météorologiques*** : gradients verticaux de température et de précipitation, température de passage de la pluie en neige
- ***Évolution du couvert nival*** : taux de fonte à l'interface neige-sol, densité maximale du couvert nival, constante de tassement de la neige, taux de fonte dans l'air et seuil de température de fonte pour divers milieux (ex : conifères, feuillus, ouvert)
- ***Évapotranspiration potentielle*** : coefficient multiplicatif d'optimisation de l'évapotranspiration potentielle
- ***Bilan d'eau vertical*** : limites inférieures des trois horizons de sol, humidité relative initiale, coefficient d'extinction, coefficient de récession, coefficient additif d'optimisation de la classe du sol, coefficient multiplicatif d'optimisation de l'assèchement et la variation maximale de l'humidité relative par pas de temps
- ***Écoulement sur la partie terrestre du bassin*** : coefficient de rugosité de Manning pour les milieux forestiers, eau et autres, lame de référence pour l'hydrogramme géomorphologique

- **Écoulement par le réseau hydrographique** : coefficient d'optimisation de la rugosité, coefficient d'optimisation des largeurs des rivières

En complément et pour réaliser la simulation de ces processus hydrologiques, HYDROTEL nécessite l'ajout de fichier portant sur l'évolution annuelle de la profondeur racinaire et de l'indice foliaire des cultures et forêts.

- **Prise en compte des milieux humides**

Le développement d'HYDROTEL consistait en la prise en compte des MH, par l'ajout d'un module supplémentaire, afin de simuler leurs effets particuliers sur la réponse hydrologique à l'échelle du bassin versant. Les paramètres de superficie et de volume d'eau à des niveaux « normaux » et « maximaux » ont donc été définis sur la base de la littérature. Ces paramètres sont soit: (i) obtenus par le biais du SIG PHYSITEL, (ii) définis selon des relations issues de la littérature (Liu *et al.*, 2008, Neitsch *et al.*, 2005, Wang *et al.*, 2008), ou (iii) calculés au pas de temps journalier dans le modèle HYDROTEL.

L'intégration des MH dans le processus de modélisation nécessite la définition et le calcul de bons nombres d'indicateurs. Tout d'abord les surfaces des MHE isolés et riverains doivent être calculées afin de contribuer au calcul des bilans hydrologiques (précipitations, l'évaporation et l'écoulement de base des MHE). Cette surface est dépendante du volume d'eau emmagasiné par le MHE et est mise à jour à chaque pas de temps selon l'équation :

$$SA_{wet} = \beta \times V_{wet}^{\alpha} \quad (\text{Eq.1})$$

Où SA_{wet} représente la surface du milieu humide équivalent (ha), β un coefficient, V_{wet} le volume d'eau présent dans le milieu humide équivalent (m³) et α un exposant.

L'exposant α est calculé selon l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{\log_{10}(SA_{wet, mx}) - \log_{10}(SA_{wet, nor})}{\log_{10}(V_{wet, mx}) - \log_{10}(V_{wet, nor})} \quad (\text{Eq. 2})$$

Où $SA_{wet, mx}$ et $SA_{wet, nor}$ représente les surfaces dites maximale et normale du milieu humide équivalent (ha) alors que $V_{wet, mx}$ et $V_{wet, nor}$ représente les volumes maximal et normal pour le milieu humide équivalent (m³).

De même le coefficient β est calculé selon l'équation suivante :

$$\beta = \left(\frac{SA_{wet, mx}}{V_{wet, mx}^\alpha} \right) \quad (\text{Eq.3})$$

Pour les milieux humides riverains et isolés la surface maximale correspond à celle identifiée par le SIG PHYSITEL sur la carte d'occupation du territoire. La surface dite normale correspond, quant à elle, à 30% de la surface maximale tel que décrit dans les travaux de Liu *et al.* (2008). Pour les besoins de l'analyse de sensibilité sur les paramètres décrivant les MH, la valeur de la fraction 30 % sera dénommée ($SA_{wet, nor, frac}$).

Par contre, le calcul des volumes maximal et normal diffèrent entre les MH isolés et riverains équivalents. Ils correspondent respectivement aux équations 4 et 5 pour les milieux équivalents isolés et aux équations 6 et 7 pour les milieux équivalents riverains :

$$V_{wet, mx} = 0.96535 \times SA_{wet, mx} \quad (\text{Eq.4})$$

$$V_{wet, nor} = 0.96535 \times SA_{wet, nor} \quad (\text{Eq.5})$$

La valeur de 0.96535 (SA_{wet}) découle d'une relation aire-volume décrites dans les travaux de Yang *et al.*, (2005). Pour les besoins de l'analyse de sensibilité sur les paramètres décrivant les MH, cette valeur sera dénommée (SA_{wet}).

$$V_{wet, mx} = D_{wet, mx} \times SA_{wet, mx} \quad (\text{Eq.6})$$

$$V_{wet, nor} = D_{wet, nor} \times SA_{wet, nor} \quad (\text{Eq.7})$$

Où $D_{wet, mx}$ et $D_{wet, nor}$ représentent la hauteur maximale et la hauteur d'eau normale (aussi appelée plein bord) (m) présentent dans le milieu humide riverain équivalent. Les valeurs

attribuées à ces hauteurs d'eau sont de 0.5 m pour la hauteur maximale et 0.1 m pour la hauteur d'eau normale. Ces valeurs s'appuient sur les travaux de Liu *et al.* (2008). Notons que pour toutes ces équations (4, 5, 6 et 7), les surfaces doivent être exprimées en m².

Ainsi pour les milieux humides riverains équivalents, il est possible de déterminer la hauteur d'eau en fonction du volume d'eau présent dans le milieu humide équivalent selon l'équation suivante :

$$D_{wet} = \beta^{-1} \times V_{wet}^{1-\alpha} \quad (\text{Eq.8})$$

Où D_{wet} (m) représente la hauteur d'eau présente dans le milieu humide riverain équivalent en fonction du volume présent V_{wet} (m³).

Enfin, lors du calcul du bilan hydrologique sur chacun des MHE, divers éléments doivent être pris en compte.

L'équation du bilan pour les milieux humides isolés équivalents est la suivante :

$$V_{wet,2} = V_{wet,1} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (\text{Eq.9})$$

Où $V_{wet,2}$ et $V_{wet,1}$ (m³) représente les volumes d'eau présents en fin (2) et au début (1) du pas de temps de simulation, V_{flowin} (m³) le volume d'eau intercepté par le MHE en fonction de l'aire drainée par celui-ci, V_{pcp} (m³) l'apport en eau par les précipitations ou la fonte du couvert de neige, V_{evap} (m³) le volume en eau perdu par évaporation, V_{seep} (m³) le volume d'eau s'écoulant à la base du milieu humide et $V_{flowout}$ (m³) le volume quittant le MHE à la surface.

À noter que pour les équations suivantes la multiplication par 10 vise simplement l'harmonisation des unités.

Plus spécifiquement :

$$V_{flowin} = (Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw}) \times (fr_{wet} \times SA_{uhrh} - SA_{wet}) \times 10 \quad (\text{Eq.10})$$

Où fr_{wet} représente la fraction de l'UHRH occupé par la somme de la superficie du milieu humide et son aire drainée; Q_{surf} , Q_{lat} et Q_{gw} (mm) représentent les écoulements de surface, latéral et de base calculés sur l'UHRH par le modèle BV3C, SA_{uhrh} (ha) représente la superficie de l'UHRH. Comme le bilan se fait à l'échelle du MH, on doit soustraire de $fr_{wet} \times SA_{uhrh}$ la superficie occupé par le milieu humide SA_{wet} (ha).

$$V_{pcp} = PCP_{uhrh} \times SA_{wet} \times 10 \quad (\text{Eq.11})$$

Où PCP_{uhrh} (mm) la quantité de précipitations ou la fonte calculée par HYDROTEL pour une UHRH donné.

$$V_{evap} = \eta \times ETP_{UHRH} \times SA_{wet} \times 10 \quad (\text{Eq.12})$$

Où ETP_{UHRH} (mm) représente l'évapotranspiration potentielle pour une UHRH donnée calculée par HYDROTEL et η représente un coefficient d'évaporation (0.6). Cette valeur correspond à celle utilisée dans le modèle SWAT (Neitsch *et al.*, 2005). Ainsi l'eau perdue par évaporation à l'échelle du milieu humide correspond à 60% de l'évapotranspiration potentielle calculé pour une UHRH.

$$V_{seep} = K_{sat} \times SA_{wet} \times \Delta t \times 10 \quad (\text{Eq.13})$$

Où K_{sat} représente la conductivité hydraulique à saturation à la base du MHE (0.5 mm/h). Cette valeur correspond à celle utilisée dans le modèle SWAT (Liu *et al.*, 2008, Neitsch *et al.*, 2005). Δt (h) représente le pas de temps de la simulation exprimé en heure.

La figure 3, ci-dessous, présente l'algorithme de calcul utilisé pour les flux d'eau sortant en surface associés aux MHE isolés ($V_{flowout}$).

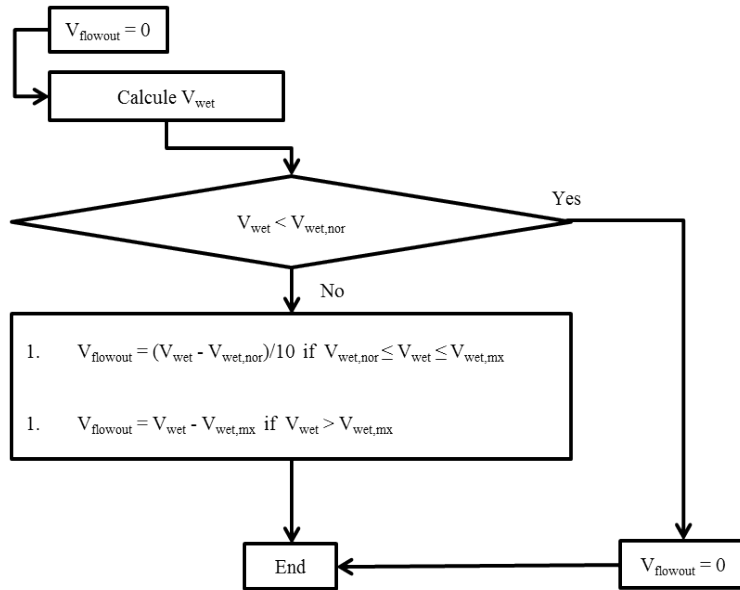


Figure 3 : Algorithme de calcul pour l'estimation des flux associés aux MH isolés

Pour les milieux humides riverains équivalents l'équation de bilan est très similaire :

$$V_{wet,2} = V_{wet,1} + V_{flowin} - S_{wet} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (\text{Éq.14})$$

Plus spécifiquement, en accord avec les travaux de Liu *et al.*, (2008), le terme Q_{gw} n'est pas inclus dans le calcul du volume intercepté par le MHE (V_{flowin}) en fonction de l'aire drainée par celui-ci. Le retrait de ce terme répond à l'hypothèse que l'écoulement de base calculé par HYDROTEL dans le modèle BV3C contribue plus spécifiquement à la pérennité des écoulements en rivière en période d'étiage. En d'autres termes, certains relevés terrains tendent à démontrer que l'élévation du fond des MH riverains est supérieure à celle du cours d'eau avoisinant. Par conséquent, l'écoulement de base dans les sols ne contribue pas à la variation du volume d'eau présent dans le MH riverain. Cette hypothèse pourrait être validée à l'aide de campagnes de terrain notamment en période estivale sèche où les MH riverains s'assèchent alors que l'écoulement dans les cours d'eau est soutenu par les eaux de la nappe phréatique. Également le terme $V_{flowout}$ est remplacé par le terme S_{wet} qui représente le volume d'eau qui est dirigé vers (+) ou retiré (-) du tronçon de rivière avoisinant.

La figure 4, ci-dessous, présente l’algorithme de calcul utilisé pour les flux d’eau sortant en surface associés aux MHE riverains.

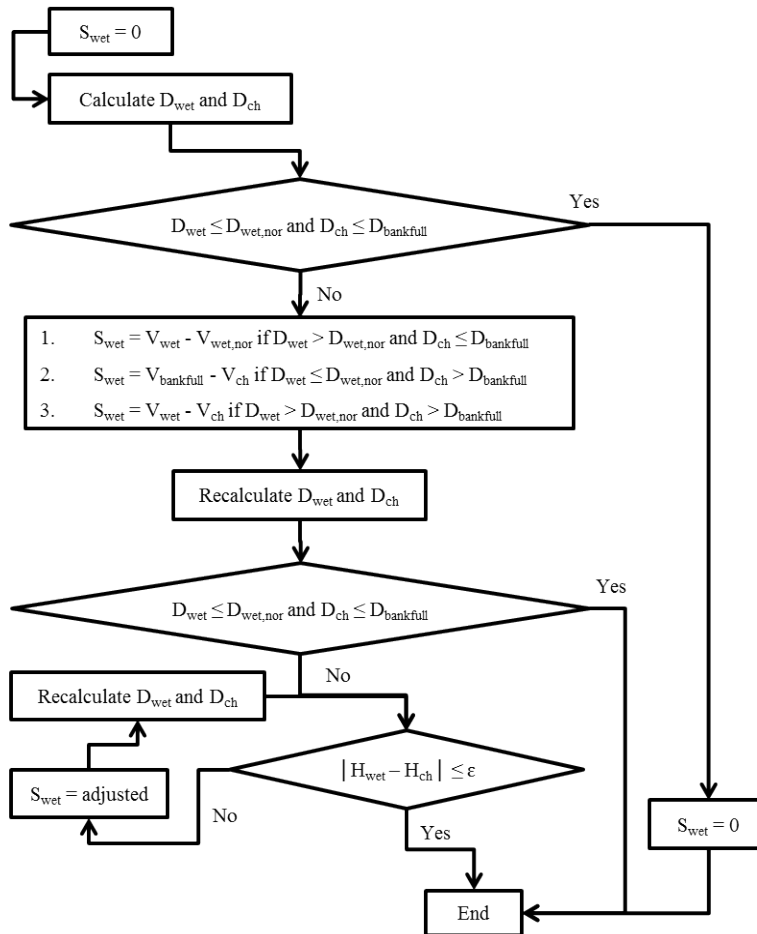


Figure 4 : Algorithme de calcul pour l’estimation des flux associés aux MH riverain

À noter que pour ce calcul les échanges sont calculés en fonction des hauteurs d’eau présentes à la fois dans les tronçons D_{ch} et les MHE sollicités D_{wet} . En ce sens, une équation permettant le calcul de la profondeur des tronçons de rivières (qui correspond aussi à la hauteur d’eau plein bord) a été ajoutée à HYDROTEL. Cette équation est identique celle utilisée par le modèle SWAT et décrite dans les travaux d’Ames *et al.*, (2009) :

$$D_{bankfull} = 0.13 \times SA_{ch}^{0.4} \quad (\text{Eq.15})$$

Où $D_{bankfull}$ (m) représente la profondeur du cours d'eau (ou la hauteur d'eau plein bord) et SA_{ch} (km²) la superficie totale amont drainée par le tronçon.

À cette équation s'ajoute une équation déjà existante dans HYDROTEL qui permet d'estimer la largeur du tronçon.

$$W_{ch} = 0.49 \times SA_{ch}^{0.62} \quad (\text{Eq.16})$$

Où W_{ch} représente la largeur du cours d'eau (m) en fonction de sa superficie amont drainée SA_{ch} (km²).

Aussi le schéma introduit les variables H_{wet} et H_{ch} qui représentent la cote du niveau d'eau dans le MH comparée à celle du tronçon avoisinant. L'écart entre ces niveaux d'eau peut donc satisfaire un critère ε afin de terminer les itérations qui visent à équilibrer les niveaux d'eau en surface entre les tronçons et les MHE riverains. À noter que les niveaux correspondants à la hauteur d'eau normale pour les MHE riverains ou la hauteur d'eau plein bord pour les tronçons avoisinants sont estimés égaux.

Lorsque la hauteur d'eau dans le MHE riverain est inférieure à la hauteur d'eau normale et que la hauteur d'eau dans le tronçon est inférieure à la hauteur d'eau plein bord, il n'y a pas d'échange en surface ($S_{wet} = 0$). Pour de telles conditions, le modèle permet alors des échanges latéraux de volumes d'eau à travers la berge selon la loi de Darcy en se basant sur l'équation suivante. Le terme S_{wet} dans l'équation 14 prend alors la forme suivante :

$$G_{wet} = k \times b \times L_{wet} \times \frac{H_{wet} - H_{ch}}{d} \Delta t \quad (\text{Eq.17})$$

Où k représente la conductivité hydraulique à saturation de la berge (m/h) (0.025 m/h ou 25 mm/h) et b représente l'épaisseur de l'aquifère (2.0 m). Ces valeurs sont issues du modèle SWAT ((Neitsch *et al.*, 2005). L_{wet} la longueur du MHE riverain (m), H_{wet} et H_{ch} les niveaux d'eau mentionnés ci-dessus (m), d la distance des échanges latéraux (m) et Δt le pas de temps de la simulation (heure). À noter que la distance d est estimée à $(3 \times W_{ch})$ donc trois (3) fois la largeur du tronçon estimé selon l'équation 16. Le volume d'eau G_{wet} (m³) peut donc être

acheminé du MHE vers le tronçon (+) ou l'inverse (-) du tronçon vers le MHE riverain. À noter qu'il n'y a pas d'échange latéraux à travers la berge dans le cas où le MH riverain est asséché et que le niveau d'eau dans le tronçon est inférieur au niveau du fond du MHE riverain. Finalement le calcul du transfert latéral prend part aux itérations lorsque la hauteur d'eau du MHE riverain est égale à la hauteur d'eau normale et que celle du tronçon est inférieure à la hauteur plein bord ou l'inverse. Ainsi les échanges latéraux peuvent être estimés afin de préserver l'équilibre hydrologique entre les MHE riverains et les tronçons associés.

Notons enfin, à titre de précision et de rappel, que l'intégration des MH au sein du modèle HYDROTEL se fait à des niveaux différents. En effet, les MH isolés sont pris en compte au niveau des processus du bilan d'eau vertical alors que les MH riverains sont intégrés au niveau des écoulements par le réseau hydrographique.

4.3.3 Calage et validation du modèle hydrologique HYDROTEL

- *Calage du modèle hydrologique*

Le calage d'un modèle hydrologique pour un BV consiste à ajuster les paramètres physiques et les fonctions qui le gouvernent de façon à reconstituer un hydrogramme similaire à celui observé. Il consiste à définir le modèle à construire afin de le faire coïncider au maximum avec les observations réelles prises comme référence. Dans le cadre des travaux présentés, le calage du modèle hydrologique HYDROTEL a été réalisé à l'échelle des secteurs précédemment définis à savoir pour la Bécancour, les secteurs aval (AV), médian (MED) et amont (AM) et pour la Yamaska, les secteurs aval (AV), et les deux secteurs amonts (AM1, AM2). Cette échelle a permis de définir des paramètres adaptés à chacun des secteurs, rendant le calage plus cohérent.

Afin de s'assurer de la validité de ces ajustements, le calage est réalisé sur une période couvrant cinq années consécutives. De plus, une période proche de la date à laquelle a été réalisée la carte d'occupation des sols utilisée est requise afin de s'assurer de la bonne prise en compte des milieux présents et éviter des ajustements arbitraires liés à des artefacts de correction. Pour le Québec, une année de calage débute à l'automne et se termine au début de l'automne de l'année suivante afin de s'assurer que toutes les précipitations de neige soient enregistrées rendant ainsi disponible le volume nécessaire à la crue printanière.

- *Qualité du calage*

Le modèle hydrologique HYDROTEL permet une appréciation visuelle de l'impact des ajustements sur l'hydrogramme simulé. Le critère visuel consiste à comparer, pour chaque année, la forme de l'hydrogramme de la crue observée avec celle de la crue simulée. Cependant, la modélisation fait intervenir des paramètres non directement mesurables et devant être calés en optimisant la valeur d'un critère numérique appelé fonction objectif, basée sur l'erreur du modèle. Le critère de Nash et Sutcliffe (1970), basé sur l'erreur quadratique moyenne, est très couramment utilisé comme fonction objectif, et permet d'évaluer la qualité de l'hydrogramme simulé à partir des écarts entre les valeurs journalières simulées et observées.

Ce critère, égal à un en condition d'ajustement parfait, est considéré acceptable pour le calage d'un bassin versant non régularisé (c-à-d., sans infrastructure telle que des barrages) lorsque sa valeur se situe entre 0,7 et 0,8.

- ***Validation du calage***

Lorsque le calage est jugé satisfaisant selon les critères d'évaluation, une validation est réalisée. L'étape de validation consiste en une simulation portant sur une période différente de celle du calage, mais avec les mêmes valeurs de paramétrage. De plus, la même fonction dite objectif est utilisée afin de vérifier la qualité de la validation. Les résultats obtenus doivent corroborer la qualité du calage. En cas de résultats moins satisfaisants et donnant des valeurs du critère de validation en deçà du seuil d'acceptabilité, un nouveau calage devrait être réalisé.

4.3.4 Méthodes d'analyses

- ***Analyse comparative des sorties du modèle hydrologique***

L'analyse sous-tend en premier lieu l'évaluation du rôle des MH afin de qualifier les BSÉ associés et de quantifier leur impact sur les débits en rivières. La méthode employée pour la modélisation hydrologique repose sur une analyse comparative des données de sorties du modèle HYDROTEL, à la suite de deux simulations en parallèle : (i) la première avec la prise compte des milieux humides et (ii) la seconde sans considérer le rôle hydrologique des milieux humides tout en préservant les paramètres des différents processus simulés par HYDROTEL calés précédemment avec la prise en compte des milieux humides. Les différences observées entre les sorties des deux modalités de simulation sont assumées comme étant essentiellement le seul fait des fonctions assurées par les MH. Cette même procédure est appliquée sur l'ensemble des analyses pour l'obtention des résultats de l'étude en cours. À noter que les résultats se limiteront essentiellement à l'exutoire des bassins à l'étude, favorisé pour son caractère sommatif visant à décrire l'impact global des milieux humides sur l'ensemble du bassin versant, et ce bien que le modèle HYDROTEL permette d'obtenir au besoin les débits de tous les tronçons du réseau hydrographique. Certains résultats présentés à un autre niveau du réseau hydrographique sont clairement mentionnés et justifiés dans les sections suivantes.

- *Analyse de sensibilité*

Suite au calage et à la validation du modèle hydrologique HYDROTEL, une analyse de sensibilité des paramètres descriptifs des MH a été conduite pour le bassin Bécancour. Cette analyse visait essentiellement à cibler les paramètres qui sont les plus influents pour diverses conditions hydrologiques soit en périodes (i) d'étiages, (ii) de crues ou (iii) dites normales. Pour cette étude, la valeur d'un seul paramètre à la fois a été modifiée (analyse de sensibilité locale), les autres étant fixées aux valeurs assignées lors du calage (valeur de référence). Pour chacun des paramètres une variation de $\pm 25\%$ a été effectuée. Afin de connaître l'impact de cette variation sur les débits, des simulations ont été réalisées sur une période continue de plus de 30 ans (1 Octobre 1969- 30 Septembre 2010). Les résultats de ces simulations ont ensuite été comparés aux résultats obtenus avec la simulation de référence, pour laquelle tous les paramètres étaient fixés à leur valeur de référence. Les résultats s'expriment sous forme d'écart (en %) entre les débits simulés avec les augmentations et les diminutions de chaque paramètre par rapport aux débits de référence à l'exutoire du bassin Bécancour. Comme certains paramètres sont spécifiques aux MHE isolés ou riverains, les résultats ont été normalisés en fonction de la fraction totale (en %) du BV occupée et drainée par les MH concernés, selon l'expression suivante :

$$VAR = \left(\frac{Q_{AMH} - Q_{SMH}}{Q_{SMH}} \right) / (fr_{wet} \times SA_{uhrh}) \quad (\text{Eq.18})$$

Où VAR représente l'impact de la variation (%) d'un paramètre sur les débits et Q_{AMH} et Q_{SMH} représentent les débits calculés respectivement avec et sans la prise en compte des MH.

Les résultats sont présentés sous formes de diagramme en boîte (box plot) afin de visualiser la distribution des écarts pour chaque simulation et conditions hydrologiques (étiage, crue, normale). La méthode de détermination des limites relatives aux conditions hydrologiques est identique à celle décrite à la section 4.4.1 *Définitions des conditions hydrologiques* portant sur la méthodologie visant la détermination de l'impact général des MH sur les débits. À noter que l'analyse de sensibilité se limite au bassin de la Bécancour en raison de la plus forte présence de milieux humides sur ce bassin. Il n'a pas été jugé nécessaire de faire le même exercice sur le

bassin Yamaska car il est raisonnable d'affirmer que les résultats auraient été similaires du fait que les paramètres descriptifs des MH sont identiques pour chaque bassin.

4.4 Rôle des MH en conditions actuelles - Livrable 2B

4.4.1 Définitions des conditions hydrologiques

Afin d'illustrer l'impact des MH sur les conditions d'écoulement, une première analyse a été réalisée pour l'ensemble des débits composant l'hydrogramme. Ainsi, trois conditions hydrologiques distinctes soit (i) étiage, (ii) crue et (iii) normale ont été définies. Pour ce faire nous avons favorisé une représentation sous la forme de courbe de fréquences relatives cumulées des débits pour les diverses conditions mentionnées. Nous avons donc mis en graphique les courbes de fréquences relatives des débits obtenus avec et sans prise en compte des MH à l'exutoire des bassins. Les classes des débits ou conditions hydrologiques ont été déterminées en fonction de certains seuils.

Afin de procéder à la classification des débits simulés, il est nécessaire de conduire une analyse de fréquence sur l'ensemble des débits simulés. Une telle analyse permet d'identifier des seuils départageant les conditions hydrologiques. Le tableau 3 présente les seuils de fréquence de non-dépassement utilisés pour départager les débits simulés ainsi que les débits associés à ces seuils.

Tableau 3 : Seuils de fréquence de non-dépassement et débits associés aux conditions hydrologiques

Fréquence de non-dépassement	Débits associés (m^3/s^{-1})	Conditions hydrologiques
> 0.9726	> 250.50	Crues
≥ 0.0274 et ≤ 0.9726	7.58 à 250.50	Normales
< 0.0274	< 7.58	Étiages

À ces seuils correspondent des débits moyens calculés à l'aide des débits simulés avec et sans prise en compte des MH. Le débit associé à l'étiage représente la valeur dépassée 97% de l'année. Cette valeur correspond communément au débit caractéristique d'étiage (DCE) représentant le débit égalé ou non-dépassé 10 jours par an, soit, autrement dit, au débit dépassé

355 jours par an. Le débit associé aux conditions de crues correspond, à l'inverse, au débit égalé ou dépassé 10 jours par an, soit autrement dit, au débit non-dépassé 355 jours par an. Suite à cette analyse, l'ensemble des débits simulés peut être classé en fonction des seuils relatifs aux conditions hydrologiques.

4.4.2 Définition des indicateurs hydrologiques

Les régimes hydrologiques sont soumis à des perturbations drastiques caractérisées par des valeurs extrêmes telles que le débit maximum et le débit minimum. L'usage d'indicateurs hydrologiques pour décrire ces régimes est alors courant afin de réduire les efforts de calcul et les redondances dans les variables d'analyse, tout en s'assurant de la représentativité des critères des régimes hydrologiques et de leur transférabilité à d'autres contextes. Dans le cadre de ces travaux, des indicateurs synthétiques et opérationnels, pour la caractérisation des régimes hydrologiques des deux bassins versants à l'étude, ont été définis sur la base de ceux utilisés par le CEHQ et le MDDEFP, dans un souci d'uniformisation.

- Débit d'étiage pour différentes récurrences et différentes durées.
 - Q 2-7 : Débit d'étiage de récurrence deux ans sur sept jours consécutifs
 - Q 10-7 : Débit d'étiage de récurrence dix ans sur sept jours consécutifs
 - Q 5-30 : Débit d'étiage de récurrence cinq ans sur trente jours consécutifs
- Débit de crue pour différentes récurrences et différentes durées.
 - Q 2-max : Débit de crue de récurrence deux ans
 - Q 20-max : Débit de crue de récurrence vingt ans
 - Q 100-max : Débit de crue de récurrence cent ans

Ces indicateurs sont également déterminés pour différentes périodes (i) annuelle (1er janvier au 31 décembre) et (ii) estivale (1er juin au 31 octobre) couvrant la période d'écoulement en eaux libres. De plus, ces indicateurs sont obtenus par une représentation suivant une distribution lognormale. Cette distribution a été retenue suite à un nombre important de tests visant à identifier la loi qui est était la plus apte à représenter les valeurs permettant le calcul des indicateurs en se basant sur le critère BIC (*Bayesian information criterion*, BIC, (Schwarz, 1978)). L'ensemble de ces tests ne sont pas présentés car ils alourdiraient inutilement le contenu

du rapport. Aussi à titre de précision, les indicateurs de crues découlent d'une analyse statistique sur les débits maximums simulés pendant la période d'intérêt, alors que les indicateurs d'étiages découlent d'une analyse statistique sur les débits moyens minimums sur sept (7) et trente (30) jours consécutifs pendant la période visée.

4.4.3 Détermination de l'impact des MH

L'ensemble de ces indicateurs servira de points d'analyse à l'évaluation de l'impact des MH sur la réponse hydrologique du BV. L'impact des MH sur ces indicateurs s'exprime par une variation (%) de l'indicateur calculé avec prise en compte des MH par rapport au même indicateur calculé sans prise en compte des MH. Cet impact peut être représenté par l'équation suivante (19) :

$$IMH = 100x \left[\frac{(IH_{AMH} - IH_{SMH})}{IH_{SMH}} \right] \quad (\text{Eq.19})$$

Où IMH représente l'impact des MH sur un indicateurs hydrologique; IH_{AMH} l'indicateur hydrologique calculé avec la prise en compte des MH et IH_{SMH} l'indicateur hydrologique calculé sans la prise en compte des MH.

Tenant compte des indicateurs hydrologiques et des conditions hydrologiques qui s'y rattachent, l'interprétation de cet indicateur IMH peut se résumer par les variations reportées dans le tableau 4 :

Tableau 4 : Variations de l'indicateur IMH et interprétations en condition actuelle

Conditions hydrologiques	Indicateurs hydrologiques	Indicateur IMH	Interprétation
Crues	Q ₂ max ; Q ₂₀ max ;	positif	Impact négatif des MH
	Q ₁₀₀ max	négatif	Impact positif des MH
Étiages	Q ₂₋₇ ; Q ₁₀₋₇ ; Q ₅₋₃₀	positif	Impact positif des MH
		négatif	Impact négatif des MH

4.5 Rôle des MH en conditions futures - Livrable 2C

4.5.1 Évaluation du rôle des MH en condition de CC

Afin de suivre l'évolution des débits en condition de changement climatique, trois périodes sont définies : (i) une période de référence H1 (1969-2000), (ii) une période actuelle H2 (2001-2050) et (iii) une période future H3 (2051-2099). D'une part, pour évaluer l'impact des CC, le suivi des hydrogrammes simulés aux exutoires des BV de la Bécancour et de la Yamaska correspondant à l'occupation des sols de 2011 pour les dix simulations sur les périodes actuelle (H2) et future (H3) a été conduit. D'autre part, pour évaluer l'impact des MH, une analyse de la variation des indicateurs hydrologiques, effectuée sur l'ensemble des dix simulations de projections climatiques et pour le même scénario d'occupation de sol de 2011, a été réalisée.

4.5.2 Évaluation de l'impact des MH en mode prédictif

Les différents scénarios d'occupation de sol à l'horizon 2050 sont ceux réalisés par l'Université de Sherbrooke (UdS) et dont les caractéristiques sont définies dans le rapport. *Revue de la cartographie des milieux humides et application d'une méthode cartographique pour l'occupation du territoire de deux bassins versants au Québec, Canada (Livrable 4A)*. Cependant, nous apporterons des nuances aux valeurs présentées et dresserons un nouveau tableau récapitulant les variations apportées sur les superficies couvertes par les MH intégrées dans le SIG PHYSITEL et prises en compte dans la modélisation hydrologique.

Pour chaque scénario d'occupation de sol, les simulations ont été réalisées avec l'ensemble des données fournies par le MRCC, couvrant la période 1961-2099. Cependant, les résultats se limiteront à l'exutoire des BV à l'étude et pour le seul horizon H3 (2051-2099). Leur représentation sous forme d'histogrammes, permettra d'évaluer le taux de variation des indicateurs hydrologiques pour chacune des projections de scénarios en comparaison à l'occupation actuelle de 2011.

Les résultats relatifs aux taux de variations des indicateurs hydrologiques sont calculés selon l'équation suivante :

$$IMH_{sc_occ} = 100x \left[\frac{(IH_{AMH} - IH_{SMH})}{IH_{SMH,REF}} \right] - IMH_{REF} \quad (\text{Eq.20})$$

Où IMH_{sc_occ} représente l'impact des MH sur la variation d'un IH pour un scénario d'occupation du sol projeté (Op, Pe, SQ, TA) en comparaison avec l'impact des MH sur l'un indicateur (IMH_{REF}) pour le scénario de référence (2011); IH_{AMH} l'IH local calculé avec la prise en compte des MH; IH_{SMH} l'IH local calculé sans la prise en compte des MH; $IH_{SMH,REF}$ l'IH calculé sans la prise en compte des MH pour le scénario d'occupation du sol de référence (2011).

À titre de rappel, le paramètre IMH_{REF} est calculé selon l'équation 19. En d'autres mots, sachant que les MH diminuent les IH de crue, on peut dire que si la valeur de l'équation 20 est positive, cela indique que l'impact des MH du scénario d'occupation du sol est inférieur à l'impact actuel des MH (occupation 2011). À l'inverse, si cette valeur est négative cela signifie que l'impact des MH du scénario d'occupation du sol est plus important que l'impact actuel des MH, tout cela dans un contexte de changements climatiques. Inversement, sachant que les MH augmentent les IH d'étiage, on peut dire qu'une valeur positive indique que l'impact des MH du scénario d'occupation du sol est plus important que l'impact actuel des MH. Alors que si cette valeur est négative que l'impact des MH du scénario d'occupation du sol est moins important que l'impact actuel de ces milieux, toujours dans un contexte de CC. Le tableau 5 résume ces conditions :

Tableau 5 : Variations de l'indicateur IMH et interprétations en CC

Conditions hydrologiques	Indicateurs hydrologiques	Indicateur IMH_{sc_occ}	Interprétation
Crues	$Q_2 \text{ max} ; Q_{20} \text{ max} ; Q_{100} \text{ max}$	positif	Impact négatif du scénario
		négatif	Impact positif du scénario
Étiages	$Q_{2-7} ; Q_{10-7} ; Q_{5-30}$	positif	Impact positif du scénario
		négatif	Impact négatif du scénario

5. RÉSULTATS

5.1 Modélisation hydrologique - Livrable 2A

5.1.1 Intégration au sein du SIG PHYSITEL

Les figures 5 et 6 illustrent les résultats respectifs de l'étape de segmentation du BV de la Bécancour et de la Yamaska en UHRH. La discrétisation du BV de la Bécancour aboutit à l'obtention de 1813 UHRH d'une superficie moyenne de 140 ha. Pour le BV de la Yamaska, ce sont 1299 UHRH d'une superficie moyenne de 370 ha qui ont été obtenus. Ces segmentations assurent pour les deux BV une représentation satisfaisante de l'hétérogénéité spatiale et permettront d'effectuer des simulations hydrologiques dans un délai raisonnable

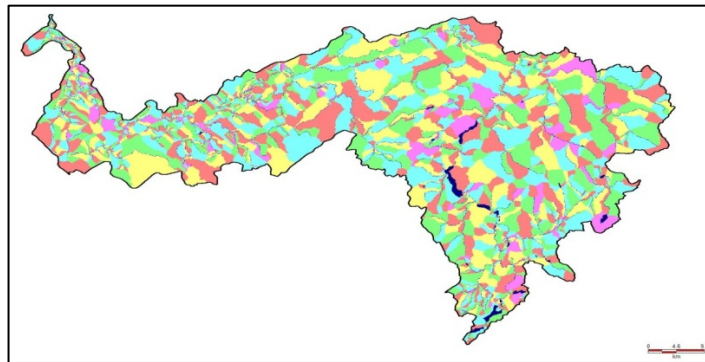


Figure 5 : Segmentation en UHRH du BV de la Bécancour

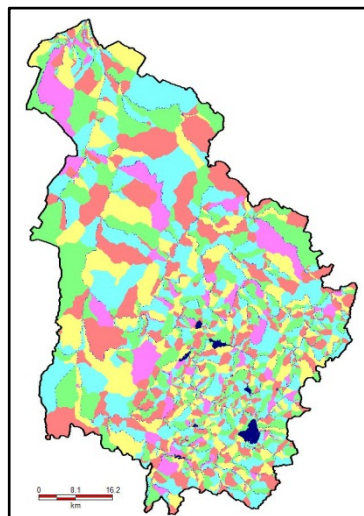


Figure 6 : Segmentation en UHRH du BV de la Yamaska

Les cartes d'occupation des sols utilisées pour le projet de modélisation sont issues des mêmes sources que celles citées au paragraphe 4.2.2 *Données cartographiques*, mais diffèrent de par leur classification d'occupation avec une distinction de la classe « forêt » en 3 sous-classes (feuillus, mixte et résineux). Les figures 7 et 8 présentent les portraits de l'occupation du sol pris en compte dans PHYSITEL sur les BV de la Bécancour et de la Yamaska.

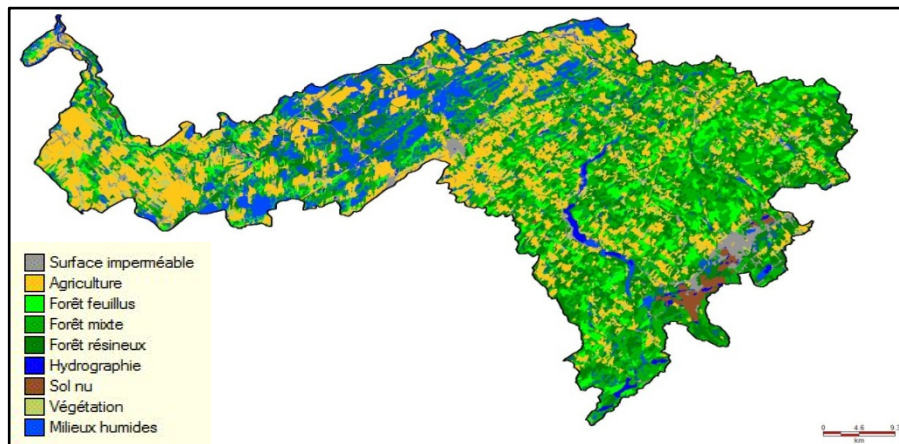


Figure 7 : Carte d'occupation du sol sur le BV Bécancour

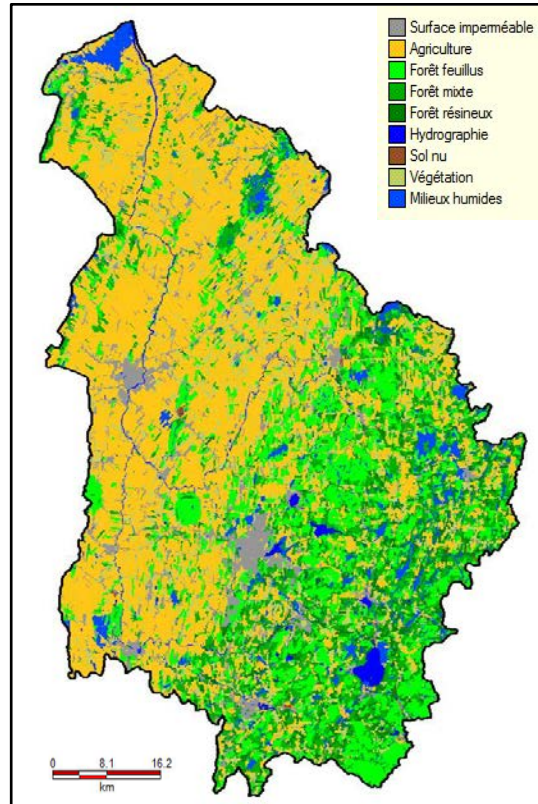


Figure 8 : Carte d'occupation du sol sur le BV Yamaska

Le tableau 6 décrit les pourcentages occupés par chacune des classes sur les bassins versants à l'étude.

Tableau 6 : Pourcentage de couverture des classes d'occupation des sols sur le BV Bécancour

Classes d'occupation du sol	Superficie (%)	
	Bécancour	Yamaska
Surface imperméable	4	7
Agriculture	23	43
Forêt feuillus	9	17
Forêt mixte	27	13
Forêt résineux	18	5
Hydrographie	1	1
Sol nu	1	0
Végétation	6	9
Milieus humides	12	4

Le tableau 6 démontre clairement que le BV de la Bécancour présente des dominances des milieux forestiers (feuillus, conifères, mixte) et agricole avec respectivement 54% et 23% d'occupation du sol. Également, notons la présence importante des MH (12%) en comparaison des autres classes. Pour le BV de la Yamaska, il montre la même tendance de dominance des milieux agricoles et forestiers (feuillus, conifères, mixte), mais avec un rapport inversé à celui observé sur la Bécancour, avec respectivement 43% de milieux agricoles et 35% de milieux forestiers. En revanche, la superficie occupée par les MH (4%) est moins importante en comparaison des autres classes.

La dernière étape d'intégration, illustrée aux figures 9 et 10, correspond à l'identification spécifique des MH isolés et riverains par le SIG PHYSITEL et de leurs aires drainées.

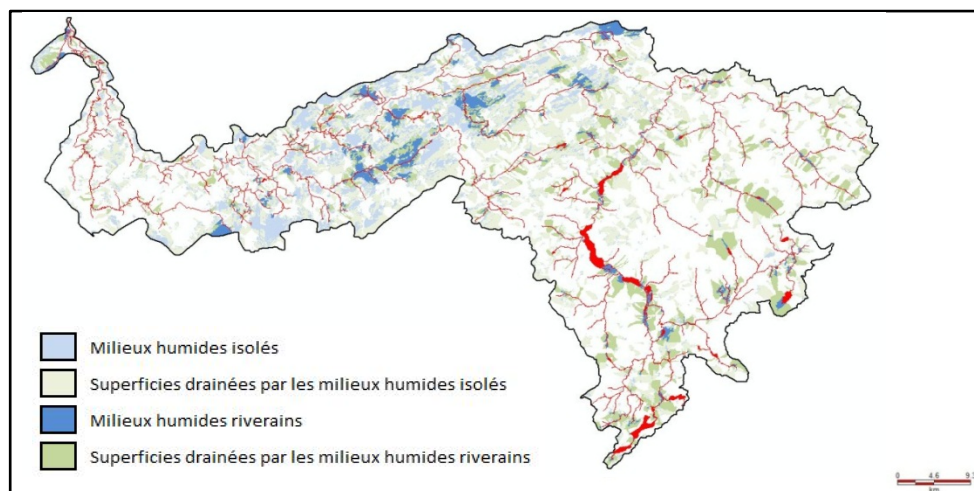


Figure 9 : Carte des MH et de leurs aires drainées sur le BV Bécancour

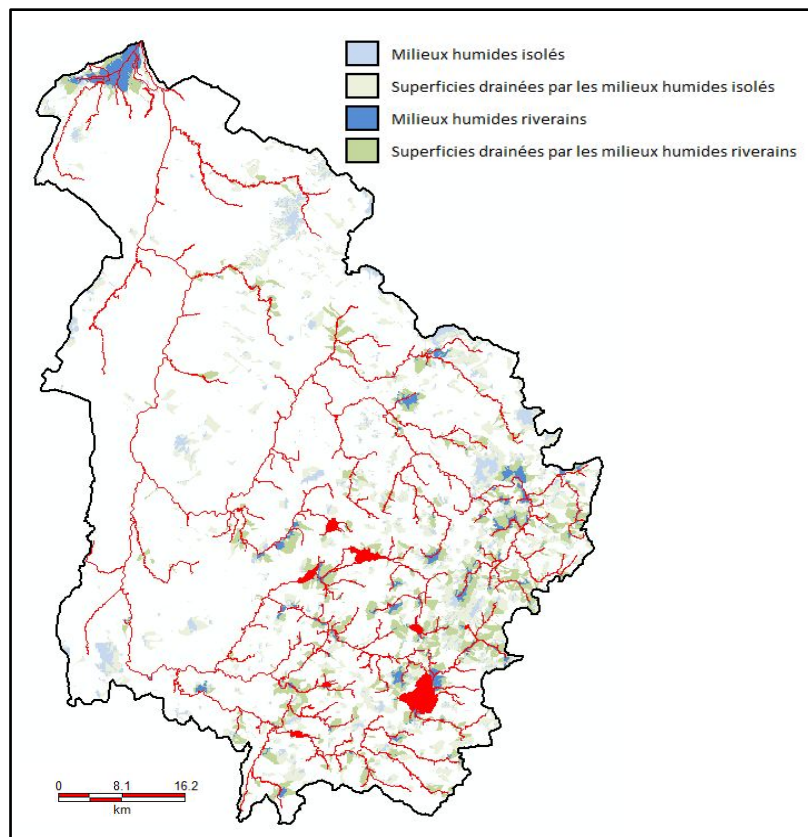


Figure 10 : Carte des MH et de leurs aires drainées sur le BV Yamaska

Le tableau 7 présente un descriptif des couvertures et des aires drainées pour les MH isolés et riverains pour chacun des deux BV (G) ainsi que pour chacun des secteurs théoriques (AV, MED, AM) définis à la section 4.2.1 *Échelle spatiale de modélisation*.

Ces résultats démontrent clairement que le bassin de la Bécancour présente un nombre plus important de MH isolés que riverains. Le pourcentage d'occupation des MH sur le territoire de la Bécancour (12%) est trois fois supérieur à celui de la Yamaska (4%). Cependant, la superficie totale drainée par ces milieux est seulement deux fois supérieure (29%) à celle de la Yamaska (13%). Ainsi, il est intéressant de noter que la somme de ces pourcentages est loin d'être négligeable pour les BV de la Bécancour (41%) et de la Yamaska (17%). Notons également une répartition plus homogène des MH sur l'ensemble du territoire de la Yamaska en comparaison de celle observée sur la Bécancour.

Tableau 7 : Couverture et aires drainées pour les MH isolés et riverains sur les BV

Caractéristique du bassin et des milieux humides	Bécancour				Yamaska			
	G	AV	MED	AM	G	AV	AM1	AM2
Superficie totale du BV (km ²)	2597	346	917	1334	4788	1551	1610	1627
Superficie totale des MH (km ²)	307	38	218	52	202	53	84	65
Superficie occupée par les MH (%)	12	11	24	4	4	3	5	4
Superficie totale des MH isolés (ha)	210	30	157	23	110	28	50	32
Superficie des MH isolés (%)	68	80	72	44	54	53	59	49
Superficie du BV occupée par les MH isolés (%)	8	9	17	2	2	2	3	2
Superficie totale des MH riverains (ha)	97	7	61	29	92	25	34	33
Superficie des MH riverains (%)	32	20	28	56	46	47	41	51
Superficie du BV occupée par les MH riverains (%)	4	2	7	2	2	2	2	2
Superficie totale drainée par les MH (ha)	754	76	338	339	633	93	277	263
Superficie du BV drainée par les MH (%)	29	22	37	25	13	6	17	16
Superficie totale drainée par les MH isolés (ha)	464	57	235	172	341	68	152	122
Superficie du BV drainée par les MH isolés (%)	18	16	26	13	7	4	9	7
Superficie totale drainée par les MH riverains (ha)*	330	24	128	179	305	27	129	149
Superficie du BV drainée par les MH riverains (%)	13	7	14	13	6	2	8	9
Superficie totale occupée ou drainée par les MH (ha)	1061	114	556	391	835	146	361	328
Superficie du BV occupée ou drainée par les MH (%)	41	33	61	29	17	9	22	20

*Noter que la superficie drainée par les MH riverains peut inclure des MH isolés et leurs aires drainées respectives

5.1.2 Intégration au sein du modèle hydrologique HYDROTEL

Suite à l'application du SIG PHYSITEL, les BV à l'étude ont été intégrés au modèle hydrologique HYDROTEL. Les figures 11 et 12 présentent l'intégration des BV Bécancour et Yamaska au modèle HYDROTEL. A noter que les libellés (H et M) représentent les stations de jaugeage (hydrométrique) (H) et les stations météorologiques (M) fictives et dérivées de la grille météorologique du CEHQ.

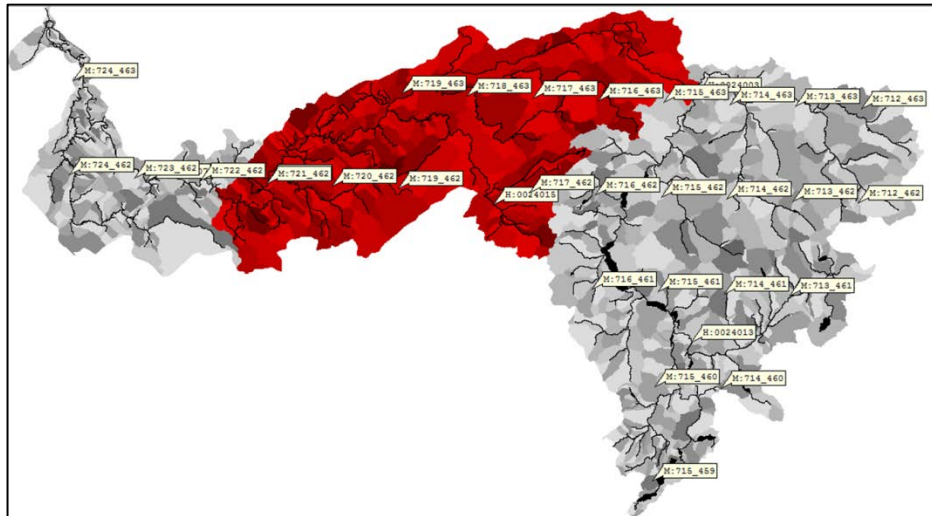


Figure 11 : Intégration du BV Bécancour au modèle HYDROTEL

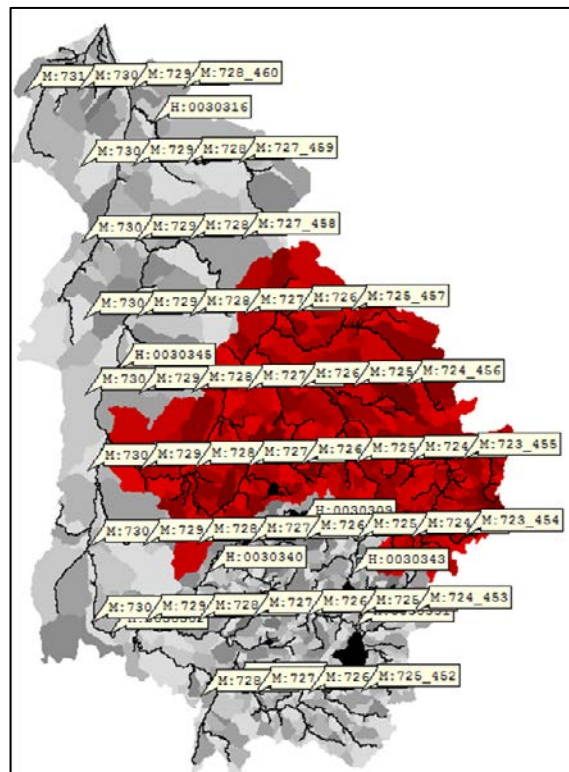


Figure 12 : Intégration du BV Yamaska au modèle HYDROTEL

Pour le projet, trois stations hydrométriques présentes sur les bassins ont été sélectionnées afin d'évaluer la performance du modèle. L'emplacement de ces stations s'harmonise avec la délimitation des BV selon les trois secteurs relativement homogènes en termes d'occupation de sol, de topographie, de type de sol, définis aux sections 4.2.1 *Échelle spatiale de modélisation*.

Le tableau 8 introduit les différentes stations hydrométriques sur les BV Bécancour et Yamaska.

Tableau 8 : Stations hydrométriques associées aux simulations hydrologiques sur les BV Bécancour et Yamaska

Stations hydrométriques	# de la station	Localisation et état	Tronçon associé dans HYDROTEL
Bécancour	024007	Au pont-route près de Saint-Sylvère (1970 à 2001)	TR-70
Bécancour	024014	À 6 km en aval du pont de l'autoroute 20 à Madington (1999 à aujourd'hui)	TR-102
Bécancour	024003	À 2.1 km en amont de la rivière Palmer (1966 à aujourd'hui)	TR-255
Yamaska	030345	À 1.8 km en aval du barrage à Sainte-Hyacinthe (1994 à aujourd'hui)	TR-61
Yamaska (Noire)	030304	À 7.6 km de la Yamaska (1965 à aujourd'hui)	TR-63
Yamaska	030302	À 0.6 km en amont du pont-route de la 235 à Farnham (1965 à aujourd'hui)	TR-240

5.1.3 Calage et validation du modèle hydrologique HYDROTEL

Dans le cadre du développement du modèle HYDROTEL pour le projet, le calage vise essentiellement à simuler les débits observés en tenant compte de la présence des MH. Dans ce contexte, le calage du modèle doit mettre l'accent sur le synchronisme et l'amplitude entre les phénomènes de crues et d'étiages observés et simulés. Les trois secteurs délimités sur chacun des BV ont permis d'obtenir des paramètres de calage plus réalistes et permettront des analyses ultérieures rendant mieux compte de l'impact de la spatialisation des MH sur les BV sur la réponse hydrologique. Les figures 13 et 14 présentent, pour les BV de la Bécancour et de la Yamaska, des exemples de résultats de calage des débits aux trois tronçons définis plus haut (tableau 8).

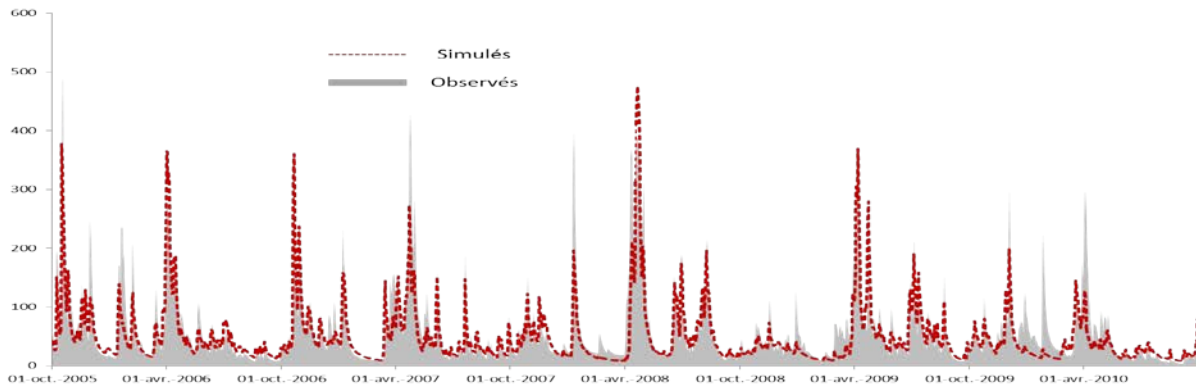


Figure 13 : Exemple de comparaison des débits observés et simulés sur le BV Bécancour pour le calage du modèle HYDROTEL au tronçon TR-102 (01 octobre 2005-30 septembre 2010)

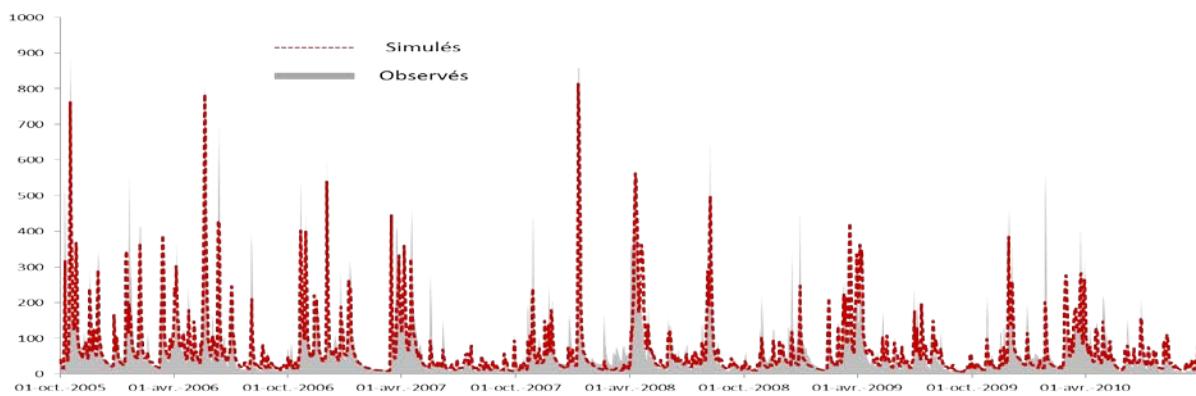


Figure 14 : Exemple de comparaison des débits observés et simulés et simulés sur le BV Yamaska pour le calage du modèle HYDROTEL au tronçon TR-61 (01 octobre 2005-30 septembre 2010)

Les figures 15 et 16 présentent, pour les BV Bécancour et Yamaska, des exemples de résultats de validation des débits aux trois tronçons définis plus haut.

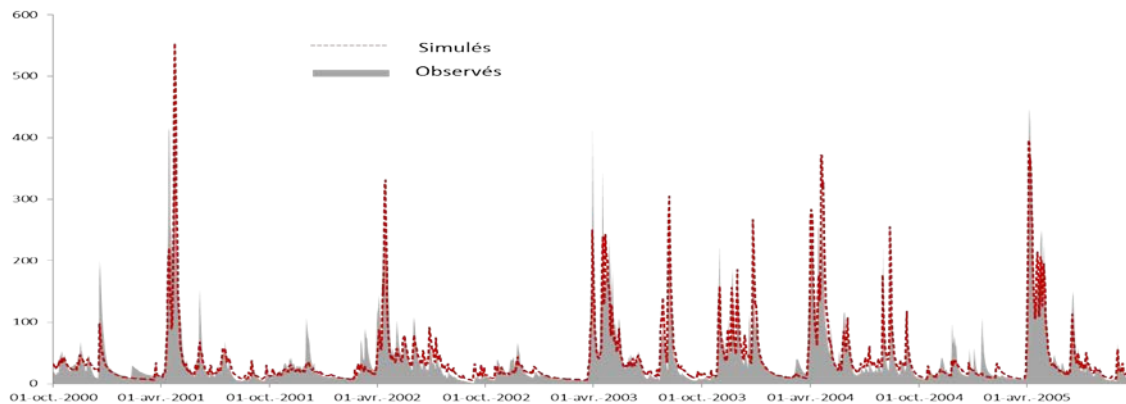


Figure 15 : Exemple de comparaison des débits observés et simulés sur le BV Bécancour pour la validation du modèle HYDROTEL au tronçon TR-102 (01 octobre 2000-30 septembre 2005)

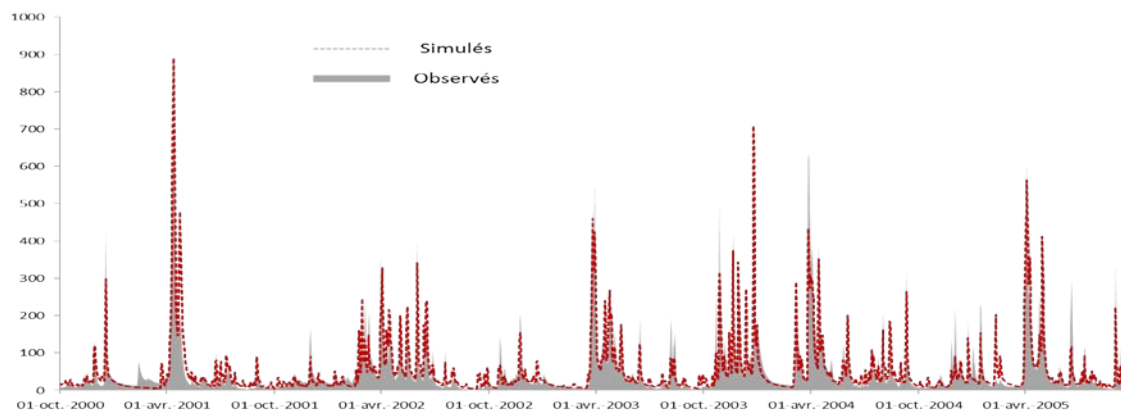


Figure 16 : Exemple de comparaison des débits observés et simulés sur le BV Yamaska pour la validation du modèle HYDROTEL au tronçon TR-61 (01 octobre 2000-30 septembre 2005)

Le tableau 9 présente la performance du modèle HYDROTEL, basée sur le critère de la fonction objectif de Nash-Sutcliffe (NS) pour l'ensemble des périodes de calage et de validation et pour l'ensemble des tronçons définis sur les deux BV à l'étude. Les résultats obtenus sont très satisfaisants avec des valeurs de NS variant entre 0,81 et 0,88 pour les trois tronçons du BV de la Bécancour en période de calage et 0,74 et 0,77 en période de validation. Il en va de même pour les trois tronçons du BV de la Yamaska avec des valeurs de NS variant entre 0,76 et 0,80 en période de calage et 0,73 et 0,80 en période de validation.

Tableau 9 : Performance du modèle HYDROTEL pour l'ensemble des tronçons des deux BV pour les périodes de calage et de validation

Tronçon	Période de calage	Nash-Sutcliffe	Période de validation	Nash-Sutcliffe
Bécancour TR-70	1995-2000	0.84	1990-1995	0.77
Bécancour TR-102	2005-2010	0.81	2000-2005	0.74
Bécancour TR-255	2005-2010	0.88	2000-2005	0.77
Yamaska TR-61	2005-2010	0.80	2000-2005	0.80
Yamaska TR-63	2005-2010	0.77	2000-2005	0.73
Yamaska TR-240	2005-2010	0.76	2000-2005	0.78

5.1.4 Analyse de sensibilité

Tel que mentionné à la section 3.4.3 *Méthodes d'analyses*, suite au calage et à la validation du modèle hydrologique HYDROTEL, une analyse de sensibilité des paramètres descriptifs des MH a été conduite pour le bassin Bécancour. Cette analyse vise essentiellement à cibler les paramètres qui sont les plus influents pour diverses conditions hydrologiques en périodes (i) d'étiage, (ii) de crue ou (iii) dite normale. Pour cette étude, la valeur d'un seul paramètre à la fois a été modifiée, les autres étant fixées aux valeurs assignées lors du calage (valeurs de références). Le tableau 10 présente les paramètres descriptifs des MEH qui ont été ciblés lors de cette analyse.

La figure 17 résume les écarts normalisés pour les divers états hydrologiques (étiage, crue et normale) entre les débits simulés avec une variation pour un paramètre donné par rapport aux débits de référence à l'exutoire du bassin Bécancour.

Tableau 10 : Paramètres descriptifs des milieux humides lors de l'analyse de sensibilité

Paramètres	Description	Référence	+ 25 %	-25 %
$SA_{V_{wet}}$	Coefficient multiplicatif de l'aire dans la relation aire volume des milieux humides isolés	0.96535	1.20669	0.72401
$SA_{wet,nor,frac}$	Fraction de l'aire maximale dans la détermination de l'aire normale pour l'ensemble des milieux humides	0.3	0.375	0.225
$D_{wet,mx}$	Hauteur d'eau maximale dans les milieux humides riverains (m)	0.5	0.625	0.375
$D_{wet,nor}$	Hauteur d'eau maximale dans les milieux humides riverains (m)	0.1	0.125	0.075

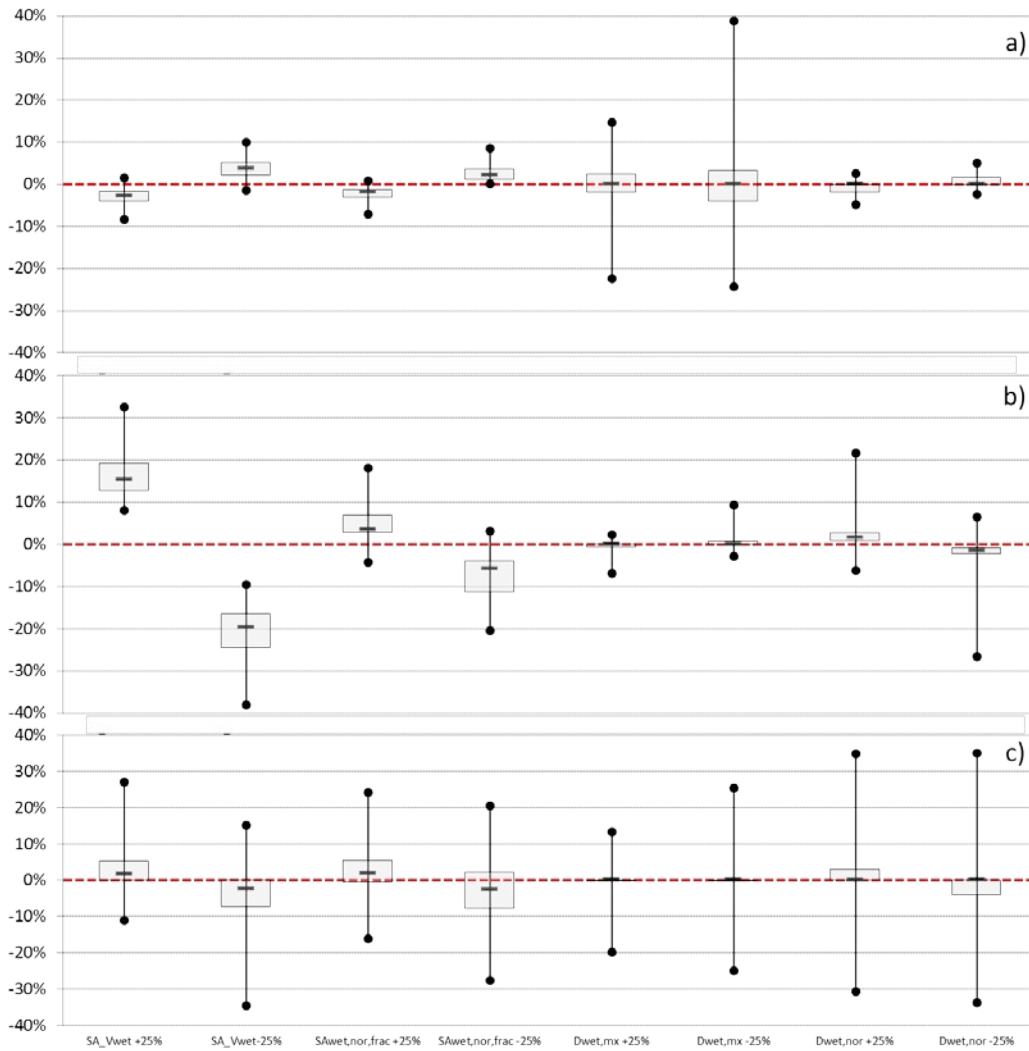


Figure 17 : Analyse de sensibilité des débits en conditions de crue (a), étiage (b) et normale (c) aux variations des paramètres descriptifs des MH

À noter que pour ces graphiques, les marqueurs représentent les écarts maximal et minimal, l'étendue de la boîte représente les quartiles 25% et 75% et le marqueur inclus dans chaque boîte la médiane.

Généralement et à titre de premier constat, il est assez clair que les résultats semblent plus sensibles, dans l'ordre, aux paramètres (i) $SA_{V_{wet}}$, (ii) $SA_{wet,nor,frac}$, (iii) $D_{wet,nor}$, et (iv) $D_{wet,mx}$. À titre de rappel, le premier paramètre $SA_{V_{wet}}$ est associé spécifiquement aux MH isolés, les deux derniers paramètres $D_{wet,mx}$, $D_{wet,nor}$ sont associés spécifiquement aux MH

riverains alors que le paramètre $SA_{wet,nor,frac}$ est associé au deux types de MH. De plus, les écarts compris entre les quartiles 25% et 75% demeurent tous inférieurs à 25%, soit la variation imposée aux paramètres. Enfin, la variation des paramètres induit des tendances de variation des débits globalement signée, à savoir soit majoritairement positives soit majoritairement négatives. Seules les variations associées au paramètre $D_{wet,mx}$ présentent une dispersion des valeurs autour de l'axe à l'origine ainsi que le paramètre $SA_{wet,nor,frac}$ en conditions dites normales.

Plus spécifiquement, en condition de crue (a) et normale (c), les valeurs des débits comprises entre les quartiles 25% et 75% présentent une dispersion faible centrée sur l'axe à l'origine (< 5%). Néanmoins, des valeurs d'écarts « extrêmes » plus importantes sont observées en condition normale et pour le paramètre $D_{wet,mx}$ en condition de crue.

En condition d'étiage, la dispersion des valeurs d'écarts extrêmes est relativement homogène pour l'ensemble des paramètres. Par ailleurs, les valeurs des débits compris entre les deux quartiles de référence présentent une dispersion plus marquée ($\leq 20\%$). pour les même variations imposées aux paramètres SA_{wet} et $SA_{wet,nor,frac}$.

5.2 Rôle des MH en conditions actuelles - Livrable 2B

5.2.1 Impact des MH

Les résultats reportés sous la forme d'une représentation graphique des courbes de fréquences cumulées (figure 18) des débits observés pour l'ensemble des années hydrologiques sur une période continue de plus de 30 ans (1 Octobre 1970- 30 Septembre 2010) et selon les deux modalités de simulations soit (i) avec prise en compte des MH (AMH) et (ii) sans prise en compte des MH (SMH) permettent de rendre compte de l'impact général des MH sur la distribution des débits.

La figure 18 démontre ainsi une très bonne correspondance entre les distributions des débits en conditions qualifiées de normales. En revanche, en conditions de crues et d'étiages, la

divergence observée entre les courbes reflète l'impact des MH avec respectivement des débits en crues moins important et des débits à l'étiage plus importants en présence de MH et avec plus d'amplitude selon la sévérité des conditions. Pour le seuil de 50 % de fréquence de distribution, les débits en crue sont situés sous la valeur des 320 m³/s (SMH) et sous 300 m³/s (AMH). A l'inverse, en condition d'étiage, les débits sont situés sous la valeur des 6.3 m³/s (SMH) et sous 7 m³/s (AMH).

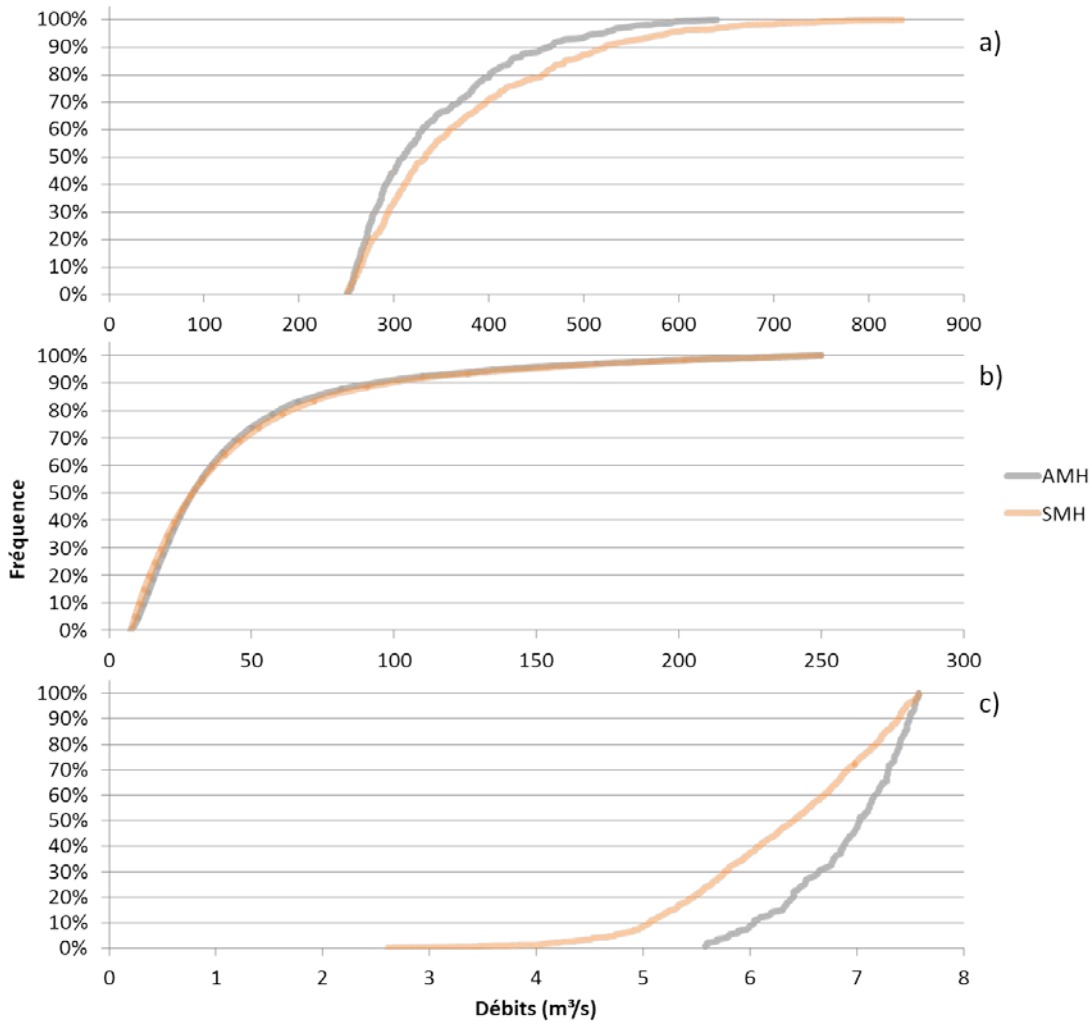


Figure 18 : Courbes de fréquences cumulées des débits simulés (AMH et SMH) à l'exutoire de la Bécancour pour l'ensemble des années hydrologiques (1961-2010) en conditions de crue (a), normale (b) et d'étiage (c)

5.2.2 Impact respectif des MH isolés et riverains

Considérant l'impact de chacune des typologies de MH représentées dans le modèle hydrologique, il apparaît que les MH isolés ont un impact prédominant dans la réponse hydrologique du BV tant sur les phénomènes de crue que sur les phénomènes d'étiage. Les figures 19 et 20 illustrent les différences de variations des indicateurs hydrologiques (IH) simulées par HYDROTEL sur le groupe amont (AM et AM1) des BV respectifs de la Bécancour et de la Yamaska. Le choix des groupes AM, contrairement à l'exutoire pour l'ensemble des autres résultats, est justifié par le fait que la superficie d'occupation des MH

isolé et riverain est très similaire sur ces secteurs pour chacun des BV (tableau 7). Cette caractéristique permet de représenter l'impact de chacune des typologies selon leur propre fonctionnement et indépendamment de leur taux d'occupation.

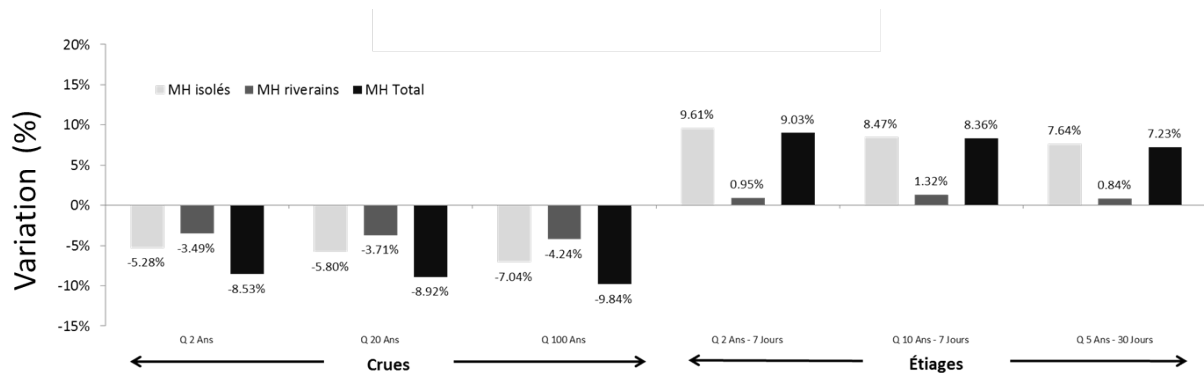


Figure 19 : Impact relatif respectif des MH isolés et riverains sur les phénomènes de crues et d'étiages sur le groupe amont (TR 255) du bassin de la Bécancour (01 octobre 1970 – 30 septembre 2010)

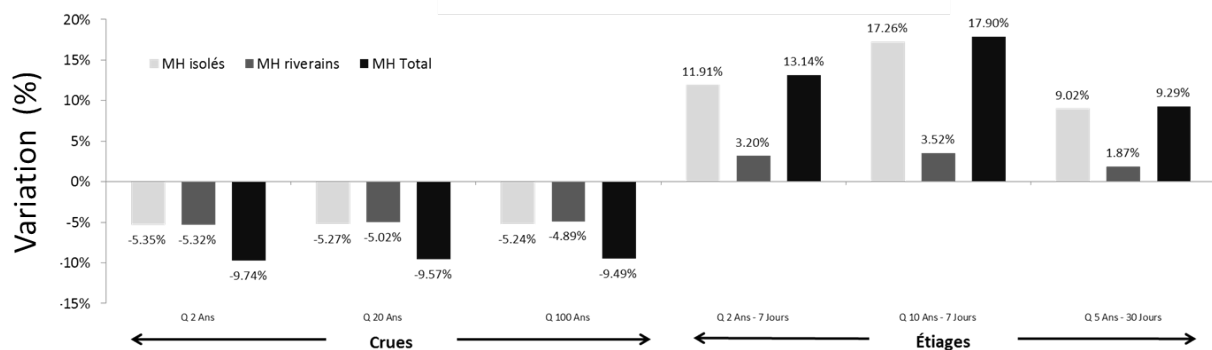


Figure 20 : Impact relatif respectif des MH isolés et riverains sur les phénomènes de crues et d'étiages sur le groupe amont (TR 240) du bassin de la Yamaska (01 octobre 1970 – 30 septembre 2010)

De plus, une variation plus importante entre les MH isolés et riverains est observée en condition d'étiage sur le BV de la Bécancour (8 %) et sur le BV de la Yamaska (5 %) en comparaison de celle observée en condition de crue à savoir 1.5 % pour la Bécancour et 1 % pour la Yamaska.

5.3 Rôle des MH en conditions futures - Livrable 2C

5.3.1 Les changements climatiques

Le tableau 11 présente les changements annuel et saisonnier des précipitations (%) et des températures (°C) projetés sur les trois horizons temporels pour les bassins de la Bécancour et de la Yamaska. Ces variations sont calculées par rapport à la période de référence H1 et l'ensemble inclut les dix scénarios de projections climatiques du MRCC.

La période annuelle correspond à une année calendaire (1^{er} janvier au 31 décembre), la période estivale est celle définie par le CEHQ (1^{er} juin au 31 octobre) et couvrant la période d'écoulement en eaux libres, et la période hivernale (1^{er} novembre au 31 mai) correspond au reste de l'année et couvre la période durant laquelle des précipitations solides et des écoulements de fonte nivale sont couramment observés.

Tableau 11 : Variations annuelle, estivale et hivernale des précipitations et des températures pour les bassins de la Bécancour et de la Yamaska évaluées sur l'ensemble des 10 scénarios climatiques du MRCC

Période		Bécancour		Yamaska	
		H2	H3	H2	H3
Annuelle	<i>Températures</i>	1.1 à 1.2 °C	3.9 à 4.6 °C	1.1 à 2.1 °C	3.9 à 4.6 °C
	<i>Précipitations</i>	4.2 à 12.8 %	20.1 à 24.7 %	4.3 à 12.4 %	20 à 24.5 %
Estivale	<i>Températures</i>	1.1 à 1.7 °C	3.6 à 4.2 °C	1.1 à 1.7 °C	3.6 à 4.4 °C
	<i>Précipitations</i>	-0.1 à 4.4 %	-0.7 à 15.4 %	-0.5 à 3.5 %	-3.6 à 17.6 %
Hivernale	<i>Températures</i>	1 à 2.3 °C	4.1 à 5 °C	1 à 2.3 °C	4.1 à 5 °C
	<i>Précipitations</i>	9.9 à 23.6 %	32 à 42 %	9.8 à 21.7 %	31.8 à 40.6 %

D'une manière générale le changement observé s'accroît avec le temps. Les températures augmentent selon le scénario A2 (augmentation à long terme de 4°C) et des valeurs similaires sont obtenues sur les deux bassins. Les précipitations augmentent également et présentent des plages d'incertitude plus importantes à l'année (≈ 9%) et durant la période hivernale (≈ 13%) sur l'horizon H2 et sur l'horizon H3 pour la période estivale (≈ 19%). De plus, on observe des changements importants durant la période hivernale qui se caractérisent à long terme (horizon H3) par des augmentations de températures (≈ 4.5°C) et de précipitations (≈ 35%).

La figure 21 présente l'évolution des hydrogrammes simulés aux exutoires des BV de la Bécancour et de la Yamaska correspondant à l'occupation des sols de 2011 pour les 10 simulations sur les périodes actuelle (H2) et future (H3) superposés à l'hydrogramme moyen reconstitué de la période de référence (H1) décrites à la section 4.5.1 *Évaluation du rôle des MH en condition de CC*.

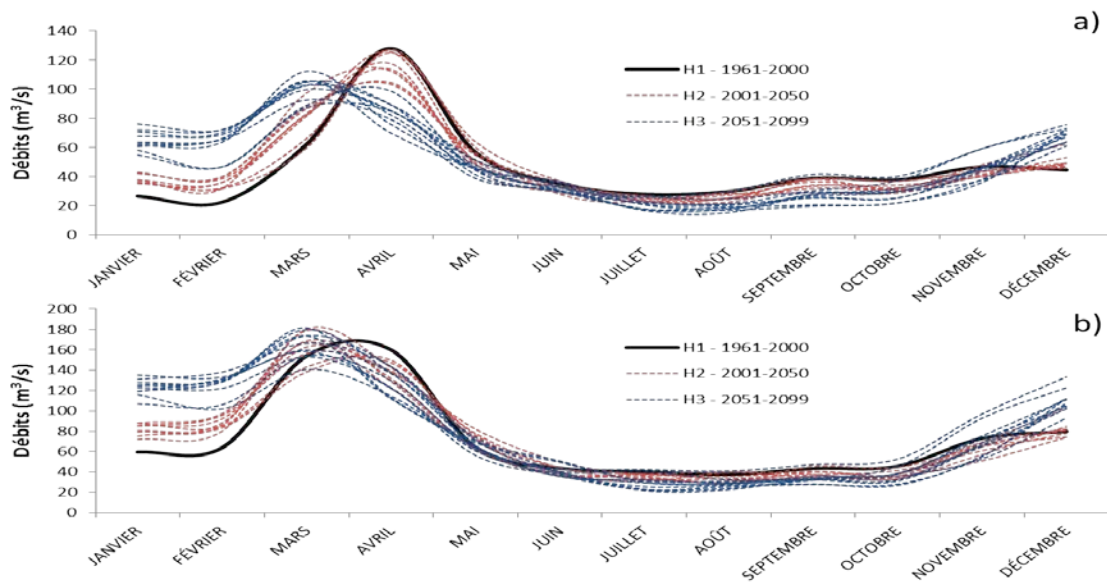


Figure 21 : Évolution de l'hydrogramme simulé à l'exutoire de la Bécancour (a) et de la Yamaska (b) pour les périodes de référence (H1), actuelle (H2) et future (H3).

D'une manière générale, sans se prévaloir de l'impact des MH et en en considérant alors que le seul scénario d'occupation des sols de 2011 et assumant les variations des paramètres météorologiques (tableau 11), les CC induiraient (i) des débits hivernaux plus importants, (ii) un devancement de la période de crue printanière, (iii) un élargissement de la période de crue et (iv) une diminution des apports estivaux.

5.3.2 Évolution de l'impact des MH en condition de CC

Pour évaluer l'impact des MH, une analyse de la variation des indicateurs hydrologiques, effectuée sur l'ensemble des 10 simulations de projections climatiques et pour le même scénario d'occupation de sol de 2011 a été réalisée. Les résultats montrent des tendances équivalentes pour un bassin et un phénomène hydrologique donnés. Ces tendances, reportées sur les figures 22 et 23, reflètent le seul impact des MH dans le temps.

À noter que pour ces graphiques, l'étendue de la boîte représente l'écart entre la valeur maximale et minimale de la variation obtenue sur l'ensemble des 10 simulations de projections climatiques et le marqueur inclus dans chaque boîte marque la moyenne.

Les indicateurs hydrologiques significatifs des phénomènes de crue (Q_2 , Q_{20} et Q_{100}) montrent une certaine constance dans le temps en ce qui concerne l'impact relatif des MH sur le phénomène de laminage des crues, et ce tant sur le bassin de la Bécancour (variation moyenne des indicateurs $> 5\%$) que sur celui de la Yamaska (variation moyenne $> 5\%$). Par ailleurs, une tendance légèrement à la hausse est observable quant à l'impact des MH sur les phénomènes d'étiage sur les deux BV pour les horizons projetés. Les indicateurs hydrologiques correspondants au phénomène d'étiage (Q_{2-7} , Q_{10-7} et Q_{5-30}) présentent des écarts plus importants sur le bassin de la Bécancour (variation moyenne des indicateurs $\pm 40\%$) que sur le bassin de la Yamaska (variation moyenne des indicateurs $\leq 20\%$).

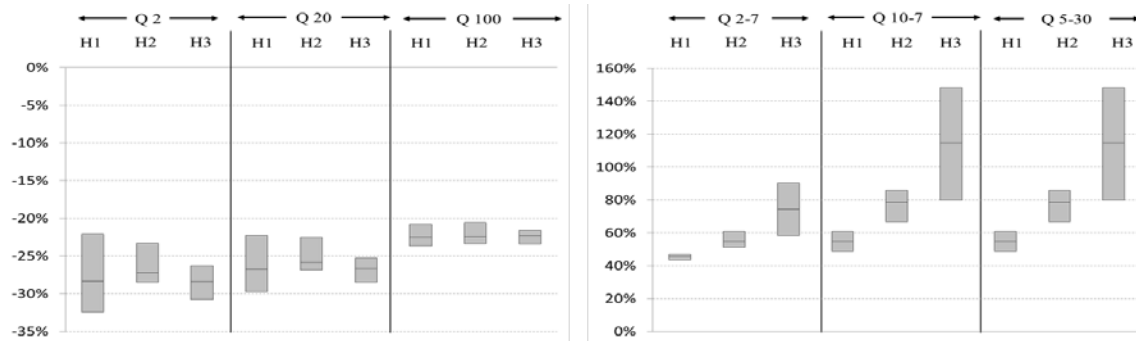


Figure 22 : Impact relatif des MH en condition de CC, sur la Bécancour, pour les périodes de référence (H1), actuelle (H2) et future (H3)

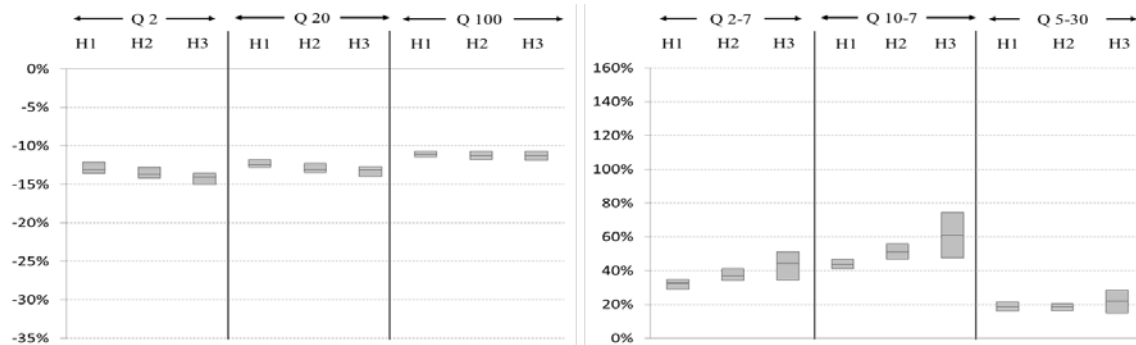


Figure 23 : Impact relatif des MH en condition de CC, sur la Yamaska, pour les périodes de référence (H1), actuelle (H2) et future (H3).

5.3.3 Évaluation de l'impact des MH en mode prédictif

L'analyse des effets des changements d'occupation des sols par le biais de simulations réalisées sous différents scénarios d'occupation des sols, définis à la section 4.2.2 *Données cartographiques* est reportée sur les figures 24 et 25 ci-dessous.

Comme mentionné à la section 4.5.2 *Évaluation de l'impact des MH en mode prédictif*, des différences existent entre les valeurs annoncées des cartes d'occupation des sols futures (2050) et celles effectivement calculées par le SIG PHYSITEL et prises en compte dans la modélisation hydrologique. Ainsi, le tableau 12 résume l'évolution de l'ensemble des classes d'occupation des sols pour les différents scénarios des sols futurs (2050) pour chacun des BV. Le tableau 13 précise l'évolution spécifique des MH pour ces mêmes scénarios d'occupation des sols futurs (2050).

Tableau 12 : Évolution des classes d'occupation des sols (km²) à l'échelle des BV de la Bécancour et de la Yamaska en fonction des scénarios d'occupation des sols futurs (2050)

Bassin	Classes	2011	TA	SQ	Op	Pe
Bécancour	Surface imperméable	91	114	108	108	124
	Agriculture	597	534	502	484	552
	Forêt feuillus	230	293	294	294	294
	Forêt mixte	714	0	0	0	0
	Forêt résineux	456	1170	1171	1171	1171
	Hydrographie	33	33	33	33	33
	Sol nu	25	25	25	25	25
	Végétation	145	163	157	155	163
	Milieus humides	307	258	307	328	235
Yamaska	Surface imperméable	349	503	498	496	506
	Agriculture	2074	1472	1426	1403	1486
	Forêt feuillus	810	1156	1156	1155	1156
	Forêt mixte	618	0	0	0	0
	Forêt résineux	232	941	941	941	941
	Hydrographie	53	52	52	52	52
	Sol nu	6	8	6	6	9
	Végétation	445	513	502	494	514
	Milieus humides	202	138	202	236	120

Les variations des superficies des différentes classes d'occupation des sols pour chacun des scénarios futurs montrent des tendances équivalentes sur les deux BV, avec une légère hausse des surfaces imperméabilisées (environ 4%) et de la classe « végétation » (approximativement 1%), ainsi qu'une conservation des surfaces hydrographiques et des sols nus. Aussi, certaines classes d'occupation des sols présentent des variations plus importantes. La classe « agriculture » montre une baisse générale avec un taux moyen de perte moins important sur le bassin de la Bécancour (3%) en comparaison au bassin de la Yamaska (30%). Les classes « forêts » présentent quant à elles, une très légère hausse à la fois pour le bassin de la Bécancour (1%) et celui de la Yamaska (3%). Il est à noter que dans ces scénarios, la « forêt mixte » disparaît au profit des « forêts feuillus » et « forêts résineux » et ce pour les deux BV. La variation observée sur la classe des milieux humides tend donc à être la résultante d'une conversion des secteurs agricoles.

Tableau 13 : Évolution des MH à l'échelle des BV de la Bécancour et de la Yamaska en fonction des scénarios d'occupation des sols futurs (2050)

Bassin	Scénario	Superficie des MH (km ²)	Occupation des MH (%)	Gain ou perte (km ²) (%)	
Bécancour	2011 (Référence)	307	12	-	-
	Tendances Actuelles	258	10	-49	-16%
	Statut Quo	307	12	0	0%
	Optimiste	328	13	20	7%
	Pessimiste	235	9	-72	-24%
Yamaska	2011 (Référence)	202	4	-	-
	Tendances Actuelles	138	3	-64	-32%
	Statut Quo	202	4	0	0%
	Optimiste	236	5	34	17%
	Pessimiste	120	2	-82	-41%

Les variations des superficies des MH observées pour chacun des scénarios d'occupation des sols futurs (2050) diffèrent sensiblement d'un BV à un autre. Le taux de perte des MH en Tendances Actuelles (TA) est double sur le bassin de la Yamaska (32%) en comparaison du bassin de la Bécancour (16%). Cet écart entre les deux BV se remarque pour l'ensemble des scénarios avec un taux de perte en condition pessimiste (Pe) plus important sur la Yamaska (41%) que sur la Bécancour (24%) et un gain en condition optimiste (Op) plus important également sur la Yamaska (17%) que sur la Bécancour (7%). Notons également que les scénarios Pe de la Bécancour et Op de la Yamaska correspondent à la même superficie d'occupation des sols des MH (environ 235 km²)

Les figures 24 et 25 montrent respectivement, pour les BV de la Bécancour et de la Yamaska, les variations obtenues sur les indicateurs hydrologiques suite aux simulations réalisées pour les 10 scénarios de projection de CC correspondants à l'horizon H3 (2051-2099), aux exutoires des BV.

Ces variations, reflétant l'impact des changements d'occupation de sols en termes de superficie de MH, sont obtenues par une comparaison des variations des différents indicateurs hydrologiques pour un scénario d'occupation avec les variations de références selon l'équation présentée à la section 4.5.2 *Évaluation de l'impact des MH en mode prédictif*.

Ces résultats peuvent donc être interprétés comme une augmentation ou une diminution de la valeur de l'indicateur hydrologique par comparaison avec la situation actuelle sur la base d'une projection pour l'horizon H3.

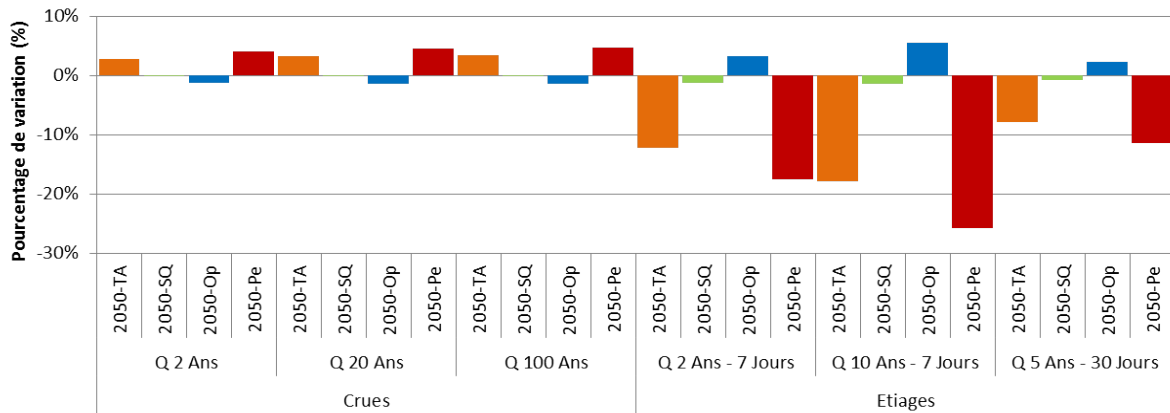


Figure 24 : Effets des changements d’occupation des sols et variations moyennes des indicateurs hydrologiques calculés sur le bassin de la Bécancour pour l’horizon H3 (2051-2099) en comparaison à la situation de 2011

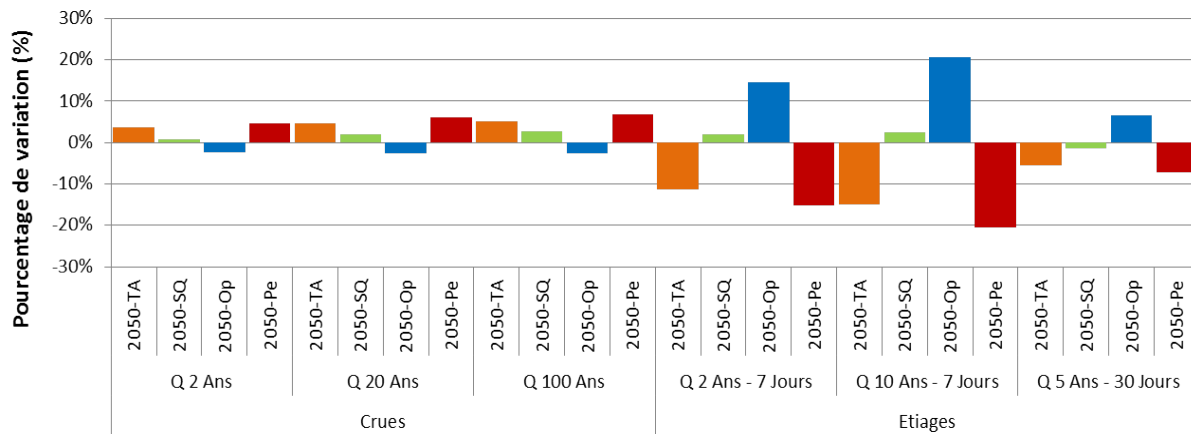


Figure 25 : Effets des changements d’occupation des sols et variations moyennes des indicateurs hydrologiques calculés sur le bassin de la Yamaska pour l’horizon H3 (2051-2099) en comparaison à la situation de 2011

Sur les deux BV, les tendances observées sont similaires pour (i) les scénarios TA et Pe avec des valeurs positives de l’impact relatif des MH sur les indicateurs hydrologiques (IH) de crues et valeurs négatives de l’impact relatif sur les IH d’étéages, illustrant, sous de nouvelles conditions climatiques, une diminution des impacts de ces milieux pour ces scénarios, ce qui n’est pas souhaitable et (ii) le scénario Op avec des valeurs négatives pour l’impact relatif des MH sur les IH de crues et valeurs positives pour l’impact relatif des MH sur les IH d’étéages, ce qui est tout à fait souhaitable, permettant ainsi une mitigation des effets des CC.

Les résultats obtenus par le biais du scénario SQ illustrent peu d'impact relatif sur les crues et une légère diminution de l'impact relatif sur les débits d'étiage, alors même que la situation des MH n'a pas changé. Cet artefact apparent de simulation, à savoir l'existence de valeurs non nulles, remarquable pour ce scénario, est également présente pour les autres scénarios et ce point est développé dans la section 6.3.3 *Évolution de l'impact des MH en mode prédictif*.

Sur le bassin de la Bécancour, la variation la plus importante est observée sur les IH d'étiages et correspond à une diminution ($\approx 25\%$) de l'impact relatif de l'IH d'étiage Q_{10-7} . Plus encore, les variations les plus fortes sont toujours celles observées en condition Pe et correspondent aux variations de superficie des MH les plus importantes. De manière générale, sur le bassin de la Bécancour, en conditions de crue ou d'étiage, les impacts relatifs observés sur les indicateurs hydrologiques sont étroitement liées aux variations de superficies des MH.

Sur le bassin de la Yamaska, les variations les plus importantes observées correspondent à la fois à une augmentation ($\approx 20\%$) de l'impact relatif de l'IH d'étiage Q_{10-7} pour le scénario Op et une diminution ($\approx 20\%$) de l'impact relatif de l'IH d'étiage Q_{10-7} pour le scénario Pe. Ces variations ne sont pas systématiquement en lien avec les modifications des superficies des MH et dans ce cas, un gain de MH en condition Op (17%) produit un impact plus important sur le de l'impact relatif de l'IH d'étiage Q_{10-7} (20%) qu'une perte en condition TA (32%) qui ne produit qu'une variation de l'ordre de 13%. Cette remarque est valable sur l'ensemble des IH de débits d'étiage. En revanche, en condition de crues, les variations observées sur les indicateurs hydrologiques sont directement liées à la variation des superficies des MH.

6. ANALYSE ET DISCUSSION

6.1 La modélisation hydrologique - Livrable 2A

6.1.1 Intégration des BV dans la modélisation hydrologique

Pour les deux bassins à l'étude, le modèle hydrologique HYDROTEL, adapté à la prise en compte des MH, offre des représentations jugées satisfaisantes de la distribution des débits.

Plus spécifiquement, HYDROTEL représente avec une bonne précision à la fois le synchronisme et l'amplitude des crues. De plus, la performance du modèle HYDROTEL, basée sur le critère de la fonction objectif du Nash-Sutcliffe, demeure satisfaisante tant sur des considérations annuelles que saisonnières.

Ainsi, tant les schémas de représentation des MH définis dans la modélisation (fonction de stockage/destockage) que la méthodologie employée pour la modélisation hydrologique, reposant sur une analyse comparative des données de sorties du modèle HYDROTEL, à la suite de deux simulations en parallèles, apparaissent pertinents pour l'évaluation du rôle des MH sur la réponse hydrologique du BV et sur leur évolution pour divers horizons futurs en accord avec les scénarios de changements climatiques produits par le MRCC.

6.1.2 L'analyse de sensibilité

L'analyse des réponses du modèle hydrologique HYDROTEL aux quatre paramètres (i) $SA_{V_{wet}}$, (ii) $SA_{wet,nor,frac}$, (iii) $D_{wet,nor}$, et (iv) $D_{wet,mx}$ semble démontrer une plus grande sensibilité du modèle aux variations du paramètre spécifique ($SA_{V_{wet}}$) aux MH isolés et dans une moindre mesure au paramètre commun ($SA_{wet,nor,frac}$) aux deux typologies.

En conséquence de la représentation des milieux humides dans HYDROTEL, ce constat semble s'accorder avec la capacité de stockage plus importante des milieux humides isolés équivalent et sa contribution unidirectionnelle envers le réseau. Par opposition, les milieux humides riverains équivalents qui offrent un moins grand potentiel de stockage, interagissent directement avec les cours d'eau ce qui permet des échanges dans un sens comme dans l'autre.

Cependant, la plus grande distribution des écarts sur les paramètres liés aux MH isolés est en faveur d'une plus grande sensibilité du modèle à ces derniers et les variations plus marquées sur ces mêmes paramètres en condition d'étiage soutiennent l'hypothèse d'un rôle plus important de ces milieux durant les périodes de bas débits.

Enfin, les variations obtenues sur les débits répondent globalement aux schémas de représentation des MH au sein de la modélisation et traduisent l'impact respectif de chacune des typologies de MH au cours des différentes conditions hydrologiques.

6.2 Rôle des MH en conditions actuelles - Livrable 2B

6.2.1 Impact général des MH sur les processus hydrologiques

L'analyse comparative des sorties des simulations hydrologiques, à travers l'observation des courbes de fréquences cumulées des débits simulés ou encore des indicateurs hydrologiques, démontre clairement l'impact des MH en conditions hydrologiques de crue et d'étiage. En revanche, la superposition de ces courbes en conditions hydrologiques normales tend à attribuer aux MH un impact limité en faveur d'un rôle neutre en dehors de conditions extrêmes.

Ces résultats indiquent que la présence des MH conduit à une diminution des débits de crue et une augmentation des débits d'étiage et ce sur les deux BV à l'étude. Ces derniers viennent confirmer deux fonctions majeures des MH, à savoir stocker l'eau lors d'évènements pluvieux et déstocker ou relâcher ces eaux graduellement. La fonction de stockage se traduisant alors par un abaissement des pics de crue, tandis que la fonction de déstockage progressif se traduit par un soutien plus important au débit en cas de faibles apports pluviométriques et augmentant ainsi les valeurs des bas débits.

Aussi, l'impact apparemment plus important des MH lors des conditions d'étiage est à nuancer. D'une part, les schémas de représentation des MH dans la modélisation les apparentent à des réservoirs finis. Ainsi, considérant leur capacité totale de stockage, le volume considéré sera relativement moins important en condition de crue qu'en condition d'étiage. Autrement dit, l'analyse relative peut induire une réponse plus importante pour une variation absolue relativement faible par comparaison avec une référence très faible (en conditions d'étiages) par opposition à une variation absolue moyenne par comparaison avec une référence élevée (en conditions de crues). D'autre part si ce constat est clair sur le BV de la Yamaska, cette tendance est moins marquée sur le BV de la Bécancour.

Alors, non seulement l'impact des MH est dépendant de caractéristiques physiques des BV à l'étude mais si l'impact relatif des MH est effectivement plus important en condition d'étiage, leur rôle n'est à négliger dans aucune de ces deux conditions hydrologiques.

6.2.2 Impact respectif des MH isolé et riverain sur les processus hydrologiques

Les résultats présentés rendent compte de l'interdépendance des MH isolés et riverains en ce sens que l'impact cumulé des MH apparaît moindre que la somme des impacts individuels de chacune des typologies de MH. Cette observation est propre à la représentation des MH au sein du modèle et de son schéma de modélisation en cascade, les MH isolés, dans la majeure partie des situations, alimentant les MH riverains. Ainsi, ce constat est en faveur d'une bonne prise en compte des MH dans la modélisation et témoigne de l'absence d'artefacts de simulation.

Aussi, il apparaît que les MH isolés ont un impact prédominant dans la réponse hydrologique des BV tant sur les phénomènes de crue que sur les phénomènes d'étiage en comparaison des MH riverains. Ce rôle majeur des MH isolés sur l'ensemble des indicateurs hydrologiques et également à nuancer et s'explique en partie par deux points liés à la méthode :

- Les paramètres descriptifs des MH diffèrent entre les MH isolés et riverains et notamment sur les coefficients établissant les liens entre les aires des MH et leur capacité de stockage (volume). Les coefficients plus élevés pour les MH isolés leur confèrent, pour une même surface, une capacité de stockage supérieure. Ce qui aura forcément pour effet d'augmenter l'impact de ce type de milieux sur les débits.

- La relation étroite existante entre les tronçons du réseau hydrographique et les MH riverains dans le schéma de modélisation tend à limiter le stockage des MH riverains.

6.3 Rôle des MH en conditions futures - Livrable 2C

6.3.1 Impact des CC sur l'hydrologie

L'analyse des scénarios de projections climatiques du MRCC d'Ouranos, couvrant la période 1961-2099 et intégrant le scénario A2 d'émission de gaz à effet de serre, présente des profils de température à la hausse en accord avec l'hypothèse du scénario A2 (augmentation à long terme de 4°C). De même, les précipitations seront globalement plus abondantes.

Ces augmentations interviennent graduellement dans le temps et s'accroissent avec celui-ci. Les tendances d'évolution annuelles, estivales et hivernales des températures et de précipitations sont identiques avec cependant des prévisions d'augmentation estivale sensiblement moindres et pouvant même aller jusqu'à une diminution pour les précipitations. La période hivernale par ailleurs se caractérise par une augmentation des précipitations importante au regard des tendances annuelle et estivale.

Pour les conditions d'occupation des sols actuelles, correspondant à la carte de 2011, les hydrogrammes des bassins de la Bécancour et de la Yamaska simulés à partir des projections du MRCC, pour les horizons H1 (1961-2000), H2 (2001-2050) et H3 (2051-2099) montrent des évolutions temporelles similaires caractérisées par :

- Des débits hivernaux (novembre à mars) plus importants. Ces débits s'expliqueraient par le devancement de la période de fonte (augmentation des températures) et l'augmentation des précipitations sous forme liquide durant cette période.
- Ces apports importants durant cette période induisent un devancement de la période de crue printanière de l'ordre d'un mois (avril à mars).
- Un élargissement de la période de crue induit par la hausse des apports (précipitations, fonte) et la précocité du phénomène.

- Des débits estivaux (juin à octobre) plus faibles. Ces débits s'expliquant en partie par le déplacement de la période de crue. De plus, les apports par les précipitations plus faibles ainsi que la hausse concomitante des températures pourraient induire une augmentation sensible de l'ETP et diminuer ainsi le volume d'eau disponible du BV.

Par ailleurs, l'évolution du pic de crue diffère entre les deux BV. Une baisse du pic de crue est observable sur le BV de la Bécancour ($\approx 15\%$), alors qu'une hausse est constatée sur le bassin de la Yamaska ($\approx 5\%$). Ainsi, pour des tendances de variations climatiques similaires, la réponse hydrologique des deux BV à l'étude apparaît opposée. Considérant les informations disponibles, plusieurs hypothèses pourraient être émises :

- Les rapports d'occupation des MH sur les BV diffèrent pour nos deux bassins à l'étude. L'impact des MH sur l'hydrologie pourrait alors être dépendant de ce rapport et être conditionné par des seuils de présence assurant un rôle significatif des MH.
- Les valeurs absolues de précipitations solides ne sont pas présentées dans cette étude. Les paramètres définissant les conditions de fonte nivale étant complexes, à la fois des apports neigeux plus importants et/ou la présence des conditions optimales de fonte pourraient expliquer cette tendance à la hausse sur le BV de la Yamaska.
- L'occupation des sols générale diffère également sur les deux BV à l'étude. Avec une forte représentation des milieux agricoles ($\approx 43\%$) et une plus faible représentation des secteurs boisés ($\approx 35\%$) sur le BV de la Yamaska en comparaison de celui de la Bécancour avec respectivement environ 23% et 54%, les conditions d'écoulements peuvent sensiblement varier. En effet, dans la modélisation hydrologique, les classes d'occupation des sols sont à l'origine de différences au niveau (i) de l'évolution du couvert nival, privilégiant notamment la fonte hors secteurs boisés, et (ii) des conditions d'écoulement sur la partie terrestre, privilégiant les écoulements hors secteurs boisés. L'ensemble de ces caractéristiques pourrait également conduire à des différences notables entre les deux BV à l'étude.

6.3.2 Évolution de l'impact des MH en condition de CC

Au regard du rôle des MH et des effets des CC attendus et observés à travers la modélisation hydrologique, l'impact des MH évolue dans le temps. Ainsi, considérant les apports importants prévus durant la période hivernale et l'évolution de l'hydrogramme annuel, le rôle des MH en condition de crue ne semble pas évoluer de manière importante sur le bassin de la Bécancour. La légère tendance à la baisse donc à un gain en période de crue observée sur le bassin de la Yamaska est liée à l'évolution de son hydrogramme et notamment à l'augmentation de son pic de crue et à la contribution accrue des milieux humides.

Autrement dit, dans la mesure où les prévisions météorologiques suggèrent des apports supplémentaires durant les périodes de hautes eaux, le volume global traité par les MH relativement plus important au regard des volumes alors écoulés et l'impact relatif des MH apparaît de ce fait soit constant ou légèrement bénéfique.

De la même manière et considérant des apports globaux plus faibles lors de la période estival, le rôle des MH en condition d'étiage semble s'intensifier avec le temps avec cependant une incertitude plus grande en lien à l'incertitude ou la variabilité des projections climatiques.

Cette tendance évolutive apporte une contribution à la réflexion menée sur l'attribution d'une valeur actuelle aux MH en regard de l'hydrologie. En effet, cela traduit le fait que le rôle actuel attribué à un milieu considéré sera plus important à l'avenir.

6.3.3 Évolution de l'impact des MH en mode prédictif

Globalement les variations observées sur les indicateurs hydrologiques sont en lien direct avec les modifications des surfaces des MH attribuées à chacun des scénarios d'occupation des sols futurs (2050). Aussi, les perturbations relatives à l'occupation des sols engendrent des impacts plus conséquents durant les périodes de basses eaux.

Il est important de préciser ces propos en notant que les valeurs obtenues en considérant le scénario SQ expriment la différence existante entre les simulations réalisées sans la prise en compte des MH selon la situation de référence (2011) et la situation future (2050).

Les variations observées des autres classes d'occupation des sols d'intérêt à savoir : « agriculture » et « forêts » jouent un rôle remarquable. En effet, ces classes représentent des pourcentages d'occupation non négligeables et les paramètres de modélisation déclarés pour ces classes diffèrent. Ces modifications ont alors des répercussions sur les bilans des écoulements calculés au niveau des processus (i) d'évolution du couvert nival, (ii) de l'ETP, (iii) du bilan d'eau vertical et (iv) de l'écoulement sur la partie terrestre. Ainsi, leurs variations seules en comparaison au scénario de référence (2011) entraînent des variations sur les indicateurs hydrologiques. Autrement dit, indépendamment des MH, la méthode de calcul demeure influencée par la valeur liée à la modification des autres classes d'occupation des sols. Et ce bien que les efforts de calculs en place tentent d'en minimiser les effets avec pour objectifs de cibler au mieux les impacts des milieux humides.

Par contre cette valeur souligne le rôle couplé des structures particulières du paysage telles que les MH et de l'ensemble des classes d'occupations des sols et notamment les secteurs boisés et anthropiques. En effet, si les MH sont en capacité de réguler la réponse hydrologique à l'échelle du BV et ainsi de régulariser les effets des CC, il est important d'intégrer dans les calculs ou plan d'aménagement, les perturbations liées aux modifications globales de l'occupation du territoire. De cette manière, l'analyse réalisée peut rendre compte des conditions de gestion effective des MH nécessaires (i) au maintien des conditions hydrologiques actuelles, (ii) à l'amélioration des conditions d'écoulement en période de crue ou encore, et (iii) à l'amélioration des conditions d'écoulement en condition d'étiage.

Ainsi, il apparaît que dans l'état actuel des choses, en considérant l'évolution anthropique du territoire, la seule conservation des MH actuels ne suffira pas à maintenir les conditions hydrologiques actuelles et donc à compenser les perturbations induites par les activités anthropiques et les CC. Seule une gestion des MH, basée sur la restauration de sites, permettra à la fois de compenser les perturbations liées à l'anthropisation du territoire et de minimiser les effets attendus des CC.

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le nouvel outil de modélisation hydrologique HYDROTEL et son SIG PHYSITEL associé ont été modifiés afin d'intégrer un module spécifique dédié aux MH et plus précisément aux MH riverains et isolés. Cette adaptation est tout à fait pertinente dans le cadre d'évaluation du rôle et de l'impact des MH sur le comportement hydrologique à l'échelle du BV.

De ces premiers travaux de modélisation hydrologique ressortent le rôle indéniable des MH dans l'atténuation des crues et le soutien aux débits d'étiage. Ces rôles, bien que souvent avancés, n'avaient, pour l'heure, que trop peu été quantifiés à l'échelle du bassin. L'effort mis sur la discrimination des MH, en respectivement des milieux riverains et isolés, a permis de mettre en avant le rôle majeur des MH isolés dans la réponse hydrologique du BV selon leur représentation courante de la modélisation hydrologique. Et enfin, les analyses issues de l'intégration en parallèle (i) des projections climatiques du MRCC et (ii) des scénarios d'occupation des sols futurs (2050) a mis en évidence le rôle accru des MH dans le futur, plus spécifiquement pour les conditions d'étiage et la nécessité de mettre des efforts sur des programmes de restauration à des fins d'atténuation des effets des CC.

Les premiers résultats issus de la seule modélisation hydrologique démontrent d'ores et déjà la capacité de l'outil à répondre à ces objectifs. Cependant, certains points d'analyses cruciaux sont encore non disponibles ou fastidieux et certaines améliorations pourraient contribuer à augmenter les performances de cet outil :

- L'acquisition de données *in situ* est en cours sur le bassin de la Bécancour. Les informations ainsi recueillies sur les deux typologies fonctionnelles de MH sont essentielles pour confronter les hypothèses de fonctionnement définies dans l'approche de modélisation. La confrontation des données de terrain et des données de simulation permettra notamment d'évaluer le comportement des MH au sein de la modélisation en termes de dynamique hydrologique (adéquation des hypsométriques).

- À ce jour, le modèle HYDROTEL n'est pas en capacité de produire des cartes de sensibilité du territoire. Une telle fonctionnalité pourrait permettre par exemple de visualiser l'évolution des apports et des débits à l'échelle de l'UHRH. Une telle amélioration assurerait un meilleur arrimage avec les outils géomatiques développés dans le projet en cours.
- La détermination des indicateurs hydrologiques se fait présentement en parallèle de la modélisation. L'intégration du calcul de ces indicateurs au sein même du modèle, de manière automatisée, permettrait de réduire le temps de traitement des informations et des résultats.
- Une demande forte des différents acteurs réside dans le questionnement de l'impact de la spatialisation des MH sur la réponse hydrologique à l'échelle du BV. Pour renforcer la compréhension de l'impact de ces MH, une analyse approfondie permettrait de tester les variations des indicateurs hydrologiques en réponse à des patrons spatiaux de distribution des MH variés.
- Pour répondre également à la demande des acteurs locaux en termes de gestion du territoire, la définition de seuils de fonctionnalité des MH est nécessaire, à savoir (i) l'évaluation de l'impact des MH en fonction du maintien et du respect de seuils de débits particuliers (débits réservés) et (ii) la détermination des rapports superficie des MH/variation des débits afin d'obtenir des informations en lien avec l'efficacité des plans de gestion (coûts/bénéfices).

Enfin, l'aspect complexe et multiparamétriques de la définition du rôle et de l'impact des MH et la production importante de données au regard du nombre de simulations nécessaires pour la prise en compte (i) des projections climatiques et (ii) des projections de scénarios d'occupation des sols, nécessite du temps supplémentaire et des efforts importants et constants dans le traitement des données à des fins (i) d'optimisation d'exploitation du modèle (test de l'impact de la spatialisation des MH, analyse de seuils de fonctionnalité, *etc* ...), (ii) de mise en place d'analyses automatisées, et (iii) de développement de méthodes de représentation et de communication des résultats.

8. RÉFÉRENCES

- Ames DP, Rafn EB, Van Kirk R & Crosby B (2009) Estimation of stream channel geometry in Idaho using GIS-derived watershed characteristics. *Environmental Modelling & Software* 24(3):444-448.
- Bae D-H, Jung I-W & Lettenmaier DP (2011) Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. *Journal of Hydrology* 401(1-2):90-105.
- Brinson MM (2009) The United States HGM (hydrogeomorphic) approach. *The wetlands handbook, Chapter 22. Wilwy-Blackwell, Oxford*. p 486-512.
- Brinson MM (2011) Wetlands: integrating multidisciplinary concepts. Chapter 5, classification of wetlands. p 96-110.
- Brinson MM & Rheinhardt R (1996) The role of reference wetlands in functional assessment and mitigation. *Ecological Applications* 6:69-76.
- Brooks R, Brinson M, Havens K, Hershner C, Rheinhardt R, Wardrop D, Whigham D, Jacobs A & Rubbo J (2011) Proposed Hydrogeomorphic Classification for Wetlands of the Mid-Atlantic Region, USA. *Wetlands* 31(2):207-219.
- Burt TP, Bates PD, Stewart MD, Claxton AJ, Anderson MJ & Price DA (2002) Water table fluctuation within the floodplain of the river Severn, England. *Journal of Hydrology* 262:1-20.
- Buteau P, Dignard N & Grondin P (1994) *Système de classification des milieux humides du Québec. Ministère des Ressources naturelles, Secteur des Mines*. 25 p
- Caya D & Laprise R (1999) A Semi-Implicit Semi-Lagrangian Regional Climate Model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review* 127(3):341-362.
- Cowardin LM, Carter V & Golet FC (1979) *Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States, U.S. Department of the Interior. Fish and Wildlife Service*. Washington, D.C. 131 p
- de Elia R & Côté H (2010) Climate and climate change sensitivity to model configuration in the Canadian RCM over North America. *Meteorologische Zeitschrift* 19(4):325-339.
- de Groot RS, Stuij MAM, Finlayson CM & Davidson N (2007) Évaluation des zones humides : orientations sur l'estimation des avantages issus des services écosystémiques des zones humides. Rapport technique Ramsar n°3. Séries des publications techniques de la CDB n°27. Secrétariat de la Convention de Ramsar, Gland, Suisse et Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, Montréal, Canada. ISBN 2 940073 31 7).
- Dugan PJ (1990) *La conservation des zones humides : Problèmes actuels et mesures à prendre. UICN-Union mondiale pour la nature*. Gland, Suisse. 94 p
- Flato GM & Boer GJ (2001) Warming Asymmetry in Climate Change Simulations. *Geophysical Research Letters* 28:195-198.
- Fortin J, Turcotte R, Massicotte S, Moussa R, Fitzback J & Villeneuve J (2001) Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data. I: Description of Model. *Journal of Hydrologic Engineering* 6(2):91-99.
- GIEC (2007) *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. GIEC, Genève, Suisse. 103 p
- Grillakis MG, Koutroulis AG & Tsanis IK (2011) Climate change impact on the hydrology of Spencer Creek watershed in Southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology* 409(1-2):1-19.

- Gwin SE, Kentula ME & Shaffer PW (1999) Evaluating the effects of wetlands regulation through hydrogeomorphic classification and landscape profiles. *Wetlands* 19:477-789.
- Hegerl GC, Hasselmann K, Cubash U, Mitchell JFB, Roeckner E, Voss R & Waszkewitz J (1997) Multi-fingerprint detection and attribution analysis of greenhouse gas, greenhouse gas-plus-aerosol and solar forced climate change. *Climate Dynamics* 13:613-634.
- Houghton GC, Ding Y, Griggs D, Noguer M, van der Linden P, Dai X, Maskell K & Johnson C (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of working group I to the Third Assessment Report of IPCC*. Cambridge University Press.
- Huntington TG (2006) Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* 319(1-4):83-95.
- Jobin B, Beaulieu J, Grenier M, Bélanger L, Maisonneuve C, Bordage D & Filion B (2004) Les paysages agricoles du Québec méridional. *Le Naturaliste Canadien* 128(2):92-98.
- Joly M, Primeau S, Sager M & Bazoge A (2008) *Guide d'élaboration d'un plan de conservation des milieux humides. Première édition, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs*. 68 p
- Junglaus JH, Botzet M, Haak H, Keenlyside N, Luo JJ, Latif M, Marotzke J, Mikolajewicz U & Roeckner E (2006) Ocean circulation and tropical variability in the AOGCM ECHAM5/MPI-OM. *Journal of Climate* 19(16):3952-3972.
- Labbé J, Fournier R & Théau J (2011) *Outils d'analyses hydrologique, économique et spatiale des services écologiques procurés par les milieux humides des basses-terres du Saint Laurent : adaptation aux changements climatiques - documentation et sélection des bassins versants à l'étude*. 79 p
- Léveillé JP (2007) *L'industrie de la tourbe au bas-Saint-Laurent : Une histoire d'image. Essai*. Université Laval
- Li T & Ducruc J-P (1999) *Les provinces naturelles. Niveau I du cadre écologique de référence du Québec*. 90 p
- Liu Y, Yang W & Wang X (2008) Development of a SWAT extension module to simulate riparian wetland hydrologic processes at a watershed scale. *Hydrological Processes* 22(16):2901-2915.
- Mann M, Bradley R & Hughes M (1998) Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392:779-787.
- Matthews GVT (1993) *The Ramsar Convention on Wetlands: Its History and Development. Ramsar Convention Bureau, Gland, Switzerland. ISBN: 2-940073-00-7*.
- MEA (2005) *Évaluation des écosystèmes pour le millénaire. Ecosystems and human well-being: wetlands and water. Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment Series*. World Resources Institute. Washington, DC), p 80.
- Middleton BA (2002) *Flood Pulsing in Wetlands: Restoring the natural Hydrological Balance. National Wetlands Research Center, USGS, Lafayette, Louisiana. New York*.
- Mitsch WJ & Gosselink JG (2007) *Wetlands, 4th ed., John Wiley and Sons, Inc*. New Jersey, NY.
- Mpelasoka FS & Chiew FHS (2009) Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projection. *Journal of Hydrometeorology* 10:1168-1183.
- Nakicenovic N, Davidson O, Davis G, Grübler A, Kram T, Lebre La Rovera E, Metz B, Morita T, Pepper W, Pitcher H, Sankovski A, Shukla P, Swart R, Watson R & Dadi Z (2000) *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge. 599 p
- Nash JE & Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models : part I-A : discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.

- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR & Williams JR (2005) Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005. Temple, Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.
- New M, Lopez A, Dessai S & Wilby R (2007) Challenges in using probabilistic climate change information for impact assessments: an example from the water sector. *Philosophical Transactions of the Royal Society A - Mathematical Physical and Engineering Sciences* 365(1857):2117-2131.
- Nie W, Yuan Y, Kepner W, Nash MS, Jackson M & Erickson C (2011) Assessing impacts of Landuse and Landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed. *Journal of Hydrology* 407(1-4):105-114.
- Orlandini S, Moretti G, Franchini M, Aldighieri B & Testa B (2003) Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. *Water Resources Research* 39(6):n/a-n/a.
- Padmanabhan G & Bengtson ML (2001) Assessing the influence of wetlands on flooding. In : Hayes D.F. (Ed.). *Process Wetlands Engineering and River Restoration, vol.10, Reno, Nevada*.
- Paquin D (2010) Évaluation du MRCC4 en passé récent (1961-1999). Ouranos, Équipe Simulations climatiques. Rapport interne no 15.
- Poirier C, Fortier Filion TC, Turcotte R & Lacombe P (2012) Apports verticaux journaliers estimés de 1900 à 2010 - version avril 2012. Contribution au Programme d'acquisition de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). *Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Direction de l'expertise hydrique*.
- Rawls WJ & Brakensiek DL (1989) Estimation of soil water retention and hydraulic properties. *Unsaturated flow in hydrologic modeling: Theory and practice. . NATO ASI series. Series C: Mathematical and physical sciences. H.J. Morel-Seytoux, ed., 275, Kluwer Academic, Boston, 275-300*.
- Rousseau AN, 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.
- Schwarz G (1978) Estimating the dimension of a model. *Annals of statistics* 6(2):461-464.
- Scinocca JF, McFarlane NA, Lazare M, Li J & Plummer D (2008) Technical Note: The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry Physics* 8:7055-7074.
- Scott DA (1989) Design of Wetlands Data Sheet for Database on Ramsar Sites. Mimeographed report to Ramsar Convention Bureau. Gland, Switzerland).
- Secrétariat de la Convention de Ramsar (2006) *Le Manuel de la Convention de Ramsar : Guide de la Convention sur les zones humides (Ramsar 1971). 4^e éd.* Gland, Suisse : Secrétariat de la Convention de Ramsar. 124 p
- Turcotte R, Fortin JP, Rousseau AN, Massicotte S & Villeneuve JP (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, Rousseau AN, Fortin JP & Villeneuve JP (2003) A processed-oriented multiple objective calibration strategy accounting for model structure. In Duan, Q., V.K. Gupta, S. Sorooshian, A.N. Rousseau and Turcotte (Editors), calibration of watershed models. *American Geophysical Union, Washington*, 153-163.
- Wang X, Shang S, Qu Z, Liu T, Melesse AM & Yang W (2010) Simulated wetland conservation-restoration effects on water quantity and quality at watershed scale. *Journal of Environmental Management* 91(7):1511-1525.

- Wang X, Yang W & Melesse AM (2008) Using hydrological equivalent wetland concept within SWAT to estimate streamflow in watersheds with numerous wetlands. *Transactions of the ASABE* 51(1):55-72.
- Yetter JC (2004) *Hydrology and geochemistry of freshwater wetlands on the Gulf of Mexico of Veracruz*. (Waterloo, Mexico).
- Zedler JB & Kercher S (2005) Wetlands resources: status, trends, ecosystem services and restorability. *Annual review of environment and resource* 30:39-74.
- Zhou L, Zhou G & Jia Q (2009) Annual cycle of CO₂ exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China. *Aquatic Botany* 1:91-98.
- Zoltai SC & Vitt DH (1995) Canadian wetlands: Environmental gradients and classification. *Plant Ecology* 118(1):131-137.