

**Adaptation du modèle HYDROTEL à la simulation de
Crues Maximales Probables sur des grands bassins nordiques
Cas du Complexe La Grande**

Rapport présenté à
HYDRO-QUÉBEC et OURANOS

Alain N. Rousseau, ing., Ph.D.¹,
Stéphane Savary, ing. jr., M.Sc.¹
Sébastien Tremblay¹

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

Rapport No-R1573

31 Décembre 2014

¹ Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau-Terre et Environnement

ISBN : 978-2-89146-844-2

© Alain N. Rousseau, 2014

Table des Matières

Remerciements.....	1
1 Contexte et problématique	3
1.1 Livrables	7
1.2 Organisation du rapport	7
2 Intégration à la modélisation hydrologique.....	9
2.1 Discrétisation et caractérisation des sous-bassins du Complexe La Grande à l'aide de PHYSITEL.....	9
2.2 Intégration des sous-bassins du Complexe La Grande au modèle HYDROTEL.....	24
3 Caractérisation des types de sol sur le Complexe La Grande	33
4 Modèle de températures et de gel du sol.....	41
4.1 Description du modèle.....	41
4.2 Implantation dans le modèle HYDROTEL.....	45
5 Modèle des milieux humides et tourbières	53
6 PHYSITEL et HYDROTEL versions 64 bits	71
7 Recommandations et conclusions	73
7.1 Intégration à la modélisation hydrologique.	73
7.2 Caractérisation des types de sol sur le Complexe La Grande.....	75
7.3 Modèle de températures et de gel du sol	75
7.4 Modèle des milieux humides et tourbières.....	76
7.5 PHYSITEL et HYDROTEL versions 64 bits	77
7.6 Conclusions	77
8 Références bibliographiques	79

Liste des figures

Figure 2.1 Schéma sommaire du SIG PHYSITEL.	10
Figure 2.2 MNA du secteur La Grande incluant les sous-bassins du Complexe.....	12
Figure 2.3 Réseau hydrographique du sous-bassin Caniapiscou.....	13
Figure 2.4 Réseau hydrographique du sous-bassin Caniapiscou intégré à PHYSITEL.....	16
Figure 2.5 Segmentation en UHRH / Versants du sous-bassin Caniapiscou.....	19
Figure 2.6 Carte d'occupation du sol sur l'ensemble du complexe La Grande.	22
Figure 2.7 Schéma sommaire du modèle HYDROTEL.....	26
Figure 2.8 Intégration du sous-bassin Caniapiscou au modèle HYDROTEL (version 2.6 32bits)...	27
Figure 2.9 Intégration du sous-bassin Caniapiscou au modèle HYDROTEL (version 2.8 64bits)...	28
Figure 3.1 Triangle des textures de sol extrait de Moeys (2014).	35
Figure 3.2 Carte des types de sols sur l'ensemble du Complexe La Grande.	36
Figure 4.1 Valeurs de températures simulées par le modèle de température comparées aux valeurs mesurées à 10 cm sous la surface.	44
Figure 4.2 Fichier générique du modèle de températures et de gel du sol.	47
Figure 4.3 Impact du gel du sol sur le modèle de bilan d'eau vertical dans le sol d'HYDROTEL (BV3C).....	48
Figure 5.1 Exemple d'identification des MH et des aires drainées sur le sous-bassin Caniapiscou.	55
Figure 5.2 Schéma illustrant le HEW (ou MHE) et le découpage de l'UHRH en versant.....	56
Figure 5.3 Algorithme de calcul pour l'estimation des flux associés aux MH isolés.	60
Figure 5.4 : Algorithme de calcul pour l'estimation des flux associés aux MH riverain.....	62
Figure 5.5 Schéma d'ensemble de l'intégration des milieux humides dans le modèle hydrologique HYDROTEL.	65
Figure 5.6 Exemple de fichier descriptif des milieux humides isolés équivalents.	67
Figure 5.7 Exemple de fichier descriptif des milieux humides riverains équivalents.....	67

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Sommaire de la discrétisation des sous-bassins du Complexe La Grande.	19
Tableau 2.2 Regroupements des classes de la classification Canadienne MODIS sur le Complexe La Grande.	21
Tableau 2.3 Pourcentage de couverture des classes d'occupation sur chaque sous-bassin du Complexe La Grande.	23
Tableau 2.4 Processus simulés et algorithmes disponibles pour les simulations hydrologiques.	29
Tableau 3.1 Résumé des propriétés hydrodynamiques des types de sols sur le Complexe La Grande.	38
Tableau 4.1 Valeurs de référence de calages des paramètres du modèle de température.	44
Tableau 5.1 Paramètres descriptifs des milieux humides isolés.	68
Tableau 5.2 Paramètres descriptifs des milieux humides riverains.	69
Tableau 6.1 Éléments de comparaison entre les versions du SIG PHYSITEL.	71
Tableau 6.2 Éléments de comparaison entre les versions du modèle hydrologique HYDROTEL.	72

Remerciements

Dans un premier temps, il y a lieu de remercier des nombreux contributeurs au projet qui ont permis la réalisation de cette étude. Sans leur participation, il n'aurait pas été possible d'atteindre les objectifs.

De l'INRS-ETE, merci à M. Karem Chokmani, Mme Monique Bernier, M. Yves Gauthier, M. Jimmy Poulin et Mme Sophie Laberge.

D'Agriculture et Agro-Alimentaire Canada, merci à M. Georges Thériault, M. Michel Nolin (retraité), M. Luc Lamontagne (retraité), M. Dave Howlett et Mme Isabelle Perron.

Du Ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques, merci à M. Daniel Blais, Mme Marie-Josée Côté, M. Frédéric Poisson et Mme Joany Suazo.

Du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, merci à M. Antoine Leboeuf.

De l'Université Laval, merci à M. Serge Payette et M. Silvio Josée Gumière.

D'Environnement Canada, merci à M. Kit Szeto, Mme Diana Versegby et M. Ed Chan.

Du Centre d'Expertise Hydrique du Québec, merci à M. Philippe Noël.

D'Ouranos, merci à M. René Roy, M. Richard Harvey, Mme Dominique Paquin et Mme. Jacinthe Clavet-Gaumont.

Merci aussi à M. Alain Royer et M. Gwenaël Carrer.

1 Contexte et problématique

Dans le cadre de la révision des Crues Maximales Probables (CMP) pour le Complexe de La Grande Rivière (Complexe La Grande), une modélisation hydrologique du bassin versant de ce complexe est nécessaire. Compte tenu des récentes remises en question des résultats de la CMP fournis en 2005 par le modèle hydrologique HSAMI, il a été proposé, entre autres, d'utiliser pour cette révision un modèle hydrologique distribué, en l'occurrence le modèle HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001; Turcotte *et al.*, 2003) dont la prise en main par l'équipe de prévision d'Hydro-Québec Production est en train d'être complétée. Le modèle qui est maintenant convenablement calé pour un certain nombre de bassins d'Hydro-Québec répond aux attentes dans les bassins du sud. Toutefois, pour les grands bassins du Nord comme ceux du Complexe La Grande, l'utilisation du modèle requiert quelques travaux préliminaires permettant une meilleure implantation sur ce secteur. Ces activités sont décrites aux points suivants :

- (1) Analyser l'influence des conditions climatiques sur le sol (gel et dégel) et sur les régimes d'écoulement. Tester, lors du calage subséquent, la capacité du modèle HYDROTEL à simuler dynamiquement l'écoulement.
- (2) Caractériser les différents types de sol qui composent l'ensemble du Complexe La Grande et proposer pour chacun d'eux des paramètres appropriés.
- (3) Intégrer la modélisation de l'écoulement dans les tourbières et proposer pour ce type d'écoulement les bornes pour le calage des paramètres du modèle.
- (4) Mettre à jour le modèle HYDROTEL afin qu'il soit apte à la simulation de CMP sur le Complexe La Grande.

Afin de permettre de réaliser les activités de travail décrites précédemment, des activités de travail précises ont été proposées pour chaque activité.

(1) Analyser l'influence des conditions climatiques sur le sol (gel et dégel) sur les régimes d'écoulement. Tester, lors du calage subséquent, la capacité du modèle HYDROTEL à simuler dynamiquement l'écoulement.

Des travaux antérieurs ont permis la mise en place d'une modélisation hydrologique à l'aide du système d'information géographique (SIG) PHYSITEL (Rousseau *et al.*, 2011; Royer *et al.*, 2006; Turcotte *et al.*, 2001) et du modèle hydrologique HYDROTEL sur un sous-bassin représentatif du Complexe La Grande, le bassin de la rivière Nécopastic (Jutras *et al.*, 2009). Ces travaux, toutefois, ne comprenaient pas explicitement de mise en place d'une modélisation de l'impact du gel sur le paramétrage des sols. Également, aucune donnée ne permettait alors d'illustrer explicitement si cet état des sols se met en place bien avant l'accumulation de la neige et persiste longtemps après la fonte et par conséquent, s'il y a un véritable impact sur la dynamique de l'écoulement. Depuis ces travaux, des données de températures du sol (mesurées à 5cm et 10cm sous la surface) disponibles pour la station de l'IREQ sur le secteur Nécopastic ont permis de mettre en place un premier modèle de température du sol qui permet aussi de déterminer la profondeur du gel. Ce modèle très simple se base sur les travaux de Rankinen *et al.* (2004). L'implantation du modèle de température du sol dans le modèle hydrologique HYDROTEL implique également une interaction avec l'infiltration de l'eau dans le sol. Ce modèle constitue un premier pas dans la prise en compte du gel et dégel du sol sur l'hydrologie et son impact pourra être mieux quantifié lors du calage du modèle et lors des travaux futurs.

(2) Caractériser les différents types de sols qui composent l'ensemble du Complexe La Grande et proposer pour chacun d'eux des paramètres appropriés.

Lors de travaux antérieurs sur le bassin de la rivière Nécopastic, certains travaux de paramétrages des sols pour le milieu boréal québécois ont été effectués (Jutras *et al.*, 2009). Également, des travaux de Levrel *et al.* (2009, 2010), Carrer (2014) et Carrer *et al.* (2014) ont porté sur la caractérisation *in situ* et en laboratoire de la conductivité

1. Contexte et problématique

hydraulique des sols organiques que l'on retrouve sur le territoire. Les informations découlant de ces travaux ont été intégrées au SIG PHYSITEL afin de permettre de répondre en partie à cette activité de travail du projet. En parallèle, lors de l'intégration des bassins à la modélisation hydrologique, la caractérisation spatiale des types sols découle des données de pédo-paysages Canadien obtenues d'Environnement Canada (Szeto *et al.* 2008, Soil Landscape of Canada V.2.2). Ce sont ces mêmes données qui ont été utilisées par nos collègues chez Ouranos dans le cadre de l'application du modèle régional canadien du climat dont le modèle de surface CLASS requiert de l'information sur les propriétés hydrodynamiques des sols du milieu boréal québécois.

(3) Intégrer la modélisation de l'écoulement dans les tourbières et proposer pour ce type d'écoulement les bornes pour le calage des paramètres du modèle.

Lors de travaux antérieurs sur le bassin de la rivière Nécopastic, une première modélisation explicite des milieux humides de types ombrotrophe a été mise en place (Jutras *et al.*, 2009). Plus récemment, cette modélisation a été mise à jour lors de travaux de modélisation de l'impact des milieux humides sur les crues et les étiages dans deux grands bassins du sud du Québec. Ces travaux ont permis de raffiner l'approche de modélisation des milieux humides avec PHYSITEL/HYDROTEL et de bien distinguer les contributions des milieux isolés et riverains (Rousseau *et al.*, 2012). Ces travaux de modélisation sont basés sur des représentations des fonctions hydrologiques sommaires des tourbières et milieux humides à caractère global. C'est-à-dire, sur la base de travaux de terrain (Clerc 2009; Carrer 2014 et Carrer *et al.* 2014) et de connaissances rapportées dans la littérature, ces milieux sont représentés par des réservoirs avec des lois de vidange qui dépendent des volumes maximaux pour les milieux isolés et par équilibre hydrostatique ou gradient hydraulique pour les milieux riverains. Dans le cadre de ce projet, les modules informatiques de cette modélisation ont été intégrés dans la nouvelles versions 64 bits de d'HYDROTEL.

(4) Mise à jour du modèle hydrologique HYDROTEL afin qu'il soit apte à la simulation de CMP sur le Complexe La Grande

Les travaux porteront sur la mise à jour des versions 64 bits de PHYSITEL et HYDROTEL mais plus spécifiquement du modèle HYDROTEL par opposition aux versions 32 bits traditionnelles. Ces versions, une fois complétées, seront beaucoup plus aptes à la mise en place de la modélisation distribuée du Complexe La Grande. C'est donc à partir de ces versions que l'on propose de répondre à ce projet avec une emphase sur la version 64 bits d'HYDROTEL. L'intégration dans les nouvelles versions 64 bits d'une modélisation de la température du sol, des propriétés hydrodynamiques des sols du milieu boréal québécois et des modules des milieux humides représenteront donc la mise à jour nécessaire pour le calcul de la CMP sur le Complexe La Grande. Ce travail ne tient pas compte de la mise en place de la séquence de températures du printemps requise dans le calcul des CMP en condition printanière.

Il demeure important de noter que le modèle hydrologique HYDROTEL permet déjà le calcul de CMP tel que démontré lors de travaux précédents (Rousseau *et al.* 2010) mais une version 64 bits adaptée au cas du Complexe La Grande sera plus apte à répondre à ce besoin spécifique.

En complément, l'ensemble de ces étapes de travail et des méthodes qui sont proposées pour atteindre les objectifs s'intègre essentiellement dans un contexte global de mise en place de la modélisation hydrologique sur le Complexe La Grande. Ainsi l'objectif général s'oriente sur la mise en place et l'adaptation des outils PHYSITEL et HYDROTEL sur le Complexe La Grande. Cette mise en place vise plus spécifiquement les sous-bassins ciblés par HYDRO-QUÉBEC, soit Caniapiscau (Cania), La Forge (LaF), La Grande 4 (LG 4), La Grande 3 (LG 3), La Grande 2 (LG 2), La Grande 1 (LG 1).

Le bon déroulement du projet et les efforts voués aux activités demeurent intimement liés à la qualité des données disponibles. Ce qui sera abordé plus en détail dans la section portant sur l'intégration à la modélisation hydrologique.

1. Contexte et problématique

1.1 Livrables

Dans le cadre de ce projet, l'INRS produira les livrables suivants :

(i) rapport d'expertise qui décrit la réalisation de chaque étape de travail liée à la réalisation du projet;

(ii) une description des types de sol sur le Complexe La Grande adaptée à l'intégration à la modélisation hydrologique (PHYSITEL / HYDROTEL);

(iii) une version du modèle HYDROTEL 64 bits mis à jour et adaptée aux calculs des CMP pour le Complexe La Grande.

1.2 Organisation du rapport

Ce rapport met l'emphase à la fois sur les diverses activités de travail mais aussi sur les efforts d'intégration des sous-bassins du Complexe La Grande à la modélisation hydrologique. Plus spécifiquement, le chapitre deux (2) présente tous les travaux d'intégration relatifs aux sous-bassins versant et pour des besoins d'illustration introduit certaines planches sur le secteur Caniapiscau. En complément du chapitre deux (2), le chapitre trois (3) présente la caractérisation des types de sols sur le Complexe La Grande. Le chapitre quatre (4) porte sur la description du modèle de température et de gel / dégel du sol et de son intégration au modèle HYDROTEL. Le Chapitre cinq (5) décrit la prise en compte des milieux humides et tourbières dans la modélisation hydrologique. Finalement, le chapitre (6) dresse les grandes étapes de la migration de la programmation d'HYDROTEL vers une version 64 bits adaptée au calcul de CMP pour les bassins versants nordiques.

2 Intégration à la modélisation hydrologique

2.1 Discrétisation et caractérisation des sous-bassins du Complexe La Grande à l'aide de PHYSITEL

L'application du modèle hydrologique HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001; Turcotte *et al.*, 2003) sur un secteur repose traditionnellement sur l'intégration et la discrétisation d'un bassin versant à l'aide du système d'information géographique (SIG) PHYSITEL. PHYSITEL (Rousseau *et al.*, 2011; Royer *et al.*, 2006; Turcotte *et al.*, 2001) est un SIG développé afin de déterminer la structure d'écoulement d'un bassin versant en support à la modélisation hydrologique. Pour permettre la détermination de la structure d'écoulement, PHYSITEL nécessite en entrée :

- (i) un modèle numérique d'altitude (MNA) et
- (ii) une représentation vectorielle du réseau hydrographique.

Également, comme le requiert le modèle HYDROTEL, les données spatiales suivantes sont intégrées :

- (i) occupation du sol et
- (ii) types de sols

doivent être intégrées au SIG PHYSITEL, afin de compléter la caractérisation physiographique de chaque UHRH (unité hydrologique relativement homogène). Ces UHRH découlent de la segmentation ou discrétisation d'un bassin en unités hydrologiques (c'est-à-dire., sous-bassins ou versants) sur lesquels seront simulés les divers processus d'écoulement de l'eau au sol par le modèle hydrologique HYDROTEL.

Par conséquent, la qualité de la modélisation hydrologique qui découle de la discrétisation d'un bassin versant par PHYSITEL repose donc sur la qualité des données disponibles pour un secteur donné. La disponibilité des données tel qu'un MNA de

bonne résolution, un réseau hydrographique vectoriel bien défini, une carte de l'occupation du territoire incluant une bonne caractérisation des milieux humides et une carte des types de sol représentent donc des éléments majeurs dans la mise en place de la modélisation hydrologique sur un bassin ou sous-bassin versant donné.

Dans une perspective d'ensemble, la figure 2.1 présente un schéma général des étapes de discrétisation et caractérisation à l'aide du SIG PHYSITEL.

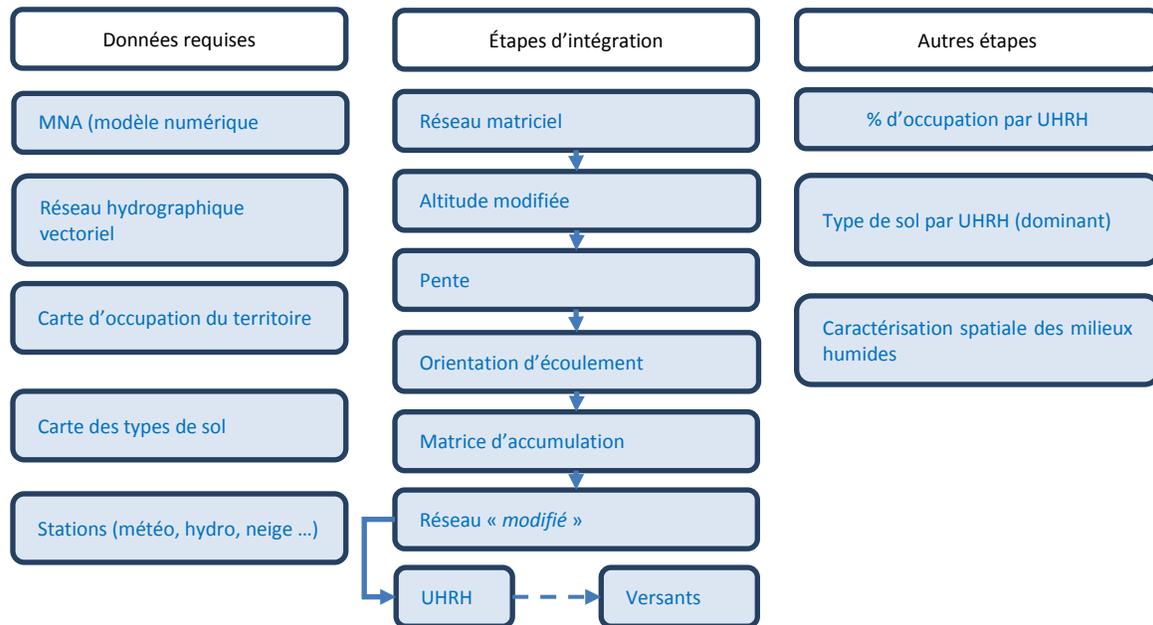


Figure 2.1 Schéma sommaire du SIG PHYSITEL.

Dans le cadre de l'intégration sur le Complexe La Grande, il a été jugé plus approprié de procéder à une intégration par sous-bassin versant soit les sous-bassins (de l'amont vers l'aval) : (i) Caniapiscau; (ii) La Forge 1 et 2 combinés; (iii) La Grande 4; (iv) La Grande 3; (v) La Grande 2 et (vi) La Grande 1. Ainsi, ce sont six intégrations distinctes qui ont été menées, soit une par sous-bassin versant. Fait à noter, ces travaux d'intégration représentent une première implantation d'un modèle hydrologique distribué sur ce secteur. Les limites des sous-bassins versants mentionnés nous ont été transmises par HYDRO-QUÉBEC et l'ensemble des travaux subséquents respectent ces limites.

2. Intégration à la modélisation hydrologique

Le modèle numérique d'altitude (MNA) sur l'ensemble du secteur nous a été transmis également par nos collègues d'HYDRO-QUÉBEC. Il a été convenu d'utiliser une résolution horizontale de 100 m afin de pouvoir traiter rapidement les données à l'aide de la version PHYSITEL courante afin de faciliter les travaux et accélérer le processus d'intégration, étant donné que la version PHYSITEL 64 bits ne présente pas d'interface, ce qui rend l'intégration beaucoup plus complexe. Également, le fait d'opter pour une intégration par sous-bassin permet l'usage de la version courante de PHYSITEL et permet de bénéficier de l'interface, du traitement, de la correction notamment du réseau hydrographique et des orientations d'écoulement. Le MNA a été généré à partir de feuillets du Modèle numérique de surface du Canada (MNSC) qui fait partie du système d'altimétrie conçu par Ressources Naturelles Canada. Plus précisément, le MNSC à 0,75 seconde (~20 m) est un produit dérivé du modèle numérique de surface original à 1 seconde (30 m) du Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) d'une précision vertical relative $\leq 10\text{m}$.

Dans le contexte actuel et spatial, une résolution horizontale de 100 m assure une représentation suffisamment détaillée des bassins versants décrivant la variabilité spatiale de la topographie du terrain et du réseau hydrographique. Les données matricielles du MNA agissent comme base d'informations dans la détermination de la pente et des orientations d'écoulement liées aux UHRH. La figure 2.2 présente le MNA et les limites des sous-bassins versants du Complexe La Grande. Il est important de noter que lors de l'intégration et la caractérisation des sous-bassins par le SIG PHYSITEL les MNA associés à chaque sous-bassin ont été préalablement découpés en fonction des limites du sous-bassin visé.

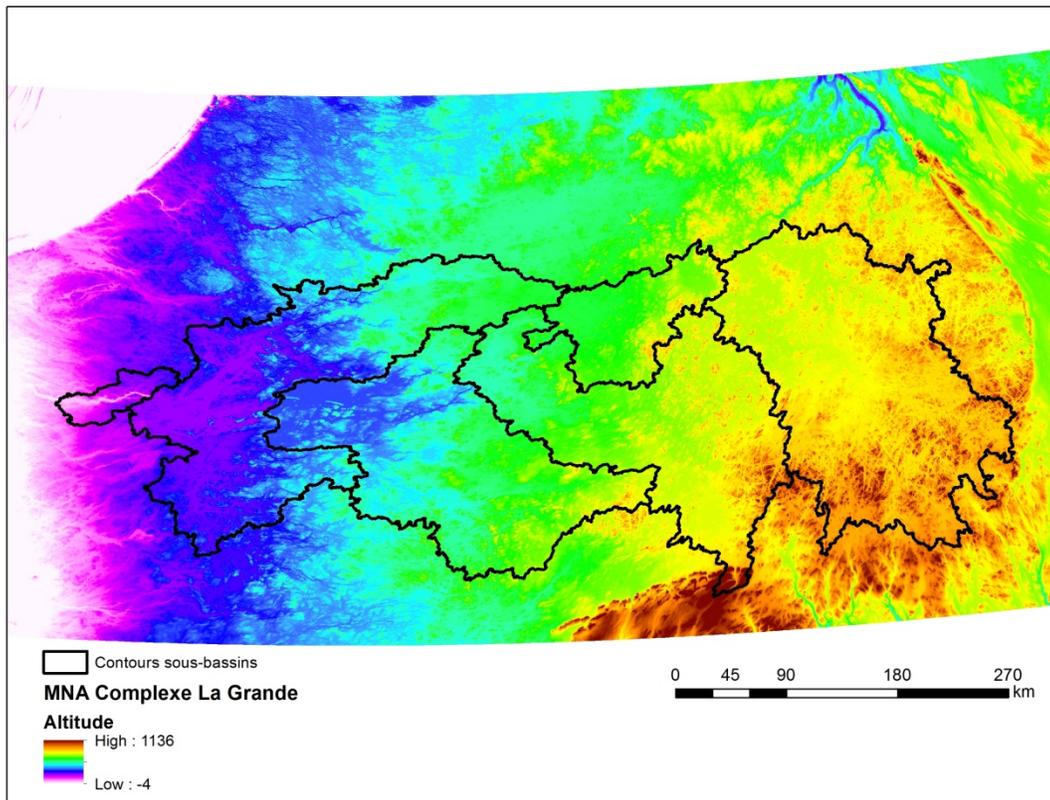


Figure 2.2 MNA du secteur La Grande incluant les sous-bassins du Complexe.

Les représentations détaillées du réseau hydrographique et de la structure d'écoulement du bassin versant permettent de raffiner l'identification des lacs, réservoirs et petites étendues d'eau ne pouvant être repérées par la simple analyse du MNA. Aussi, la détermination des UHRH peut être influencée par la complexité du réseau hydrographique et son degré de ramification. Par conséquent, le réseau de cours d'eau sur les sous-bassins du Complexe La Grande peut être représenté ou reproduit par un nombre variable de tronçons qui restreignent ou accentuent la définition des UHRH. La création du réseau hydrographique sur les sous-bassins du Complexe La Grande représente une étape cruciale et très couteuse en temps dans l'intégration de la modélisation hydrologique. Le réseau source utilisé en format vectoriel est le réseau hydrographique national filamenteux orienté. Celui-ci a été téléchargé gratuitement à partir du site Géobase (<http://www.geobase.ca/geobase/fr/data/nhn/>) et soutenu par Ressources Naturelles Canada. La figure 2.3 présente un exemple du réseau

2. Intégration à la modélisation hydrologique

hydrographique national filamenteux orienté sur le sous-bassin Caniapiscau incluant les lacs et réservoirs.

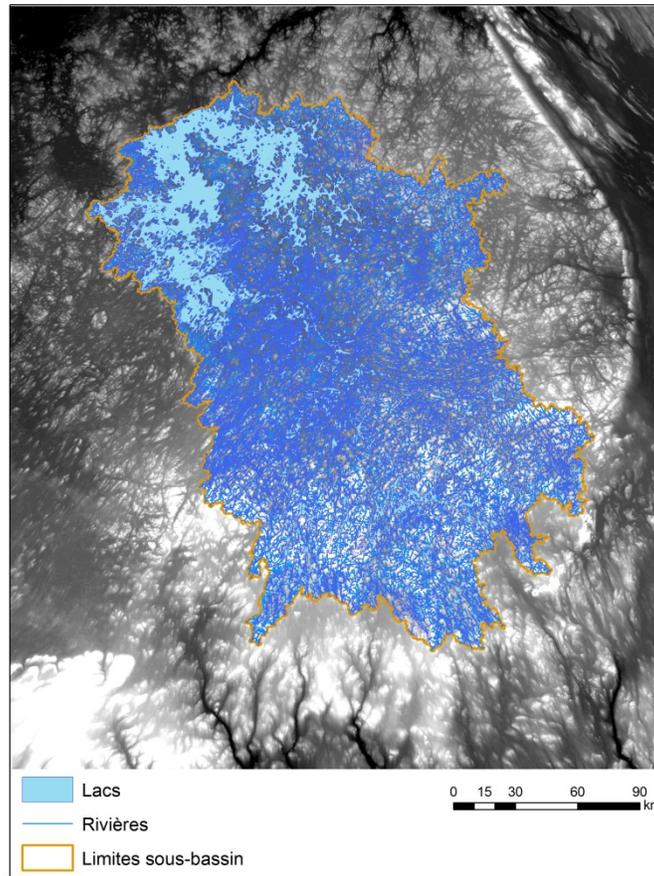


Figure 2.3 Réseau hydrographique du sous-bassin Caniapiscau.

En complément de la figure 2.3, certaines caractéristiques du réseau peuvent être soulignées :

- (i) le réseau filamenteux présente un niveau de ramification très important;
- (ii) il y a un nombre très important de lacs de très petites tailles et
- (iii) il y a des sections de lacs ou réservoir qui s'apparentent plutôt à des segments de rivières.

Conséquemment à ces caractéristiques, le réseau hydrographique national filamenteux orienté ne peut être utilisé directement dans sa forme actuelle. Ainsi, d'importants efforts de simplification et d'adaptation ont été investis afin de permettre la prise en compte de ce réseau par le SIG PHYSITEL. Ces efforts peuvent être décrits sous forme d'étapes précises et ordonnées:

- 1) Calcul automatisé de l'ordre de Strahler pour chaque tronçon du réseau de chaque sous-bassin. Cette étape a pour but d'établir une hiérarchisation de l'amont vers l'aval des éléments du réseau hydrographique. Lors de cette étape, les lacs (qui sont des entités distinctes du réseau) ne sont pas pris en compte et sont plutôt représentés par des segments d'écoulement uniques. Une telle hiérarchisation permet d'alléger au besoin le réseau hydrographique.
- 2) Retrait de tous les tronçons présentant un ordre de Strahler inférieur ou égal à deux (2). Cette opération permet de simplifier ou d'alléger grandement le réseau hydrographique et de tendre vers une version compatible avec le SIG PHYSITEL.
- 3) Retrait de tous les lacs de moins de 1 km² et de tous les lacs qui ne sont plus connectés au réseau hydrographique suite au retrait des tronçons à l'étape précédente.
- 4) Effacer tous les tronçons sous les entités de lacs et réservoirs, car de telles entités ne peuvent se superposer dans le SIG PHYSITEL.
- 5) Dissoudre tous les tronçons pour former une seule entité pour ensuite procéder au découpage du réseau aux intersections. Cette étape assure la création de nœuds strictement aux intersections.
- 6) Procéder à l'édition des lacs et réservoirs afin d'éviter la représentation de segments de rivières sous formes de lacs. Cette étape restreint l'étendue des lacs et réservoirs qui présentent parfois des ramifications trop grandes et s'apparentant d'avantage à des segments de rivières. Aussi, cette étape facilite la prise en compte du réseau hydrographique par PHYSITEL qui est souvent

2. Intégration à la modélisation hydrologique

complexifié par la prise en compte des lacs ou réservoirs ayant des contours très irréguliers, de grandes superficies accompagnées d'îles comme c'est le cas sur le Complexe La Grande.

- 7) Générer le réseau combiné (lacs et rivières) à des fins d'importation dans PHYSITEL à l'aide du logiciel MapInfo.
- 8) À l'aide de PHYSITEL, procéder aux dernières corrections en fonction des erreurs identifiées par celui-ci. Ces erreurs portent essentiellement sur les lacs à sorties multiples et les éléments du réseau non-connectés. La correction des erreurs est nécessaire afin de poursuivre l'intégration à l'aide du SIG PHYSITEL. Ces corrections assurent de rendre le réseau hydrographique compatible à la modélisation hydrologique à l'aide du modèle hydrologique HYDROTEL.

La figure 2.4 présente un exemple du réseau hydrographique corrigé et intégré à PHYSITEL sur le sous-bassin Caniapiscau.

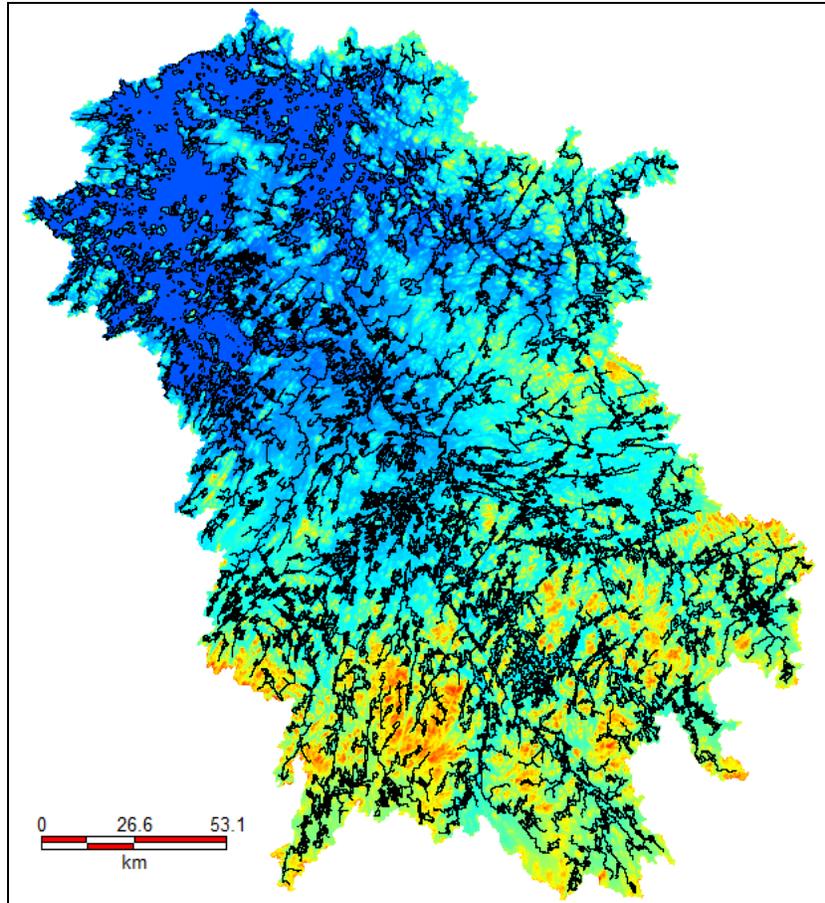


Figure 2.4 Réseau hydrographique du sous-bassin Caniapiscou intégré à PHYSITEL.

Bien que le réseau hydrographique intégré à PHYSITEL présente un niveau moins élevé de détail et de complexité, il demeure relativement chargé de par le nombre de lacs et de tronçons, ce qui limite son utilisation dans la modélisation hydrologique

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'aux cours d'eau. En se basant sur le MNA, PHYSITEL effectue par la suite le calcul de la pente de chaque pixel composant la matrice du MNA. À noter que les pentes sont définies selon les couples voisins d'altitudes nord-sud et est-ouest.

2. Intégration à la modélisation hydrologique

Les altitudes modifiées, ainsi que la pente, sont prises en compte dans la détermination des orientations d'écoulement à l'aide de l'algorithme D8-LTD (Orlandini *et al.*, 2003). Il a été démontré que cet algorithme est supérieur à d'autres algorithmes en matière de temps de calcul et de représentation physique des directions ou patrons d'écoulement (Rousseau *et al.*, 2005). Cette performance est notamment liée au calcul d'une matrice d'accumulation qui permet l'influence de l'écoulement des pixels en aval à partir de l'écoulement des pixels en amont.

Suite à la détermination de l'exutoire du bassin versant, PHYSITEL procède à l'identification de l'ensemble des pixels voisins s'écoulant vers l'exutoire et, suivant un processus d'écoulement par voisinage, regroupe l'ensemble des pixels formant le bassin versant. Dans le cadre de l'étude courante, la matrice d'accumulation se compose de l'ensemble des pixels du MNA puisque celui-ci a été préalablement découpé en fonction des limites de chaque sous-bassin du Complexe La Grande. Selon un processus itératif, il a été nécessaire d'apporter certaines corrections aux orientations d'écoulement afin d'assurer l'inclusion de l'ensemble des pixels constituant le MNA dans la matrice d'accumulation.

Suite au processus d'identification de la structure de drainage du bassin versant, l'étape suivante consiste à régénérer le réseau hydrographique en accord avec la règle que chaque pixel, drainant une superficie amont regroupant plus d'un pixel, fait partie du réseau hydrographique. Le niveau de détail et l'arborescence du réseau hydrographique nouvellement régénéré peuvent découler du seuil de pixels amonts drainés fixé par l'utilisateur ou encore, de la reproduction stricte du réseau hydrographique importé. Cette étape est cruciale dans la détermination des UHRH. En effet, une faible valeur seuil résulte en un réseau hydrographique détaillé, associé à une distribution complexe d'UHRH. En revanche, une valeur de seuil élevée résulte en un réseau hydrographique et une distribution d'UHRH simplifiée. Dans le cadre de l'intégration des sous-bassins du Complexe La Grande un seuil de 10 000 pixels (soit une superficie de 100 km²) a été utilisé systématiquement sur les sous-bassins Caniapiscau, La Forge 1 et 2, La Grande 4,

La Grande 3 et La Grande 2. Pour le sous-bassin La Grande 1, le réseau hydrographique final est identique au réseau de cours d'eau intégré à PHYSITEL en raison de la taille de ce sous-bassin. Conséquemment, le niveau de détail et l'arborescence des réseaux hydrographiques régénérés pour chaque sous-bassin supportent un nombre jugé suffisant d'UHRH sur les sous-bassins du Complexe La Grande. Il est important de noter que la régénération du réseau hydrographique vise l'obtention d'un nombre raisonnable d'UHRH permettant de restreindre le temps de calcul lors des simulations et ce, tout en préservant le niveau de détail des cours d'eau initialement intégrés.

Le réseau nouvellement reproduit permet la segmentation du bassin en UHRH, c'est-à-dire en surface d'écoulement vers un tronçon du réseau hydrographique régénéré. Ainsi, chaque UHRH est associé à un tronçon unique. Par la suite, ces UHRH sont subdivisés en versant qui offrent une meilleure représentation physique du terrain notamment au niveau des pentes et orientations moyennes à l'échelle d'un versant versus un UHRH qui couvrent à la fois les deux rives et les secteurs amont. Au final, ce sont ces mêmes versants qui seront qualifiés d'UHRH / Versants finaux et qui seront pris en compte lors de la modélisation hydrologique à l'aide d'HYDROTEL.

La figure 2.5 démontre la segmentation du sous-bassin Caniapiscau en 2090 UHRH / Versants d'une superficie moyenne de 19.4 km². Cette discrétisation du bassin versant assure une représentation sommaire et satisfaisante du réseau hydrographique et permettra d'effectuer des simulations hydrologiques dans un délai raisonnable.

2. Intégration à la modélisation hydrologique

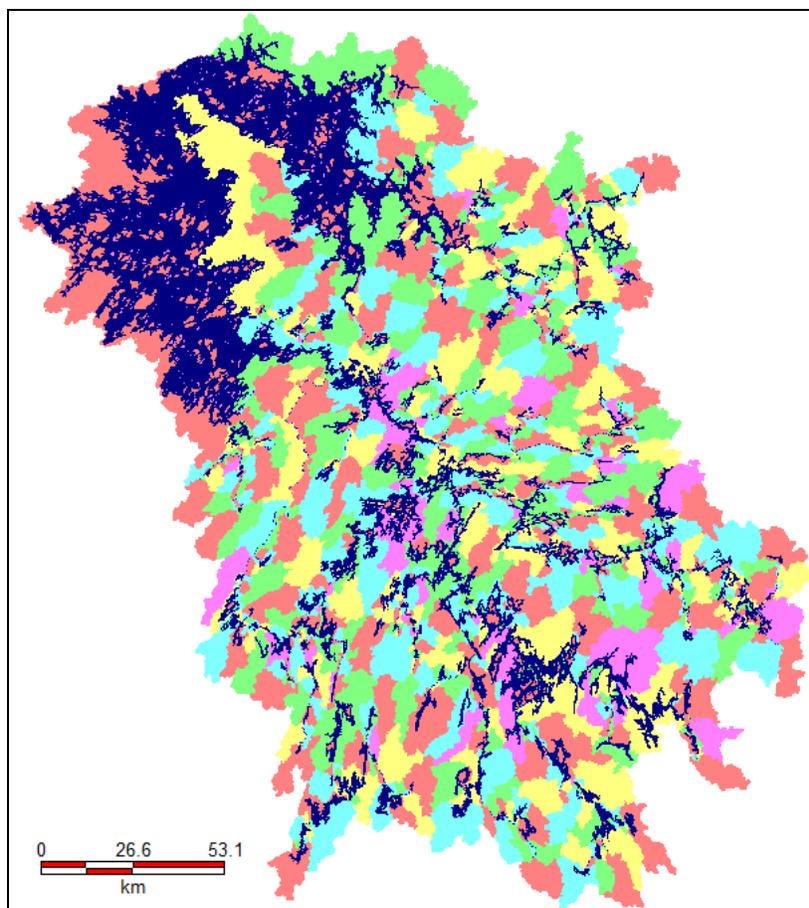


Figure 2.5 Segmentation en UHRH / Versants du sous-bassin Caniapiscau.

Le tableau 2.1 résume la discrétisation pour chaque sous-bassin du Complexe La Grande.

Tableau 2.1 Sommaire de la discrétisation des sous-bassins du Complexe La Grande.

	La Grande 1	La Grande 2	La Grande 3	La Grande 4	La Forge	Caniapiscau
Nb. UHRH / Versants	262	1487	1003	1658	603	2049
Superficie moyenne (km ²)	8.3	21.2	26	17.3	15.3	19.4
Nombre de tronçons	94	542	386	562	192	547

Le tableau 2.1 démontre certaines variations entre les sous-bassins qui sont fortement liées à la complexité du réseau hydrographique régénéré et aussi à la complexité des lacs et réservoirs et notamment du nombre plus ou moins élevé d'îles. Le sous-bassin La

Grande 1 se démarque également en raison de sa taille et du réseau régénéré qui est identique au réseau intégré pour ce sous-bassin spécifiquement.

Afin de compléter l'intégration des sous-bassins du Complexe La Grande, l'occupation du sol et les types de sol doivent être définis pour l'ensemble des sous-bassins. À ce jour, la définition de l'occupation du sol retenue sur l'ensemble du Complexe La Grande découle de la classification canadienne effectuée à l'aide de données satellitaires MODIS. Cette classification menée par Centre Canadien de Télédétection (Ressources Naturelles Canada) porte sur des données acquises jusqu'en 2005 ce qui en fait la classification d'ensemble la plus récente. Aussi, elle présente à la base une résolution horizontale de 250 m, aussi elle couvre la totalité du Canada et présente un nombre total de 39 classes distinctes. Pour les besoins courants, cette classification a été ramenée à une résolution horizontale de 100 m ce qui a pour effet d'altérer quelque peu l'information disponible. Aussi, il a été jugé pertinent de restreindre le nombre de classes, soit de procéder à des regroupements plus généraux. Le tableau 2.2 présente les différents regroupements de classes effectués afin de simplifier la modélisation hydrologique ultérieure et le calage du modèle HYDROTEL.

2. Intégration à la modélisation hydrologique

Tableau 2.2 Regroupements des classes de la classification Canadienne MODIS sur le Complexe La Grande.

Classe MODIS	Regroupement
Forêt de Conifères dense <i>Temperate or subpolar needle-leaved evergreen closed tree canopy (1)</i>	Forêt de Conifères
Forêt de Feuillus dense <i>Cold deciduous closed tree canopy (2)</i>	Forêt de Feuillus
Forêt mixte dense mature <i>Mixed needle-leaved evergreen – cold deciduous closed tree canopy (3)</i>	Forêt mixte
Forêt mixte dense <i>Mixed needle-leaved evergreen – cold deciduous closed young tree canopy (4)</i>	Forêt mixte
Forêt de Conifères moyenne avec friche <i>Temperate or subpolar needle-leaved evergreen medium density, moss-shrub understory (6)</i>	Forêt de Conifères
Forêt de Conifères moyenne avec lichen <i>Temperate or subpolar needle-leaved evergreen medium density, lichen-shrub understory (7)</i>	Forêt de Conifères
Forêt de Conifères ouverte avec friche <i>Temperate or subpolar needle-leaved evergreen low density, shrub-moss understory (8)</i>	Forêt de Conifères
Forêt de Conifères ouverte avec lichen <i>Temperate or subpolar needle-leaved evergreen low density, lichen (rock) understory (9)</i>	Forêt de Conifères
Forêt de Conifères ouverte mal drainée <i>Temperate or subpolar needle-leaved evergreen low density, poorly drained (10)</i>	Forêt de Conifères
Forêt de Feuillus moyenne <i>Cold deciduous broad-leaved, low to medium density (11)</i>	Forêt de Feuillus
Forêt de Feuillus moyenne en régénération <i>Cold deciduous broad-leaved, medium density, young regenerating (12)</i>	Forêt de Feuillus
Forêt mixte moyenne <i>Mixed needle-leaved evergreen – cold deciduous, low to medium density (13)</i>	Forêt mixte
Regénération mixte <i>Low regenerating young mixed cover (15)</i>	Forêt mixte
Végétation arbustive <i>High-low shrub dominated (16)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Pâturage ou couverture enherbée <i>Grassland (17)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Couverture mixte (arbustes, herbes et sol nus) <i>Herb-shrub-bare cover (18)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Milieus humides <i>Wetlands (19)</i>	Milieus humides
Milieus dégagés avec conifères, arbustes et herbe <i>Sparse needle-leaved evergreen, herb-shrub cover (20)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Pâturage en milieu polaire <i>Polar grassland, herb-shrub (21)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Végétation mixte (arbustes, herbage, lichen et sol nu) <i>Shrub-herb-lichen-bare (22)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Végétation mixte (arbustes, herbage) mal drainé <i>Herb-shrub poorly drained (23)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Végétation mixte (Lichen, arbustem, herbage et sol nu) <i>Lichen-shrub-herb-bare soil (24)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Sols nus avec faible végétation <i>Low vegetation cover (25)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Culture avec biomasse élevée <i>High biomass cropland (27)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen
Sol nus avec Lichen <i>Lichen barren (30)</i>	Milieus arbustifs herbes et lichen

Tableau 2.2 (Suite)

Milieus ouverts de type tourbières (bog) avec Lichen et Épinettes <i>Lichen-spruce bog (32)</i>	Milieus humides
Brulis <i>Recent burns (34)</i>	Brûlis
Brulis en régénération <i>Old burns (35)</i>	Brûlis
Eau <i>Water bodies (37)</i>	Eau
Eau et terre <i>Mixes of water and land (38)</i>	Eau

La figure 2.6 présente la classification résultante de l'occupation du sol sur le Complexe La Grande alors que le tableau 2.3 décrit les pourcentages occupés par chacune des classes sur chaque sous-bassin du complexe.

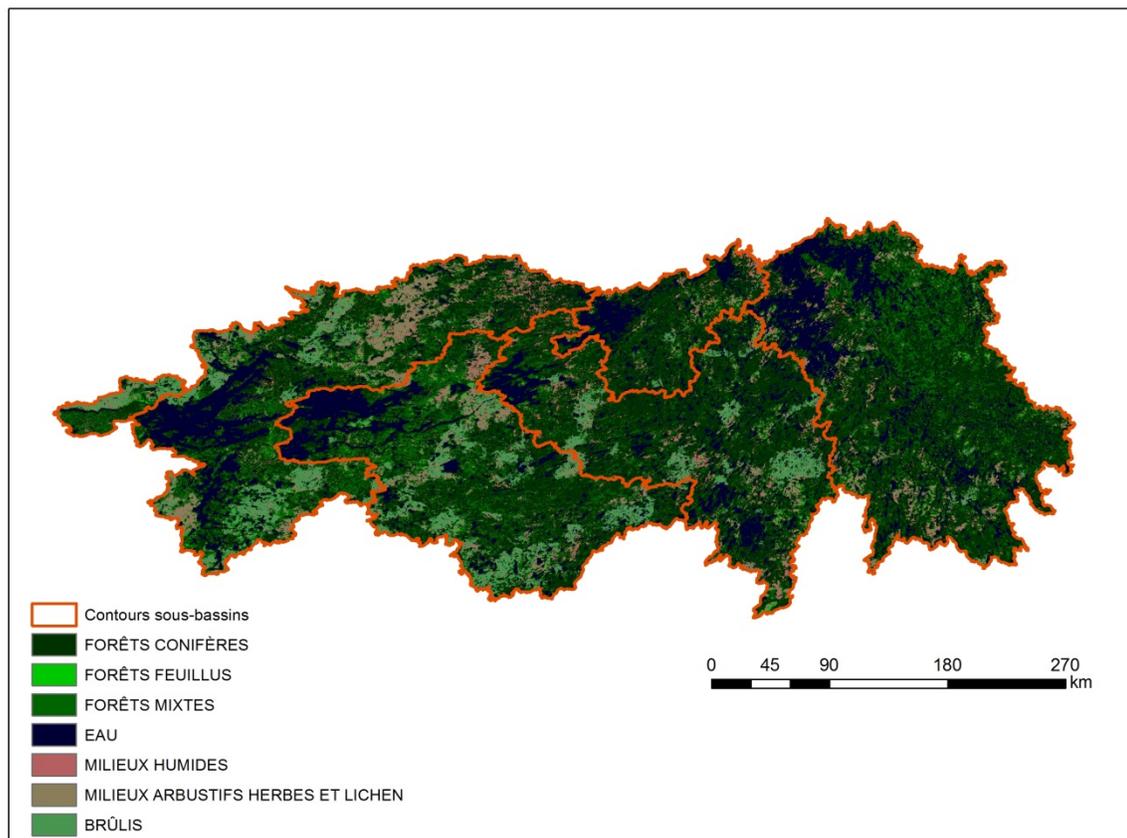


Figure 2.6 Carte d'occupation du sol sur l'ensemble du complexe La Grande.

2. Intégration à la modélisation hydrologique

Tableau 2.3 Pourcentage de couverture des classes d'occupation sur chaque sous-bassin du Complexe La Grande.

Classes d'occupation du sol	(%) de la superficie					
	LG 1	LG 2	LG 3	LG 4	LAF	CANIA
Forêts de Conifères	37.0%	42.2%	47.8%	59.0%	60.2%	56.2%
Forêts de Feuillus	1.1%	0.4%	0.4%	0.4%	0.3%	0.4%
Forêts Mixtes	17.6%	14.1%	14.0%	8.4%	6.7%	13.3%
Eau	6.3%	18.7%	16.9%	16.9%	23.9%	22.2%
Milieus humides	3.1%	3.1%	1.7%	3.2%	3.7%	2.6%
Milieus arbustifs herbes et lichen	8.5%	12.5%	8.7%	6.5%	4.2%	4.8%
Brûlis	26.4%	8.8%	10.4%	5.7%	0.8%	0.5%

Le tableau 2.3 démontre globalement la dominance des forêts de conifères, des étendues d'eaux et réservoirs, des forêts mixtes et brûlis (sous-bassin LG 1), et une présence moins forte des milieux arbustifs herbes et lichen et des milieux humides.

Par opposition à d'autres travaux, il semble que la classe milieux humides soit sous-représentée dans la classification générale MODIS. En effet de nombreux travaux tendent vers une occupation plus importante des milieux humides sur les secteurs nordiques (Letts *et al.*, 2000; Payette et Rochefort, 2001; Lafleur *et al.*, 2005). Par exemple, les travaux de Tarnocai *et al.*, 2000 proposent une valeur de 20% pour les milieux humides sur le bassin versant de la rivière La Grande. Des efforts ont été mis en place afin de palier à cette limitation : (i) les données du Ministère de l'énergie et des ressources naturelles portant sur l'identification des milieux humides ont été consultée - en raison de la couverture des données jugées trop fragmentaires, celles-ci n'ont pas été retenues à ce jour puisqu'une stratégie d'uniformisation sur l'ensemble du Complexe La Grande a été préconisée; (ii) les travaux du Dre Maria Dissanska (Dissanska *et al.* (2007)) sous la supervision du professeur Karem Chokmani visant la cartographie des milieux humides sur l'ensemble du Complexe La Grande pourraient être disponibles sous peu. Ainsi, la carte d'occupation du sol pourrait alors être mise à jour au besoin afin

de bénéficier d'une meilleure représentation des milieux humides sur l'ensemble du secteur.

Finalement, le SIG PHYSITEL nécessite l'intégration des types de sol pour chaque UHRH. Cette intégration sera présentée en détails à la section 3 du présent rapport en lien avec l'activité 2 (Caractériser les différents types de sols qui composent l'ensemble du Complexe La Grande et proposer pour chacun d'eux des paramètres appropriés).

Au besoin, l'intégration des sous-bassins au SIG PHYSITEL est complétée par l'ajout 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. De plus, PHYSITEL permet l'identification, le téléchargement automatique et la création des fichiers météorologiques pour les stations d'Environnement Canada. Bien qu'HYDRO-QUÉBEC n'utilise pas ces données météorologiques directement, elles demeurent un moyen simple, rapide et efficace de vérifier le bon fonctionnement du modèle HYDROTEL pour chaque sous-bassin du Complexe La Grande. Ultimement, PHYSITEL permet l'exportation et la création des fichiers d'entrée du modèle HYDROTEL.

2.2 Intégration des sous-bassins du Complexe La Grande au modèle HYDROTEL

L'un des objectifs découlant de cette étude vise notamment à permettre la modélisation hydrologique à l'aide du modèle HYDROTEL. Les apports simulés aux réservoirs des différents sous-bassins ciblés seront calés par l'équipe de prévision d'Hydro-Québec. Suite à l'application du SIG PHYSITEL, les sous-bassins du Complexe La Grande ont été intégrés au modèle HYDROTEL. Les calculs effectués par le modèle sont faits sur un ensemble d'éléments de calcul répartis à l'intérieur d'un bassin versant. Ainsi, l'approche distribuée permet de mieux prendre en compte la variabilité spatiale des

2. Intégration à la modélisation hydrologique

caractéristiques physiographiques du bassin à l'étude (topographie, occupation du sol, types de sol, etc.) et les systèmes météorologiques qui l'affectent. Sur le plan temporel, HYDROTEL est un modèle qui fonctionne en continu, par opposition à un modèle par événement. Enfin, les divers processus hydrologiques intervenant sur un bassin versant entre les chutes de pluie ou de neige et les débits en rivière sont considérés dans HYDROTEL par un regroupement de sous-modèles.

L'ensemble des fichiers d'entrée du modèle peuvent être générés à l'aide de PHYSITEL. En complément, HYDROTEL nécessite l'ajout de fichiers portant sur les données météorologiques et hydrométriques enregistrées aux stations associées au bassin versant ou autres données météorologiques compatibles (ex : données sur grille). À ces fichiers, s'ajoutent deux fichiers supplémentaires portant sur l'évolution annuelle de la profondeur racinaire et de l'indice foliaire des occupations du territoire.

Dans une perspective d'ensemble, sans aborder le détail des résultats, la figure 2.7 présente un schéma général du mode de fonctionnement du modèle hydrologique HYDROTEL.

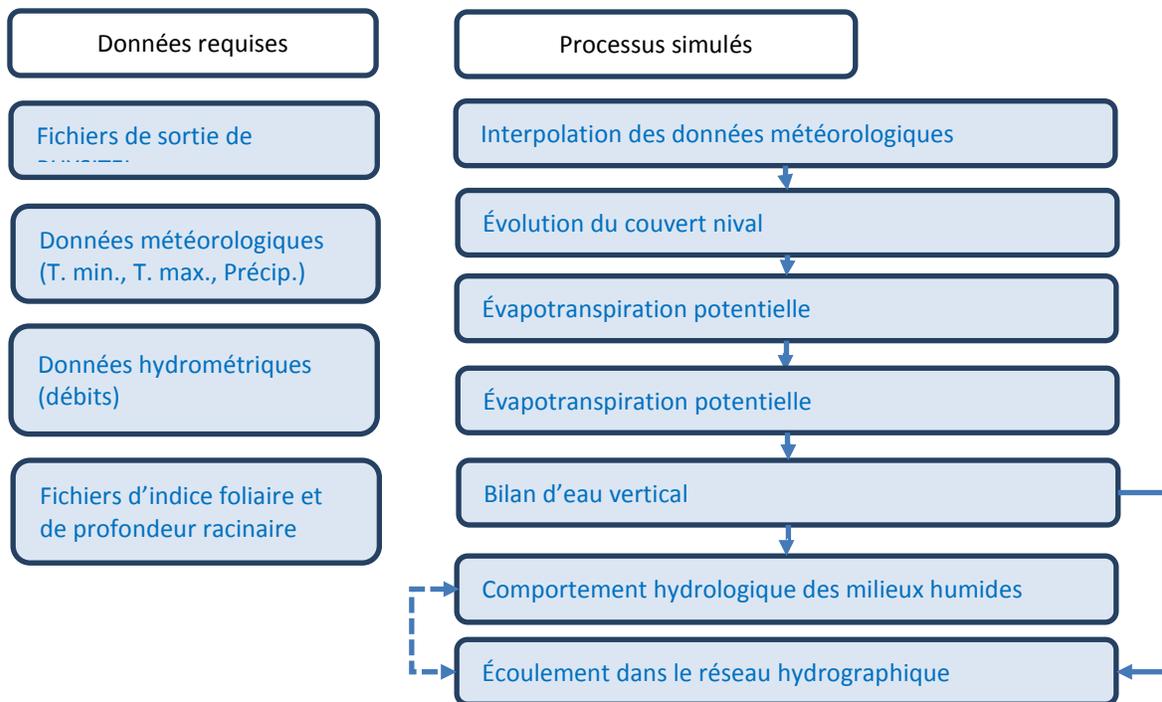


Figure 2.7 Schéma sommaire du modèle HYDROTEL.

En complément et à titre d'exemple, la figure 2.8 présente l'intégration du sous-bassin Caniapiscou au modèle HYDROTEL (version 2.6 32bits) alors que la figure 2.9 présente l'intégration du sous-bassin Caniapiscou au modèle HYDROTEL (version 2.8 64bits).

2. Intégration à la modélisation hydrologique

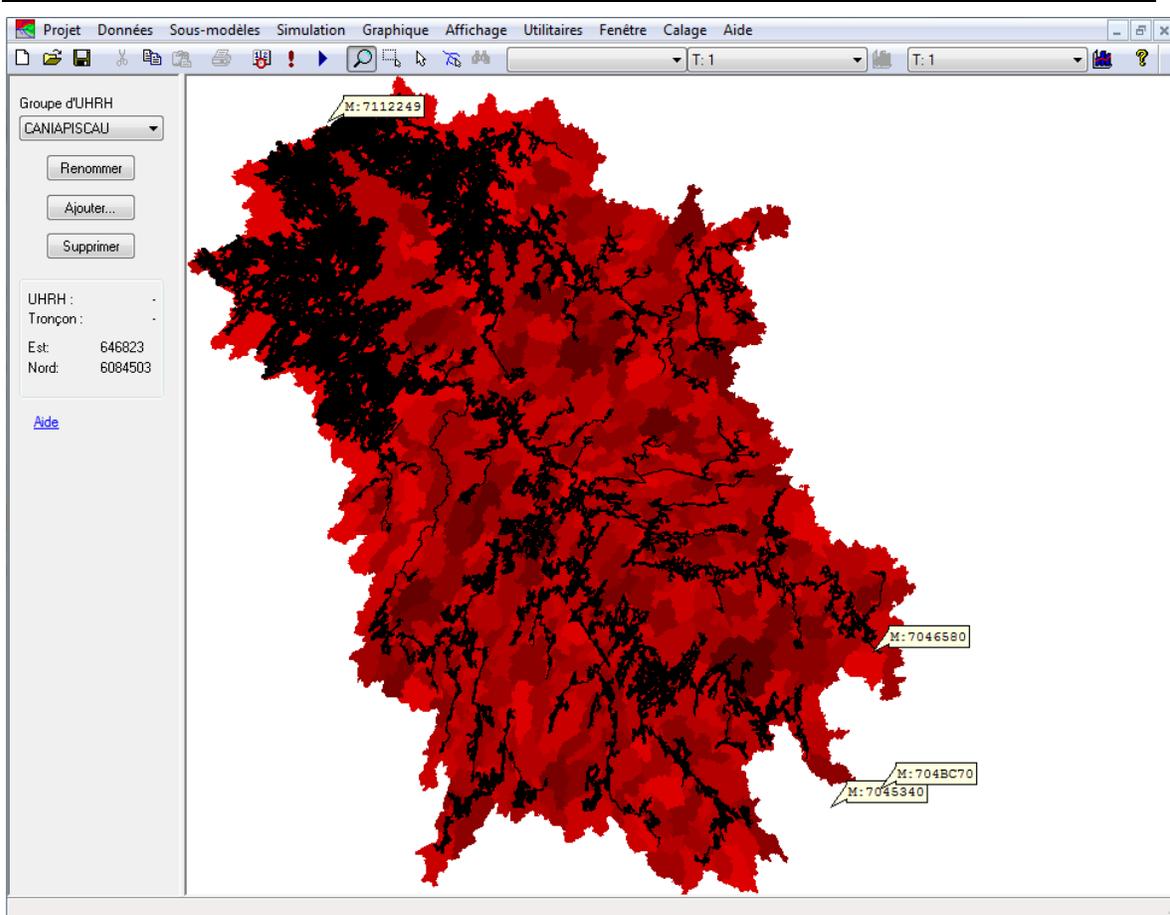


Figure 2.8 Intégration du sous-bassin Caniapiscau au modèle HYDROTEL (version 2.6 32bits).

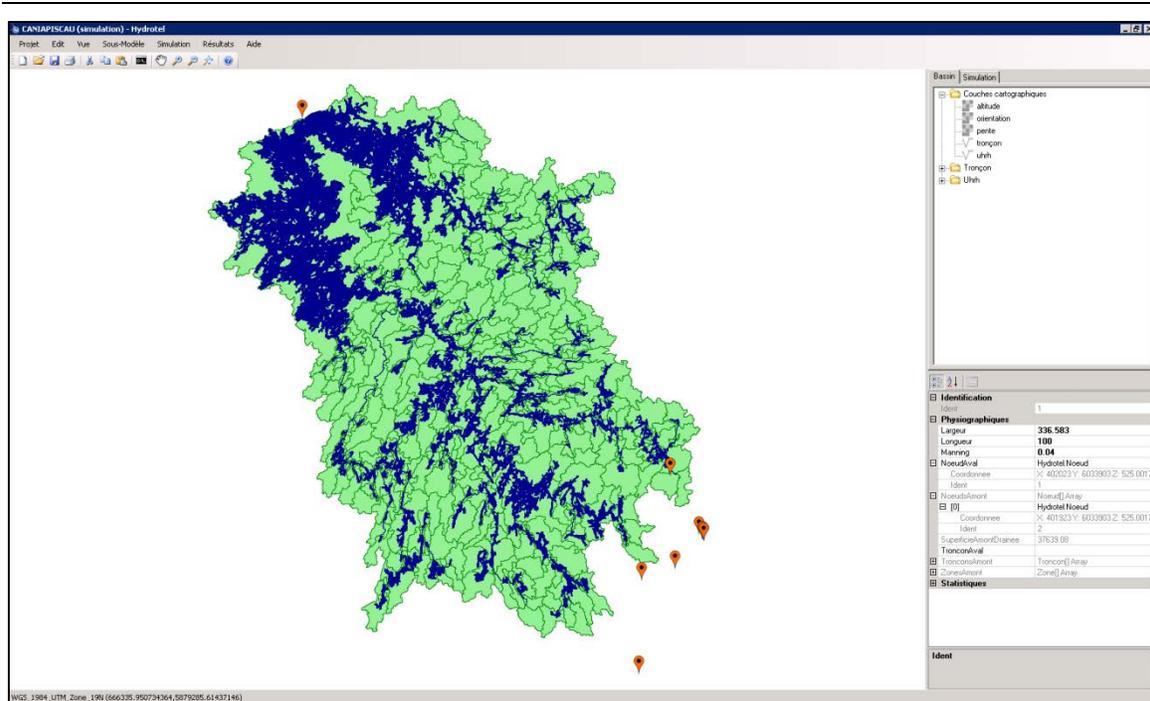


Figure 2.9 Intégration du sous-bassin Caniapiscau au modèle HYDROTEL (version 2.8 64bits).

À noter qu'à des fins de tests opérationnels, les données aux stations d'Environnement Canada disponibles ont été utilisées pour s'assurer du bon fonctionnement du modèle HYDROTEL sur chaque sous-bassin. Les données météorologiques aux stations ont été obtenues gratuitement en ligne, via l'interface de PHYSITEL, sur le site d'Environnement Canada (http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_f.html).

Les simulations hydrologiques à l'aide du modèle HYDROTEL sont basées sur une approche modulaire facilitant la modification des différents paramètres affectant les sous-modèles hydrologiques ou l'ajout de sous-modèles supplémentaires. Actuellement, HYDROTEL divise la simulation des processus hydrologiques en six sous-modèles avec en option un modèle de comportement des milieux humides. Pour chacun des processus hydrologiques, HYDROTEL offre le choix entre un ou plusieurs algorithmes (Tableau 2.4). La disponibilité de ces divers algorithmes permet de sélectionner le sous-modèle le plus performant possible sur un bassin versant, compte tenu de la disponibilité des données d'entrée. Les simulations hydrologiques peuvent être

2. Intégration à la modélisation hydrologique

exécutées à la fois sur un pas de temps journalier ou un pas de temps sous-multiple de 24 heures et ce, en fonction du bassin versant à l'étude, des objectifs de simulations et des données disponibles. À noter que les tests de vérification du bon fonctionnement d'HYDROTEL ont été menés à un pas de temps journalier pour l'ensemble des sous-bassins. Au tableau 2.4, les algorithmes de simulation des processus hydrologiques mis en évidence (caractères en gras) sont ceux utilisés lors des simulations hydrologiques tests.

Tableau 2.4 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 trois 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
	6.2 Onde diffusante

Il peut être pertinent de faire le lien entre les processus hydrologiques, les UHRH / Versants et les tronçons du réseau hydrographique. Les quatre premiers processus sont simulés au niveau de chaque UHRH / Versant; en d'autres termes, la distribution spatiale de ces processus à l'intérieur d'un bassin versant est réalisée au niveau de

chaque UHRH / Versant. Il en est de même pour les flux entre ces processus. L'écoulement sur la partie terrestre du bassin est simulé par la production initiale d'un hydrogramme géomorphologique spécifique à chaque UHRH / Versant et généré par l'écoulement de pixel en pixel d'une lame d'eau de référence. Les flux entre les algorithmes qui simulent les cinq premiers processus hydrologiques sont réalisés au niveau des UHRH / Versant. 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 / Versant, 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. 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 / Versant connexes.

À l'aide du modèle HYDROTEL, il est possible d'attribuer des valeurs individuelles pour certaines variables physiographiques ou météorologiques à chaque UHRH / Versant. Par contre, cette manœuvre est très coûteuse en temps et requiert une connaissance très détaillée d'informations sur le bassin versant, rarement discrétisées à ce niveau. En ce sens, il demeure acceptable de fournir des valeurs identiques à ces variables à une plus grande échelle. Il est donc possible de former des groupes d'UHRH / Versant en fonction de la localisation des stations hydrométriques et de la connaissance de l'occupation du sol et du type de sol d'un sous-bassin. Il est alors envisageable de fournir les valeurs de certaines variables physiographiques et météorologiques spécifiques pour chacun des groupes d'UHRH / Versants créés. Dans le contexte actuel, aucun regroupement d'UHRH / Versants n'a été réalisé afin d'accélérer le processus de calage hydrologique des différents sous-modèles. Par conséquent, les paramètres de calage associés demeurent identiques sur l'ensemble d'un sous-bassin du Complexe La Grande

Par ailleurs, il est important de mentionner que l'accès à des données météorologiques de bonne résolution spatiale (données sur grille) ou d'une base de données de

2. Intégration à la modélisation hydrologique

réanalyses, sans oublier les apports journaliers reconstitués par Hydro-Québec, auront un impact majeur sur l'exercice de calage et les simulations hydrologiques ultérieurs.

3 Caractérisation des types de sol sur le Complexe La Grande

Tel que mentionné, l'intégration d'un bassin versant à la modélisation hydrologique à l'aide du modèle HYDROTEL nécessite la caractérisation des types de sols sur l'ensemble du bassin. Traditionnellement, cette intégration s'effectue selon les étapes suivantes :

- 1) obtention d'une carte (ex : Pédo-Paysages Canadien) décrivant les types de sols selon un code de texture unique;
- 2) table de correspondance entre les codes de texture et les caractéristiques ou propriétés physiques des sols notamment les pourcentages de sable, limon, argile;
- 3) selon le positionnement de ces pourcentages dans le triangle des textures, détermination du type de sol correspondant à des fins de modélisation hydrologique; et
- 4) correspondance des types de sols avec les propriétés hydrodynamiques des types de sol déjà implantés dans le modèle hydrologique HYDROTEL.

À noter que dans la version actuelle du modèle HYDROTEL, les propriétés hydrodynamiques des types de sol sont considérées constantes sur les différents horizons verticaux des sols. En l'absence de mesures terrains, des valeurs par défaut, basées sur les travaux de Rawls et Brakensiek (1989), sont disponibles et peuvent être attribuées aux types de sols selon les textures de ces derniers. Par contre, l'utilisateur peut aussi attribuer des valeurs plus appropriées en présence de données mesurées.

Dans un premier temps, nous avons tenté de créer une carte des types de sols selon les étapes classiques mentionnées. Cependant, nous avons constaté des discontinuités et un manque d'informations dans la description des textures rattachées aux types de sols sur le secteur du Complexe La Grande. Nous avons également tenté de créer une carte des types de sols à partir des cartes des dépôts de surface du Cadre Écologique de Référence du ministère du Développement Durable de l'Environnement et de la Lutte

aux Changements Climatiques (MDDELCC) ou encore à partir des cartes de dépôts de surface du ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles. Cependant, ces tentatives ont été infructueuses en raison de la couverture insuffisante des données et du manque d'informations sur les propriétés des types de sols pouvant être rattachés aux dépôts de surface. Des recherches ont donc été entreprises auprès de diverses instances et de collaborateurs de notre équipe, notamment Ouranos et Environnement Canada. Certaines données se sont avérées pertinentes dans la création de cartes de types de sols pour chaque sous-bassin. Plus spécifiquement, des collaborateurs d'Environnement Canada nous ont transféré des cartes de pourcentages de sable et argile pour trois horizons de sols distincts. Ces cartes résultent des travaux de Szeto *et al.* (2008) qui reposent également sur les données de pédo-paysages canadiens (Soil Landscape of Canada V.2.2). Ce sont ces mêmes données qui ont été utilisées par nos collègues chez Ouranos dans le cadre de l'application du modèle régional canadien du climat où le modèle de surface CLASS (Canadian Land Surface Scheme) requiert de l'information sur les propriétés hydrodynamiques des sols du milieu boréal québécois. Ces cartes, avec une résolution horizontale de 1 km, représentent donc les données d'entrée de la création d'une carte des types de sols pour chaque sous-bassin du Complexe La Grande. Il est important de noter que ces cartes comportent des données à caractère non-minéral telles que les types, Eau, Rocs, Sols Organiques. Pour ces types, aucune texture de sol ne peut être directement attribuée. La création des cartes des types de sol découlent des étapes suivantes :

- 1) Détermination pour chaque tuile de 1 km de résolution et pour chaque horizon de sol (0-10cm; 10-25cm; 25-375cm) du type de sol correspondant aux pourcentages de sable et argile (et par le fait même de limon) selon le triangle des textures. La figure 3.1 présente le triangle des textures utilisé pour la détermination des types de sol.

3. Caractérisation des types de sols sur le Complexe La Grande

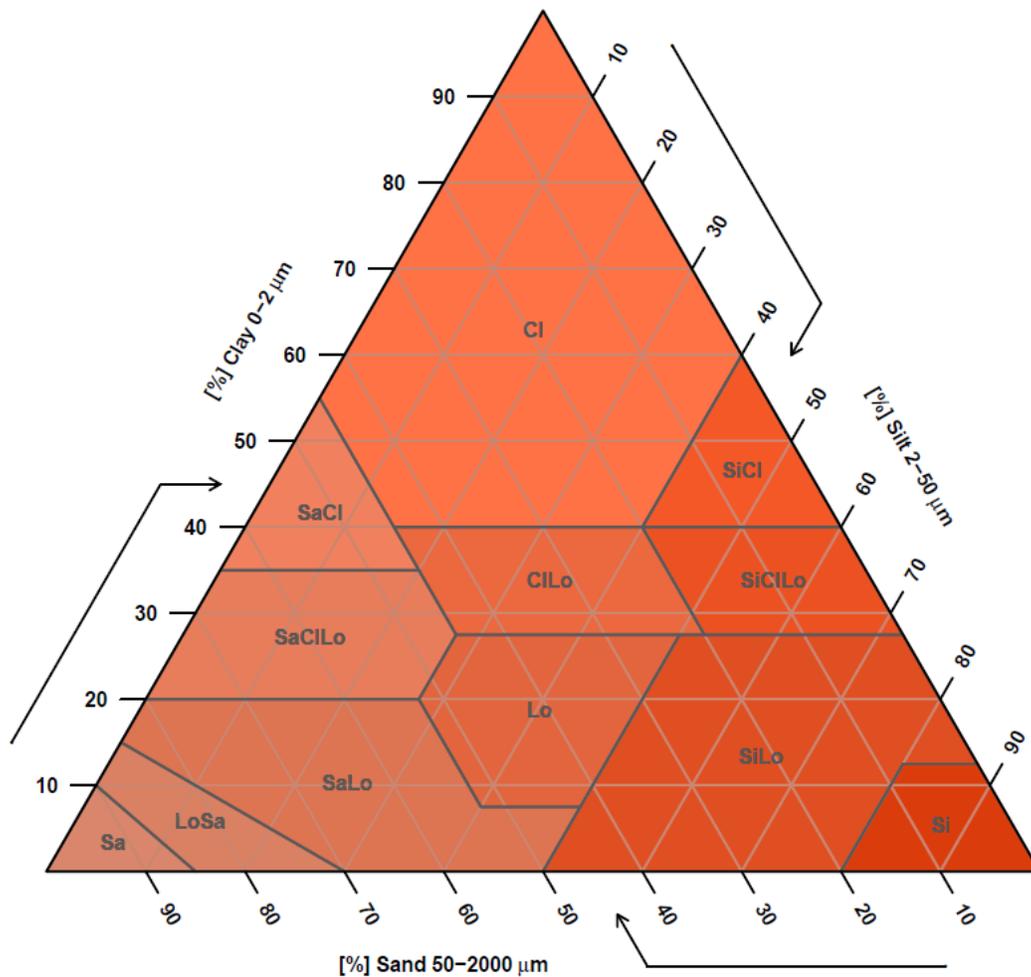


Figure 3.1 Triangle des textures de sol extrait de Moeys (2014).

Les abréviations utilisées dans le triangle des textures sont : Cl : argile, SiCl : argile-limoneuse, SaCl : argile-sableuse, SiClLo : loam limono-argileux, ClLo : loam argileux, SaClLo : loam sablo-argileux, SiLo : loam limoneux, Lo : loam, SaLo : loam sableux, Si : limon, LoSa : sable loameux, Sa : sable.

- 2) Création d'une carte des types de sols basée sur la deuxième couche de sol (10-25cm). Bien que le modèle hydrologique HYDROTEL permette d'utiliser des types de sols différents pour chaque couche de sols du sous-modèle BV3, il a été jugé plus simple dans un premier temps de créer une carte unique valide pour ces trois couches basées sur les types de sols de la deuxième couche des données

transmises. Cependant, en présence de types non-minéraux (Eau, Rocs et Sols Organiques), les couches 1 et 3 ont été utilisées afin de substituer les types non-minéraux pour des types de sols à caractères minéraux si présents dans les couches 1 et 3. Cette opération vise à minimiser l'incertitude sur les propriétés des sols à caractères non-minéraux pour lesquels très peu de données sont disponibles. Néanmoins, la carte résultante des types de sols sur le Complexe La Grande présente tout de même des types de sols non-minéraux pour lesquels il sera nécessaire d'attribuer des propriétés hydrodynamiques. Les tuiles de 1 km ont par la suite été subdivisées en tuiles de 100 m afin de les superposer au MNA. La figure 3.2 présente la carte des types de sols sur le Complexe La Grande.

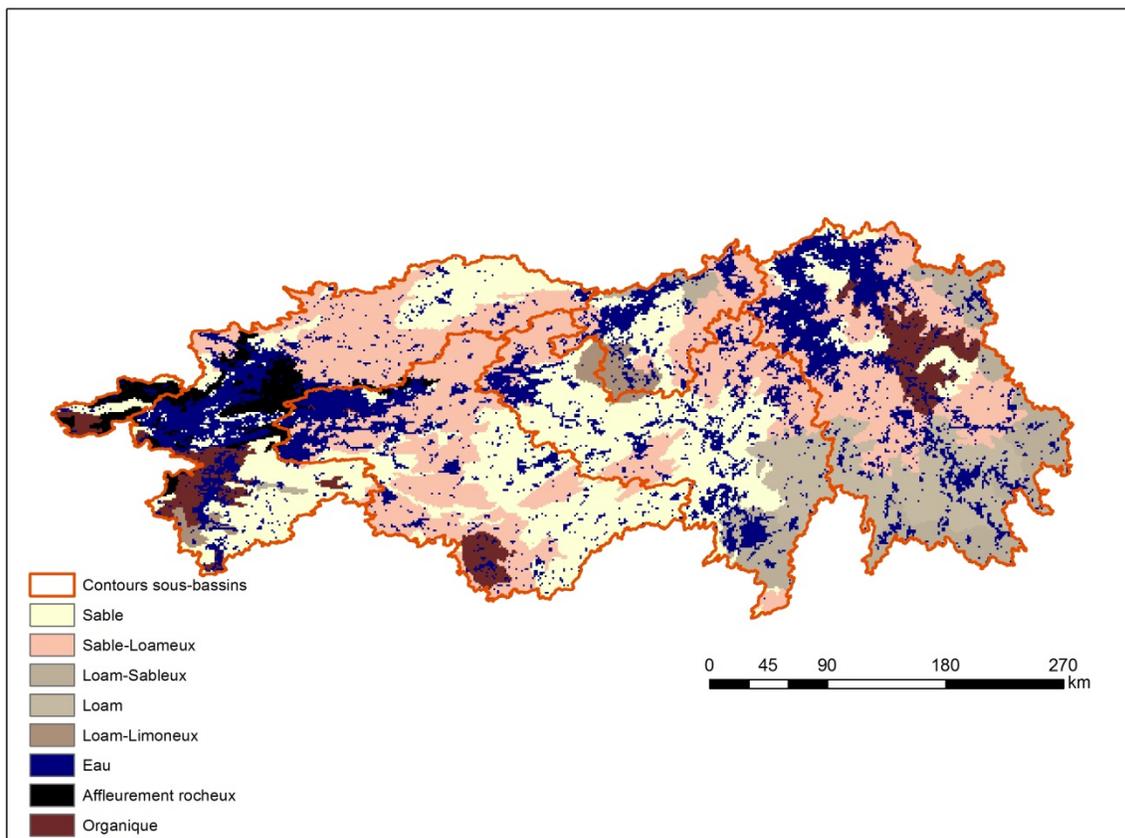


Figure 3.2 Carte des types de sols sur l'ensemble du Complexe La Grande.

Tel que mentionné, les textures minérales peuvent être directement associées aux classes de types de sols présents dans la table de Rawls et Brakensiek (1989) déjà

3. Caractérisation des types de sols sur le Complexe La Grande

intégrées dans le SIG PHYSITEL alors que les textures non-minérales peuvent être ajoutées à la suite des autres textures existantes. PHYSITEL procède à la détermination des types de sols dominant pour chaque UHRH / Versant constituant chaque sous-bassin. À l'aide d'une table de correspondance qui décrit les propriétés hydrodynamiques de chaque type de sols, HYDROTEL est en mesure de déterminer les propriétés hydrodynamiques des sols pour chacun des UHRH / Versants. Ainsi, les propriétés hydrodynamiques attribuées aux différents types de sols sont appliquées aux UHRH / Versants en fonction du sol dominant observé sur chacune d'elles. Pour les sols minéraux, les propriétés hydrodynamiques correspondent à des valeurs par défaut, basées sur les travaux de Rawls et Brakensiek (1989), qui sont spécifiques aux différentes textures présentes dans le triangle des textures. Pour les types de sols non-minéraux, des propriétés hydrodynamiques doivent être déterminées.

Lors des travaux de Jutras *et al.* (2009), Il a été jugé convenable d'attribuer les propriétés hydrodynamiques de la classe Argile aux classes Eau et Rocs. Par contre l'utilisateur pourra changer ces propriétés s'il le désire en éditant le fichier *proprietehydrolique.sol* qui se rattache à chaque projet d'implantation d'un bassin dans le modèle hydrologique HYDROTEL. La caractérisation des sols organiques découle cependant de diverses études antérieures pertinentes. Tel que le proposent les travaux de Jutras *et al.* (2009) sur le secteur du bassin versant de la rivière Nécopastic, des valeurs des propriétés hydrodynamiques des sols organiques peuvent être reprises des travaux de Letts *et al.* (2000). En ce sens, ces travaux proposent des valeurs de propriétés hydrodynamiques pour les sols organiques des tourbières dans le modèle CLASS. Les travaux de Levrel *et al.* (2009,) Carrer (2014), Carrer *et al.* (2014) ont aussi contribué à la détermination de propriétés hydrodynamiques des sols sur les secteurs Nécopastic et de l'Abeille (La Forge 1). Les propriétés hydrodynamiques découlant de ces travaux ont donc été ajoutées aux propriétés relatives aux sols minéraux et aux autres classes existantes. Afin de faciliter l'usage de ces nouvelles valeurs, par exemple lors du calage du modèle, une classe de texture générale « organiques » a été ajoutée aux classes existantes et les valeurs de propriétés hydrodynamiques des sols attribuées

à cette classe sont celles déterminées pour le secteur Nécopastic découlant des travaux de Jutras *et al.* (2009) et Levrel *et al.* (2009). Aussi en bas de liste, des classes non-utilisées ont été ajoutés afin de rendre d'autres propriétés hydrodynamiques des sols organiques disponibles lors du calage. Le tableau 3.1 résume les propriétés hydrodynamiques des types de sols sur le Complexe La Grande.

Tableau 3.1 Résumé des propriétés hydrodynamiques des types de sols sur le Complexe La Grande.

Texture	θ_s	θ_{cc}	θ_{pf}	K_s	Ψ_s	λ	α
Sable	0.417	0.091	0.033	0.2100	0.1598	0.694	10.0
Sable-Loameux	0.401	0.125	0.055	0.0611	0.2058	0.553	6.0
Loam-Sableux	0.412	0.207	0.095	0.0259	0.3020	0.378	4.5
Loam	0.434	0.27	0.117	0.0132	0.4012	0.252	3.5
Loam-Limoneux	0.486	0.33	0.133	0.0068	0.5087	0.234	3.0
Limon	0.486	0.33	0.133	0.0068	0.5087	0.234	3.0
Loam-Sableux-Argileux	0.33	0.255	0.148	0.0043	0.5941	0.319	3.5
Loam-Argileux	0.39	0.318	0.197	0.0023	0.5643	0.242	2.0
Loam-Limoneux-Argileux	0.432	0.366	0.208	0.0015	0.7033	0.177	1.5
Argile-Sableux	0.321	0.339	0.239	0.0012	0.7948	0.223	1.0
Argile-Limoneux	0.423	0.387	0.25	0.0009	0.7654	0.150	0.8
Argile	0.385	0.396	0.272	0.0006	0.8560	0.165	0.5
Eau	0.385	0.396	0.272	0.0006	0.8560	0.165	0.5
Rocs	0.385	0.396	0.272	0.0006	0.8560	0.165	0.5
Organique	0.880	0.450	0.150	0.5000	0.0102	0.250	5.0
Organique (Fibric)	0.930	0.275	0.050	1.0080	0.0103	0.370	6.0
Organique (Hemic)	0.880	0.620	0.150	0.0072	0.0102	0.164	3.0
Organique (Sapric)	0.830	0.705	0.250	0.0004	0.0101	0.083	0.5
Organique (Neco)	0.880	0.450	0.150	0.5000	0.0102	0.250	5.0

3. Caractérisation des types de sols sur le Complexe La Grande

Dans le tableau 3.1 les symboles en tête sont : θ_s : teneur en eau à saturation (cm^3/cm^3); θ_{cc} : teneur en eau à la capacité au champ (cm^3/cm^3); θ_{pf} : teneur en eau au point de flétrissement (cm^3/cm^3); K_s : conductivité hydraulique à saturation (m/s); Ψ_s : potentiel matriciel à saturation (m); λ : distribution des dimensions des pores; et a : coefficient de l'exposant dans le calcul du coefficient d'assèchement. Tel que mentionné, l'utilisateur peut au besoin changer les valeurs de ces paramètres via le fichier *proprietehydrolique.sol* qui se rattache à chaque projet d'implantation d'un bassin ou sous-bassin dans le modèle hydrologique HYDROTEL. Ce fichier se retrouve à la fois pour les projets relatifs aux versions HYDROTEL 2.6 (32bits) et HYDROTEL 2.8 (64bits).

En complément, conséquemment à la sous-estimation des milieux humides (ex : Tourbière) dans la cartographie de l'occupation du sol, il se peut que les sols de type organique soient également sous représentés. Dans le futur, s'il s'avère qu'une meilleure identification spatiale des milieux humides soit disponible, il pourrait être pertinent de modifier la carte des types de sols en appliquant la classe « sols organiques » aux emplacements des milieux humides identifiés sur la carte d'occupation du sol mise à jour.

4 Modèle de températures et de gel du sol

Jusqu'à présent, il n'existait aucune application d'HYDROTEL visant à analyser l'influence des conditions climatiques sur le sol (gel et dégel) sur les régimes d'écoulement. Une telle analyse découle forcément de la capacité du modèle HYDROTEL à représenter les températures du sol de sa surface jusqu'à une profondeur donnée en présence ou non d'un couvert de neige. La forme actuelle d'HYDROTEL ne permet pas cette représentation et la température du sol n'a aucune influence sur l'infiltration de l'eau dans le sol et sur les écoulements latéraux. Ainsi, des modifications doivent être apportées afin de permettre la création d'un profil de température du sol et d'estimer par la suite la profondeur du gel. Cette section décrit la mise en place d'un premier modèle de température du sol qui permet de déterminer la profondeur du gel. Son implantation dans le modèle HYDROTEL implique également une interaction avec l'infiltration de l'eau dans le sol.

4.1 Description du modèle

Il est important de noter que le modèle implanté demeure un modèle très simple qui pourra au besoin être raffiné. Également, les données de validation (températures du sol, profondeurs de gel) demeurent très limitées sur le secteur du Complexe La Grande. Le modèle d'estimation des températures du sol implanté dans HYDROTEL repose essentiellement sur les travaux de Rankinen *et al.* (2004.) Ses travaux aux termes de simplifications permettent de calculer la température du sol à différentes profondeurs avec ou sans la présence d'un couvert de neige à l'aide de deux (2) équations simples :

$$T_*^{t+1} = T_Z^t + \frac{\Delta t K_T}{C_A (2Z)^2} [T_{AIR}^t - T_Z^t] \quad (\text{Éq. 1})$$

$$T_Z^{t+1} = T_*^{t+1} e^{-f_s D_s} \quad (\text{Éq. 2})$$

où :

T_*^{t+1} : La température du sol (°C) au temps t+1 à la profondeur Z(m) sans prise en compte de l'épaisseur du couvert de neige D_s (m);

T_Z^{t+1} : La température du sol (°C) au temps t+1 à la profondeur Z(m) avec prise en compte de l'épaisseur du couvert de neige D_s (m);

T_Z^t : La température du sol (°C) au temps t à la profondeur Z(m) avec prise en compte de l'épaisseur du couvert de neige D_s (m);

Δt : Le pas de temps ou la variation temporelle (1 jour);

K_t : Conductivité thermique du sol ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$);

C_A : Capacité de chaleur apparente ($\text{J m}^{-3} \text{°C}^{-1}$), $C_A \approx C_S + C_{ICE}$ ou C_S représente la capacité thermique spécifique du sol ($\text{J m}^{-3} \text{°C}^{-1}$) et C_{ICE} représente la capacité thermique spécifique associée au gel / dégel ($\text{J m}^{-3} \text{°C}^{-1}$) (ce paramètre vise à prendre compte l'énergie relâchée par le gel de l'eau ou consommée lors du dégel du sol);

Z : La profondeur dans le sol (m) à laquelle la température est estimée par le modèle;

T_{AIR}^t : température de l'air (°C) au temps (t);

f_s : paramètre empirique (m-1);

D_s : épaisseur du couvert de neige (m).

La présente section ne vise pas à reprendre la démonstration de ces équations. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer aux travaux de Rankinen *et al.* (2004.)

Ce sont ces mêmes équations qui seront implantées dans le modèle HYDROTEL sous la forme d'un modèle de températures du sol et d'estimation de la profondeur du gel. Ces équations comportent quatre paramètres différents qui peuvent être modifiés. Rankinen *et al.* (2004) propose diverses fourchettes de valeurs relatives à ces paramètres. Dans l'application courante sur le secteur du Complexe La Grande, nous avons procédé à une optimisation des paramètres du modèle à l'aide de mesures de

4. Modèle de températures et de gel du sol

températures du sol à 10 cm sous la surface effectuée à une station météorologique complète de l'IREQ située sur le secteur de la rivière Nécopastic. Ce même site comporte également des mesures de températures de l'air et de hauteur de neige. Des moyennes journalières ont été calculées à partir des mesures de bases qui sont effectuées à un pas de temps de 15 min. Nous disposons à ce jour des mesures pour la période de 2006 à 2011. En cas de mesures manquantes, celles effectuées à l'Aéroport de LG2 ont été utilisées, soient la température de l'air et l'épaisseur du couvert de neige. Le calage du modèle a été fait automatiquement en explorant l'ensemble des possibilités de combinaison des paramètres à l'intérieur des limites des valeurs proposées. La fonction objectif du calage visait à maximiser le coefficient de détermination R^2 calculé selon l'équation suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{S_E}{S_M} ; S_M = \sum_{i=1}^N (D_{m,i} - D_{moy})^2 ; S_E = \sum_{i=1}^N (D_{m,i} - D_{c,i})^2 \quad (\text{Éq. 3})$$

où : $D_{m,i}$: données mesurées (Températures (°C)); $D_{c,i}$: données calculées par le modèle (Températures (Températures (°C))); et D_{moy} : moyenne des données calculées pendant la période de calage (Températures (Températures (°C))).

En complément, l'optimisation mise en place est de type ciblée, c'est-à-dire qu'elle vise une période précise de l'année soit la période hivernale. En ce sens, nos efforts ont visé la bonne représentation des températures mesurées à 10 cm sous la surface en présence d'un couvert de neige, soit la période froide de l'année où il y a risque de gel ou dégel du sol.

Le tableau 4.1 présente les valeurs de paramètres proposés par Rankinen *et al.* (2004) ainsi que les valeurs résultantes du calage à la station de l'IREQ.

Tableau 4.1 Valeurs de référence de calages des paramètres du modèle de température.

Paramètres	Valeurs références Rankinen et al. 2004	Résultats du calage Sation IREQ (Nécopastic)
K_T	0.4 – 0.8 W m ⁻¹ °C ⁻¹	0.8 W m ⁻¹ °C ⁻¹
C_S	1.0E06 – 1.3E06 J m ⁻³ °C ⁻¹	1.0E06 J m ⁻³ °C ⁻¹
C_{ICE}	4.0E06 – 15.0E06 J m ⁻³ °C ⁻¹	4.0E06 J m ⁻³ °C ⁻¹
f_s	2 - 8	2.35

La figure 4.1 présente les résultats du modèle de température dans la représentation des mesures de température à une profondeur de 10 cm, à la station de l'IREQ sur le secteur Nécopastic.

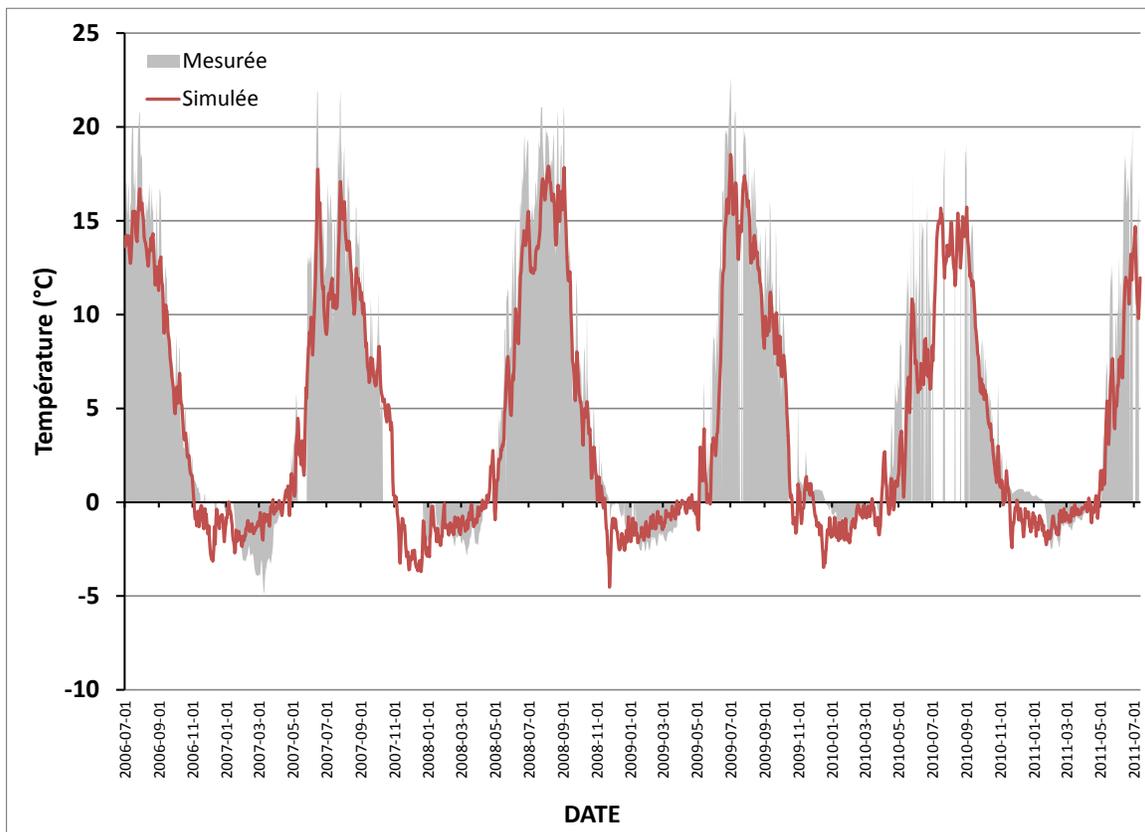


Figure 4.1 Valeurs de températures simulées par le modèle de température comparées aux valeurs mesurées à 10 cm sous la surface.

4. Modèle de températures et de gel du sol

Tel que le démontre la figure 4.1, le modèle représente assez bien l'ensemble des températures mesurées (R^2 0.89 selon l'équation 3) et les cycles saisonniers sous la surface. Néanmoins, le modèle semble moins efficace dans la représentation des températures hivernales notamment lors des périodes de transitions ou encore tout au long de l'hiver et ce, malgré le meilleur calage ou la meilleure optimisation disponible. Ces limites du modèle peuvent être liées d'une part aux données manquantes de températures et de hauteurs de neige, ou encore au caractère trop simpliste du modèle. Conséquemment aux résultats, à la durée du projet et la disponibilité de mesures terrain, il demeure très acceptable d'implanter ce modèle de température dans le modèle hydrologique HYDROTEL.

4.2 Implantation dans le modèle HYDROTEL

Cette section porte essentiellement sur les étapes générales d'implantation du modèle de températures du sol dans le modèle hydrologique HYDROTEL.

Dans une perspective d'ensemble, HYDROTEL procède au calcul d'un profil de température de la surface du sol jusqu'à limite inférieure du profil de sol du modèle BV3C (limite inférieure de la couche 3). À noter que le modèle BV3C comporte trois couches de sols superposées ayant des épaisseurs variables selon les limites inférieures de chaque couche inscrites par l'utilisateur (pour plus de détails sur le modèle BV3C se référer à la théorie du modèle HYDROTEL). Par la suite, HYDROTEL calcule la profondeur de gel. Enfin, selon la profondeur du gel et l'épaisseur du couvert de neige, HYDROTEL limitera les écoulements entre les couches de sols et aussi vers le réseau hydrographique.

Dans un premier temps, un fichier générique a été ajouté à la structure de projet existante d'HYDROTEL. Ce fichier, comporte les éléments nécessaires au bon fonctionnement du modèle de températures du sol soit :

- (i) La température à la limite inférieure du profil de température. Cette valeur agit à titre de valeur initiale de température à la limite inférieure du profil de température.
- (ii) Intervalle d'estimation des températures soit la résolution verticale du profil. Cette valeur établit quelle sont les profondeurs auxquelles une valeur de température est calculée.
- (iii) Une valeur seuil de température déterminant le gel ou non du sol. De nombreux tests menés sur les résultats des températures dans le sol suggèrent d'utiliser une valeur de -0.5°C comme valeur seuil. C'est-à-dire que le sol n'est pas considéré comme gelé si la température est supérieure à -0.5°C .
- (iv) Une valeur pour chacun des paramètres (K_T, C_S, C_{ICE}, f_s) du modèle pour chaque type de sols du modèle intégré à PHYSITEL / HYDROTEL. À ce jour, les paramètres du modèle de températures du sol sont identiques pour les différents types de sols et ce, en raison du calage unique existant et de l'absence de mesures pour différentes textures du sol. Au besoin, l'utilisateur sera en mesure de modifier les valeurs de ces paramètres.

La figure 4.2 présente une saisie d'écran d'un exemple de fichier générique du modèle de températures ajouté à la structure de projet implanté dans la version HYDROTEL 2.8 (64 bits). Ce fichier (*rankinen.csv*) est rattaché à chacun des projets d'intégration au modèle HYDROTEL 2.8 (64 bits). En complément, afin de prendre en compte le modèle de températures et du gel du sol, l'utilisateur doit inscrire simplement le nom du modèle « RANKINEN » dans le fichier de simulation de type « .csv » portant le nom de la simulation donnée rattachée au projet (ex : *simulation.csv*). À noter qu'il peut y avoir plus d'une simulation par projet.

4. Modèle de températures et de gel du sol

```
PARAMETRES HYDROTEL VERSION;2.8.2.0000
SOUS MODELE;RANKINEN
OUTPUT_TEMPERATURE_LIST_UHRH;1
INTERVALLE PROFIL (m);0.05
TEMP INI BASE PROFIL (C);4
SEUIL GEL;-0.5
FS;2.35

TEXTURE SOL;KT (W/m/C);CS (J/m3/C);CIce (J/m3/C)
sand;0.8;1000000;4000000
loamy_sand;0.8;1000000;4000000
sandy_loam;0.8;1000000;4000000
loam;0.8;1000000;4000000
silt_loam;0.8;1000000;4000000
silt; 0.8;1000000;4000000
sandy_clay_loam;0.8;1000000;4000000
clay_loam;0.8;1000000;4000000
silty_clay_loam;0.8;1000000;4000000
sandy_clay;0.8;1000000;4000000
silty_clay;0.8;1000000;4000000
clay;0.8;1000000;4000000
water;0.8;1000000;4000000
rocks;0.8;1000000;4000000
organic ;0.8;1000000;4000000
peat_(Fibric);0.8;1000000;4000000
peat_(Hemic);0.8;1000000;4000000
peat_(Sapric);0.8;1000000;4000000
peat_(Neco);0.8;1000000;4000000
```

Figure 4.2 Fichier générique du modèle de températures et de gel du sol.

Suite à la lecture de ce fichier, HYDROTEL établit un profil de températures initiales qui sera mis à jour à chaque pas de temps de simulation. Cette mise à jour est effectuée après le modèle d'évolution du couvert de neige en raison de l'impact de l'épaisseur du couvert sur la température du sol. À noter que normalement, l'évolution du couvert de neige diffère d'un milieu à un autre en fonction des paramètres qui leurs sont attribués. Néanmoins, à la mise à jour du profil de températures, HYDROTEL détermine la profondeur moyenne du gel dans le sol sur l'ensemble d'une UHRH / Versant en fonction de l'épaisseur moyenne du couvert de neige. Cette épaisseur moyenne résulte de la moyenne pondérée de l'épaisseur simulée pour chaque milieu (ex : Conifères, Feuillus, Ouvert). Recourir à une profondeur moyenne de gel sur l'UHRH / Versant s'accorde avec modèle de bilan d'eau vertical (BV3C) qui ne prend pas en compte les différents milieux du modèle précédent. Dans le cas du Complexe La Grande la

profondeur du gel s'approchera grandement de celle du milieu comportant la classe conifère en raison de leur importance sur les sous-bassins.

La présence et la profondeur du gel du sol auront par la suite un impact direct sur le bilan d'eau vertical simulé par le modèle BV3C. La figure 4.3 permet d'illustrer l'impact potentiel direct du gel du sol sur le modèle BV3C.

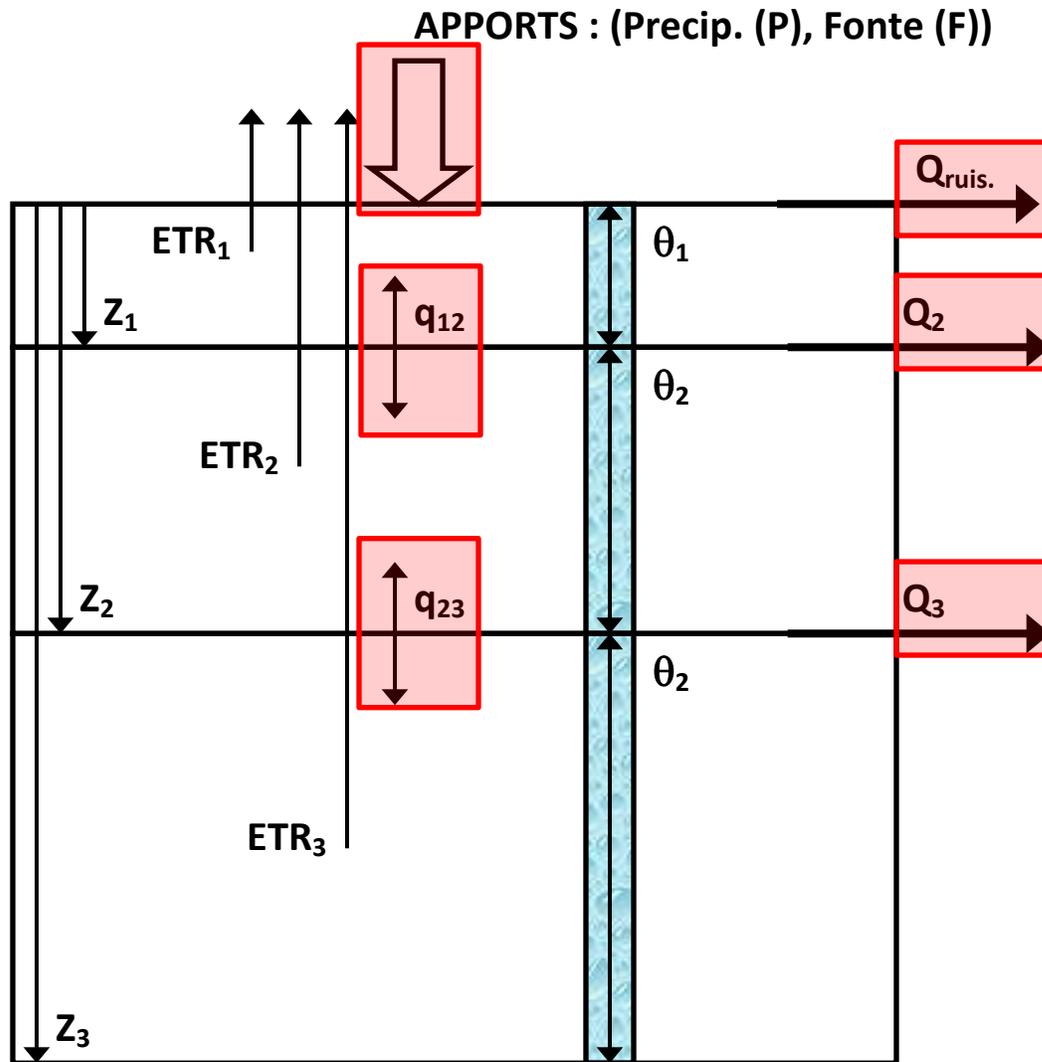


Figure 4.3 Impact du gel du sol sur le modèle de bilan d'eau vertical dans le sol d'HYDROTEL (BV3C).

4. Modèle de températures et de gel du sol

À la figure précédente, les paramètres Z_1 , Z_2 et Z_3 représentent les limites inférieures des couches de sol 1, 2, et 3. Ces couches de sols présentent des teneurs en eau distinctes (θ_1 , θ_2 , θ_3) qui sont influencées :

- 1) par l'évapotranspiration pouvant affecter chacune de couches (ETR_1 , ETR_2 , ETR_3);
- 2) l'infiltration à la surface des apports (\downarrow) en eaux (précipitations (P.) ou fonte (F) du couvert de neige);
- 3) des échanges en eau entre les couches de sol 1 et 2 (q_{12}) et 2 et 3 (q_{23}); et
- 4) du ruissellement à la surface (Q_{ruiss}), de l'écoulement latéral (Q_2) et de l'écoulement de base (Q_3);

Tel que le présente la figure 4.3 par le biais des encadrés rouges, la présence et la profondeur du gel dans le sol auront des impacts ciblés. Conséquemment à certains tests, ces impacts seront limités à la présence de faible couvert neige ($\leq 10\text{mm}$ d'équivalent en eau) en raison de processus qui ne sont pas pris en compte par HYDROTEL. Ces limitations s'expriment dans la prise en compte du couvert de neige. En ce sens, le couvert de neige dans HYDROTEL ne permet pas l'interception des précipitations liquides, de même que le couvert de neige ne permet pas de limiter le ruissellement de surface lié à la fonte et aux précipitations liquides, en agissant comme milieu tampon. En complément, il ne peut être envisagé, dans l'étude courante, d'apporter les corrections nécessaires en raison des modifications trop profondes qui devraient être apportées à HYDROTEL pour palier à ces limitations.

- 1) En présence de gel et d'un faible couvert de neige les apports en eaux à la surface du sol ne pourront s'infiltrer dans le profil de sol et seront plutôt traduits sous forme de ruissellement;
- 2) En fonction de la profondeur du gel et de l'équivalent en eau du couvert de neige, les échanges entre les couches de sols (q_{12} et q_{23}) seront restreints selon la proportion de la couche de sol gelée;

- 3) De façon similaire, l'écoulement latéral (Q_2) et l'écoulement de base (Q_3) seront restreints selon la proportion de la couche de sol gelée qui s'y rattache ainsi que l'importance du couvert de neige en surface. De manière conservatrice, comme la couche de sol 3 est responsable de l'écoulement de base (Q_3), le gel de cette couche sera limité à un maximum de 50% afin d'assurer un apport en eau vers les cours d'eau.

Conséquemment à ces impacts et de façon indirecte, les teneurs en eau des couches de sols seront également affectées par la présence de gel dans le sol.

À ce jour, et compte tenu de la durée du projet, très peu de tests ont été effectués sur l'impact du gel au sol sur les écoulements. Il sera pertinent d'évaluer la capacité du modèle hydrologique HYDROTEL à représenter la dynamique des écoulements en présence de gel au sol lors du calage à venir du modèle sur les sous-bassins du Complexe La Grande. Dès lors, il peut être envisagé que le modèle de températures et de gel du sol favorise essentiellement le ruissellement de l'eau sur un sol gelé en présence de faibles couverts de neige qui sont généralement présents à l'amorce de l'hiver ou en fin de période hivernale.

Certaines limites du modèle de températures et de gel au sol doivent être soulignées.

- 1) le modèle de températures dans le sol demeure un modèle très simple, qui ne prend pas en compte l'apport thermique (flux de chaleur vers la surface) des couches profondes de sol;
- 2) l'implantation du modèle au niveau des UHRH représente une limite spatiale d'intégration;
- 3) les données relatives aux températures dans le sol sont très limitées sur le secteur, ce qui limite la spatialisation du calage ayant pour effet de tendre vers des valeurs uniques attribuées aux paramètres du modèle de températures dans le sol sur l'ensemble du territoire du Complexe La Grande;

4. Modèle de températures et de gel du sol

- 4) les apports en eau sur le sol gelé ne contribuent pas au dégel du sol en surface;
- 5) la couche 3 du modèle de bilan en eau vertical BV3C ne peut être gelée en totalité puisque cette couche de sol assure les apports en eau aux rivières en période d'étiage hivernal telle que la dynamique des écoulements dans les sols le prévoit;
- 6) l'impact du gel du sol s'opère plus spécifiquement en présence de faible couvert de neige en raison des processus qui ne sont pas considérés par HYDROTEL notamment les processus d'interception et d'atténuation du ruissellement de surface par le couvert de neige; et
- 7) à l'heure actuelle, le contrôle du modèle et l'édition des paramètres sont effectués uniquement via les fichiers relatifs aux projets HYDROTEL. Il n'y a donc aucun contrôle via l'interface d'HYDROTEL.

Il demeure très important de noter que ce modèle de températures et de gel / dégel du sol constitue un premier pas dans la prise en compte des processus influents sur l'hydrologie et que l'impact de ces processus pourrait être mieux quantifié à l'usage.

5 Modèle des milieux humides et tourbières

Cette section vise plus spécifiquement à décrire le modèle de simulation de l'impact des milieux humides et tourbières sur l'écoulement terrestre et l'interaction des milieux humides avec les tronçons.

Lors de travaux antérieurs sur le bassin de la rivière Nécopastic, une première modélisation explicite des milieux humides de types ombrotrophes a été mise en place (Jutras *et al.*, 2009). Cette modélisation était alors prise en charge par le modèle PHIM intégré à la version HYDROTEL 2.6 (32bits). Plus récemment, cette modélisation a été mise à jour lors de travaux de modélisation de l'impact des milieux humides sur les crues et les étiages dans deux grands bassins du sud du Québec. Ces travaux ont permis de raffiner l'approche de modélisation des milieux humides avec PHYSITEL / HYDROTEL et de bien distinguer les contributions des milieux isolés et riverains (Rousseau *et al.*, 2012). Compte tenu des limites du modèle PHIM et des travaux plus récents de prise en compte des milieux humides isolés et riverains, il a été jugé préférable de procéder à une intégration des travaux les plus récents dans la nouvelle version d'HYDROTEL.

Globalement, ces travaux de modélisation sont basés sur une représentation sommaire des fonctions hydrologiques des tourbières et milieux humides à caractère global. C'est-à-dire, sur la base de travaux de terrain (Clerc, 2009; Carrer 2014, Carrer *et al.* 2014) et de connaissances rapportées dans la littérature, ces milieux sont représentés par des réservoirs avec des lois de vidange qui dépendent des volumes maximaux pour les milieux isolés et par équilibre hydrostatique ou gradient hydraulique pour les milieux riverains. Dans le cadre de ce projet, les modules informatiques de cette modélisation sont intégrés plus spécifiquement dans la nouvelle version HYDROTEL 2.8 (64bits).

Afin de permettre une bonne compréhension de la modélisation des milieux humides, une description détaillée du modèle est présentée. Cette description est reprise des travaux de Rousseau *et al.* (2012).

Dans un premier temps, la prise en compte des milieux humides s'amorce dans le SIG PHYSITEL. Sur la base de la carte détaillée de l'occupation des sols, incluant les milieux humides ou tourbières (MH), le SIG PHYSITEL procède alors au calcul de l'aire de chacun des MH. Cette aire est considérée comme l'aire maximale. 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 le cas présent, le seuil a été fixé à 1 %). À noter que les milieux humides en contact avec des lacs ou réservoirs sont considérés comme des milieux humides isolés exclusivement en raison des limites d'HYDROTEL dans la représentation des niveaux ou hauteur d'eau pour ces étendues d'eau. 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 figure 5.1 présente un exemple de carte d'identification des MH et des aires drainées pour le sous-bassin Caniapiscau.

5. Modèle des milieux humides et tourbières

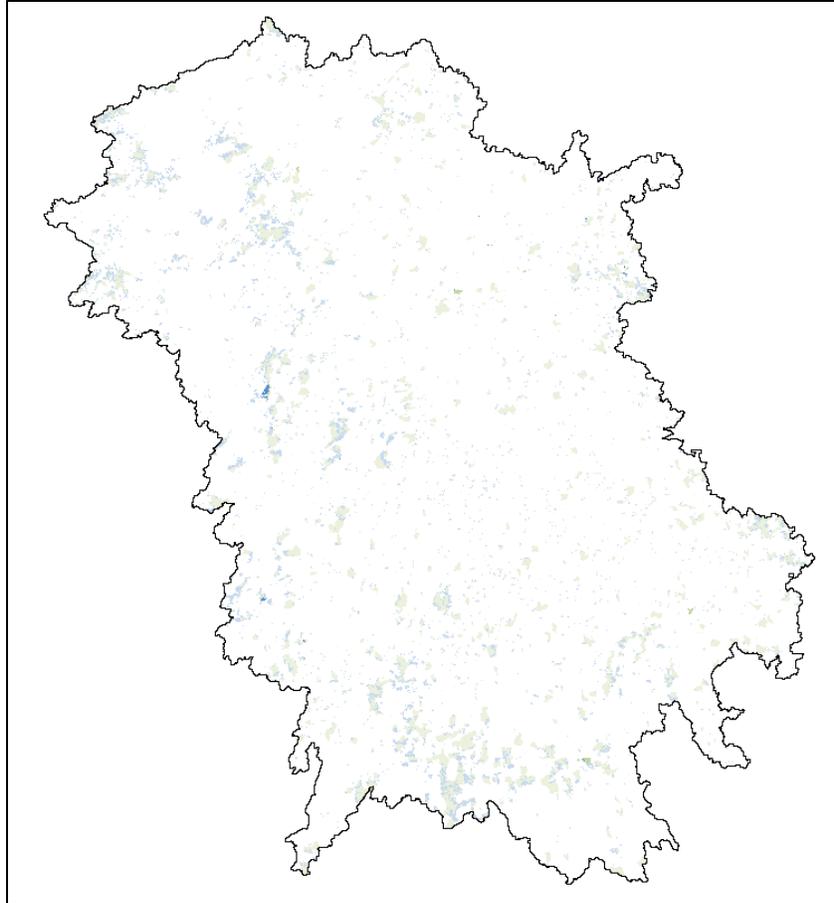


Figure 5.1 Exemple d'identification des MH et des aires drainées sur le sous-bassin Caniapiscou (■ Milieux humides isolés ; ■ Superficies drainées par les milieux humides isolés ; ■ Milieux humides riverains ; ■ Superficies drainées par les milieux humides riverains).

La figure 5.1 démontre que PHYSITEL est en mesure d'identifier correctement les milieux humides et leurs aires drainées sur le sous-bassin Caniapiscou. Cependant, tel que mentionné, la classe milieux humides et tourbières semble sous-représentée dans la classification MODIS de 2005.

La représentation des MH au sein du modèle hydrologique HYDROTEL et leur définition au sein du SIG PHYSITEL s'appuient aussi sur le concept de milieu humide équivalent (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 une UHRH. 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 / Versant.

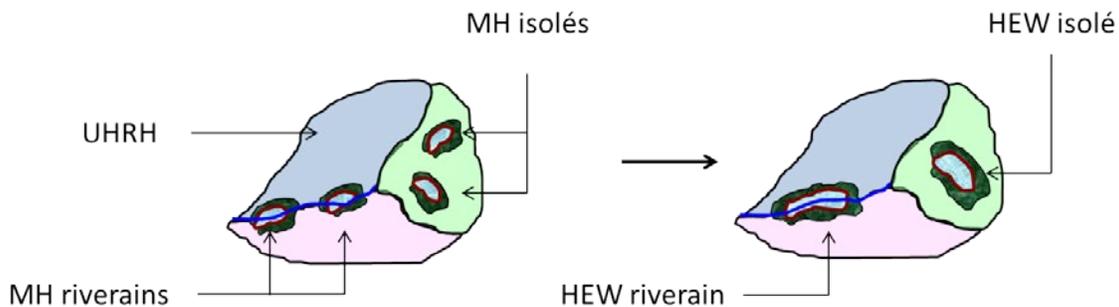


Figure 5.2 Schéma illustrant le HEW (ou MHE) et le découpage de l'UHRH en versant.

Deux points sont à noter lors de cette étape. Une UHRH / Versant ne peut accueillir qu'un seul MHE par typologie, soit un MHE isolé et un MHE riverain. Aussi, un MHE situé sur plusieurs UHRH / Versants est alors réparti sur chacun des UHRH / Versants en respectant les proportions de recouvrement initiales. De cette manière chacun des UHRH / Versants 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 / Versant 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.

Conséquemment à l'identification des milieux humides par PHYSITEL, le développement d'HYDROTEL consiste 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

5. Modèle des milieux humides et tourbières

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, évaporation et 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 :

$$SA_{wet} = \beta \times V_{wet}^{\alpha} \quad (\text{Éq. 4})$$

où SA_{wet} représente la surface du MHE (ha), β un coefficient, V_{wet} le volume d'eau présent dans le MHE (m^3) et α un exposant.

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

$$\alpha = \frac{\log_{10}(SA_{wet, mx}) - \log_{10}(SA_{wet, nor})}{\log_{10}(V_{wet, mx}) - \log_{10}(V_{wet, nor})} \quad (\text{Éq. 5})$$

où $SA_{wet, mx}$ et $SA_{wet, nor}$ représentent les surfaces dites maximale et normale du MHE (ha) alors que $V_{wet, mx}$ et $V_{wet, nor}$ représentent les volumes maximal et normal (m^3).

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

$$\beta = \left(\frac{SA_{wet, mx}}{V_{wet, mx}^{\alpha}} \right) \quad (\text{Éq. 6})$$

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 80% de la surface maximale. Cette estimation de la surface dite normale en fonction de la surface maximale fait référence au

comportement des tourbières décrites dans les travaux de terrain de Clerc (2009), Carrer (2014) et Carrer *et al.* (2014). Pour les besoins de la description des paramètres, la valeur de la fraction 80 % sera dénommée $SA_{wet,nor,frac}$. Cette estimation est également en accord avec les lois de vidanges des milieux humides prises en compte dans la modélisation. Ainsi les volumes en eaux sortant des milieux humides seront plus importants au-delà du volume normal. Ce qui s'harmonise avec des observations qui tendent à démontrer que les milieux humides et tourbières sur le secteur d'étude libèrent des quantités d'eaux de façon plus marquées seulement lorsque leurs volumes s'approchent de leurs volumes maximaux.

Le calcul des volumes maximal et normal sont identiques pour les MH isolés et riverains équivalents. Ils correspondent respectivement aux équations 7 et 8.

$$V_{wet, mx} = D_{wet, mx} \times SA_{wet, mx} \quad (\text{Éq. 7})$$

$$V_{wet, nor} = D_{wet, nor} \times SA_{wet, nor} \quad (\text{Éq. 8})$$

où $D_{wet, mx}$ et $D_{wet, nor}$ représentent les hauteurs d'eau maximale et normale (aussi appelée plein bord) (m) présentes dans les milieux humides isolés ou riverains équivalents. Les valeurs attribuées à ces hauteurs d'eau sont de 0.3 m pour la hauteur maximale et 0.2 m pour la hauteur d'eau normale. Notons que pour les équations 7 et 8 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 MHE selon l'équation suivante :

$$D_{wet} = \beta^{-1} \times V_{wet}^{1-\alpha} \quad (\text{Éq. 9})$$

où D_{wet} (m) représente la hauteur d'eau 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.

5. Modèle des milieux humides et tourbières

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

$$V_{wet,2} = V_{wet,1} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (\text{Éq. 10})$$

où $V_{wet,2}$ et $V_{wet,1}$ (m^3) représentent les volumes d'eau présents en fin (2) et au début (1) du pas de temps de simulation, V_{flowin} (m^3) le volume d'eau intercepté par le MHE en fonction de l'aire drainée par celui-ci, V_{pcp} (m^3) l'apport en eau par les précipitations ou la fonte du couvert de neige, V_{evap} (m^3) le volume en eau perdu par évaporation, V_{seep} (m^3) le volume d'eau s'écoulant à la base du milieu humide et $V_{flowout}$ (m^3) 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 :

$$V_{flowin} = (Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw}) \times (fr_{wet} \times SA_{uhrh} - SA_{wet}) \times 10 \quad (\text{Éq. 11})$$

où fr_{wet} représente la fraction de l'UHRH occupée 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 / Versant par le modèle BV3C, SA_{uhrh} (ha) représente la superficie de l'UHRH / Versant. Comme le bilan se fait à l'échelle du MH, on doit soustraire de $fr_{wet} \times SA_{uhrh}$ la superficie occupée par le milieu humide SA_{wet} (ha).

$$V_{pcp} = PCP_{uhrh} \times SA_{wet} \times 10 \quad (\text{Éq. 12})$$

où PCP_{uhrh} (mm) la quantité de précipitations ou la fonte calculée par HYDROTEL pour une UHRH / Versant donnée.

$$V_{evap} = \eta \times ETP_{UHRH} \times SA_{wet} \times 10 \quad (\text{Éq. 13})$$

où ETP_{uhrh} (mm) représente l'évapotranspiration potentielle pour une UHRH / Versant donnée calculée par HYDROTEL et η représente un coefficient d'évapotranspiration (0.6). Cette valeur correspond à celle utilisée dans le modèle SWAT (Neitsch *et al.*,

2005). Ainsi l'eau perdue par évapotranspiration à l'échelle du milieu humide correspond à 60% de l'évapotranspiration potentielle calculée pour un UHRH / Versant.

$$V_{seep} = K_{sat} \times SA_{wet} \times \Delta t \times 10 \quad (\text{Éq. 14})$$

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

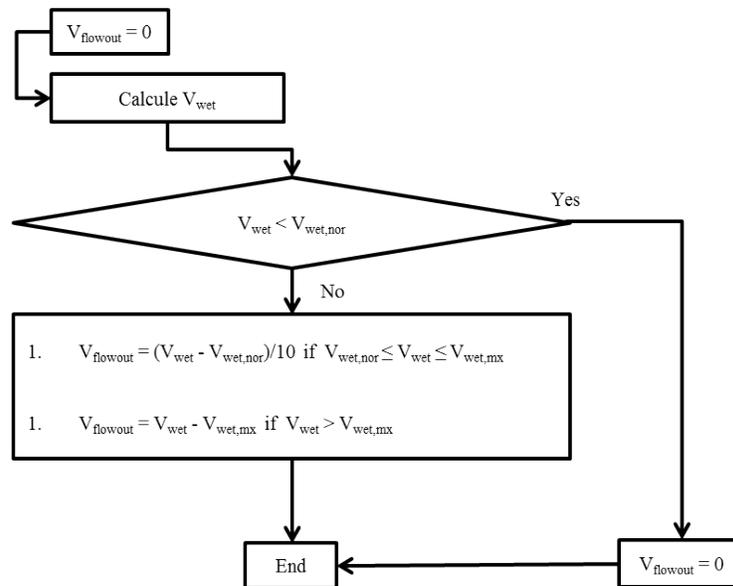


Figure 5.3 Algorithme de calcul pour l'estimation des flux associés aux MH isolés.

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

$$V_{wet,2} = V_{wet,1} + V_{flowin} - S_{wet} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (\text{Éq. 15})$$

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 riverain (V_{flowin}) en fonction

5. Modèle des milieux humides et tourbières

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 5.4, ci-dessous, présente l'algorithme de calcul utilisé pour les flux d'eau sortant en surface associés aux MHE riverains.

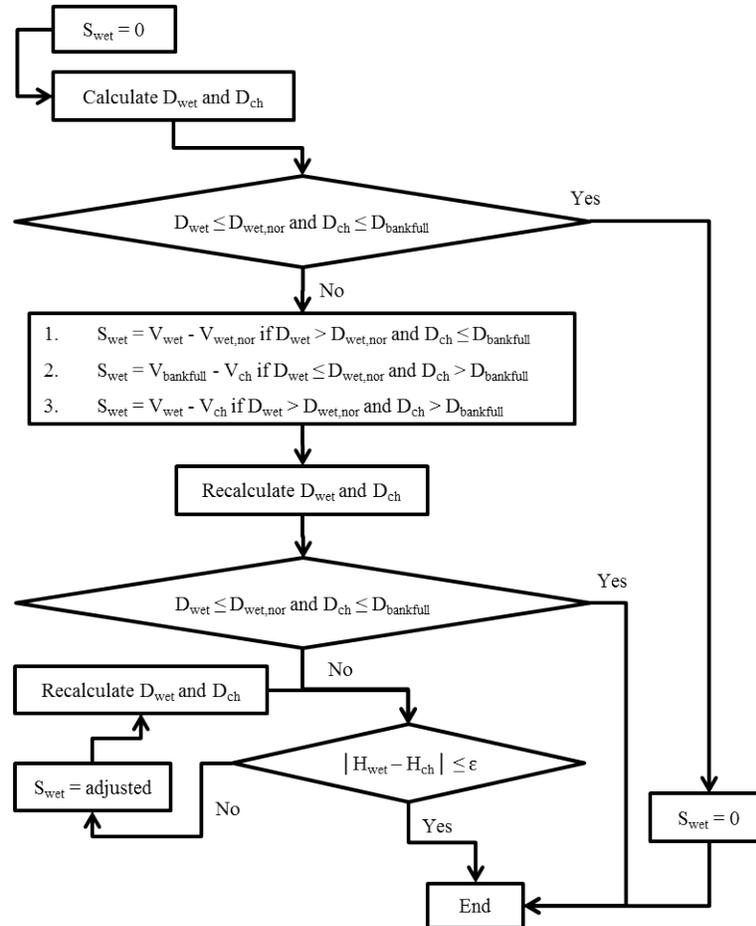


Figure 5.4 : Algorithme de calcul pour l'estimation des flux associés aux MH riverain

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 à celle utilisée par le modèle SWAT et décrite dans les travaux d'Ames *et al.* (2009):

$$D_{bankfull} = 0.13 \times SA_{ch}^{0.4} \quad (\text{Éq. 16})$$

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.

5. Modèle des milieux humides et tourbières

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

$$W_{ch} = 0.49 \times SA_{ch}^{0.62} \quad (\text{Éq. 17})$$

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

Aussi le schéma 5.4 introduit les variables H_{wet} et H_{ch} qui représentent la côte 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 15 prend alors la forme suivante :

$$G_{wet} = k \times b \times L_{wet} \times \frac{H_{wet} - H_{ch}}{d} \Delta t \quad (\text{Éq. 18})$$

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'acquière (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 estimée selon l'équation 17. 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'échanges 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 hydrostatique 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 BV3C alors que les MH riverains sont intégrés au niveau des écoulements par le réseau hydrographique.

La figure 5.5 ci-dessous présente le schéma d'ensemble de l'intégration des milieux humides dans le modèle hydrologique HYDROTEL.

5. Modèle des milieux humides et tourbières

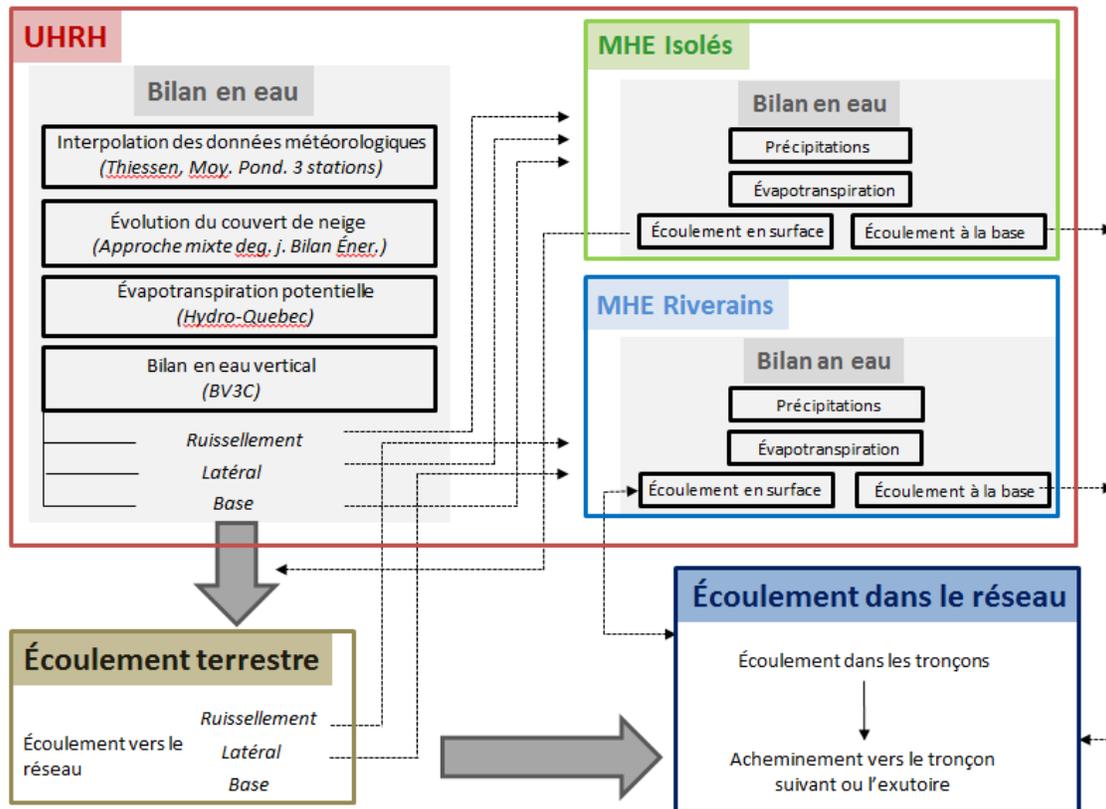


Figure 5.5 Schéma d'ensemble de l'intégration des milieux humides dans le modèle hydrologique HYDROTEL.

L'intégration des milieux humides a été effectuée dans la version HYDROTEL 2.6 (32bits). Ainsi dans le cadre de ce projet, les modules informatiques de cette modélisation des milieux humides ont été intégré dans la nouvelle version HYDROTEL 2.8 (64bits).

En complément, il est important de noter que la prise en compte des milieux humides dans la modélisation hydrologique est effectuée seulement si les fichiers descriptifs des milieux humides sont indiqués dans le fichier « .prj » du projet pour la version HYDROTEL 2.6 (32 bits) ou dans le fichier de simulation de type « .csv » portant le nom de la simulation donné rattaché au projet (ex : *simulation.csv*) pour la version HYDROTEL 2.8 (64 bits). Les fichiers descriptifs des milieux humides sont générés par PHYSITEL et portent les noms suivants :

milieux_humides_isoles.csv; milieux_humides_riverains.csv; troncon_width_depth.csv.

Les deux premiers fichiers sont ceux qui comportent les paramètres du modèle de milieux humides en fonction des milieux humides isolés équivalents par UHRH / Versant et des milieux humides riverains équivalents par tronçons auxquels ils se rattachent. Ces fichiers peuvent être modifiés au besoin par l'utilisateur. Dans le cas des sous-bassins du Complexe La Grande, ces fichiers comportent déjà les paramètres jugés représentatifs des milieux humides et tourbières présents sur le territoire.

Les figures 5.6 et 5.7 présentent des captures d'écrans des fichiers descriptifs des milieux humides isolés équivalents (*milieux_humides_isoles.csv*) et des milieux humides riverains équivalents (*milieux_humides_riverains.csv*).

5. Modèle des milieux humides et tourbières

Uhrh Id	uhrh_a (km^2)	wet_a (km^2)	wet_dra_fr	frac	wetdnor (m)	wetdmax (m)	ksat_bs	c_ev	c_prod	sauvegarde
2	4911.45	30.93	0.00653	0.8	0.2	0.3	0.5	0.6	10	0
3	4.62	0.19	0.06926	0.8	0.2	0.3	0.5	0.6	10	0
4	13.2	0.63	0.17197	0.8	0.2	0.3	0.5	0.6	10	0
5	1.11	0.05	0.06306	0.8	0.2	0.3	0.5	0.6	10	0
6	31.56	0.83	0.06812	0.8	0.2	0.3	0.5	0.6	10	0

Figure 5.6 Exemple de fichier descriptif des milieux humides isolés équivalents.

Troncon Id	uhrh_a (km^2)	wet_a (km^2)	wetaup_fr	wetadra_fr	wetdown_fr	longueur (m)	longueur amont (m)	longueur aval (m)	wetdnor (m)	wetdmax (m)	frac	ksat_bk	ksat_bs	th_aq	sauvegarde
211	6.81	0.47	0.07635	0.488987	0.434655	400	600	1682.84	0.2	0.3	0.8	25.0f	0.5f	2.0f	0
223	1.97	0.05	0.80203	0.192893	0.005076	500	1491.42	191.421	0.2	0.3	0.8	25.0f	0.5f	2.0f	0
289	162.83	0.06	0.00018	0.976786	0.023030	300	191.421	2974.26	0.2	0.3	0.8	25.0f	0.5f	2.0f	0
335	6.94	0.07	0.04899	0.134006	0.817003	500	950	4898.53	0.2	0.3	0.8	25.0f	0.5f	2.0f	0
363	5.23	0.42	0.63288	0.296367	0.070745	1600	3407.11	700	0.2	0.3	0.8	25.0f	0.5f	2.0f	0

Figure 5.7 Exemple de fichier descriptif des milieux humides riverains équivalents.

Les tableaux 5.1 et 5.2 résument en détails les paramètres et éléments du modèle pour les milieux humides isolés et riverains. De plus, des plages de valeurs sont proposées pour les différents paramètres.

Tableau 5.1 Paramètres descriptifs des milieux humides isolés.

Nom du paramètre	Valeur	Plages de valeurs	Description
Uhrh_Id	-	-	Identifiant de l'UHRH / Versant
uhrh_a	-	-	Superficie de l'UHRH / Versant (km ²)
wet_a ($SA_{wet,max}$)	-	-	Superficie maximale du milieu humide équivalent (km ²)
wet_dra_fr (fr_{wet})	-	-	Fraction de l'UHRH / Versant drainée par le milieu humide équivalent*
frac ($SA_{wet,nor,frac}$)	0.80	0.40 – 1.00	Fraction de la superficie maximale afin de déterminer la superficie normale
wetdnor ($D_{wet,nor}$)	0.20 m	0.10 – 0.30 m	Hauteur d'eau normale
wetdmax ($D_{wet,max}$)	0.30 m	0.20 – 0.50 m	Hauteur d'eau maximale
ksat_bs (K_{sat})	0.50 mm/h	0.25 – 0.75 (mm/h)	Conductivité hydraulique à saturation à la base du MHE.
c_ev (η)	0.60	0.40 – 1.00	Coefficient de l'évapotranspiration potentielle
c_prod	10	5 - 15	Ratio dans le calcul des volumes d'eau sortant du MHE
sauvegarde	1	-	Code de sauvegarde des variables d'état des milieux humides équivalents

*La fraction de l'UHRH / Versant drainée par le milieu humide inclut la superficie du milieu humide lui-même.

5. Modèle des milieux humides et tourbières

Tableau 5.2 Paramètres descriptifs des milieux humides riverains.

Nom du paramètre	Valeur	Plages de valeurs	Description
Troncon_Id	-	-	Identifiant du tronçon
uhrh_a	-	-	Superficie de l'UHRH / Versant (km ²)
wet_a ($SA_{wet,max}$)	-	-	Superficie maximale du milieu humide équivalent (km ²)
wetaup_fr	-	-	Fraction des UHRH / Versants drainées par le tronçon en amont du milieu humide riverain équivalent
wetadra_fr (fr_{wet})	-	-	Fraction des UHRH / Versants drainées par le milieu humide riverain équivalent*
wetadown_fr	-	-	Fraction des UHRH / Versants drainées par le tronçon en aval du milieu humide riverain équivalent
longueur	-	-	Longueur du milieu humide riverain équivalent (m)
longueur amont	-	-	Longueur du segment de tronçon situé en amont du milieu humide riverain équivalent (m)
longueur aval	-	-	Longueur du segment de tronçon situé en aval du milieu humide riverain équivalent (m)
wetdnor ($D_{wet,nor}$)	0.20 m	0.10 – 0.30 m	Hauteur d'eau normale
wetdmax ($D_{wet,max}$)	0.30 m	0.20 – 0.50 m	Hauteur d'eau maximale
frac ($SA_{wet,nor,frac}$)	0.80	0.40 – 1.00	Fraction de la superficie maximale afin de déterminer la superficie normale
ksat_bk (k)	25.0 mm/h	12.5 – 37.5 (mm/h)	Conductivité hydraulique à saturation de la berge du MHE
ksat_bs (K_{sat})	0.50 mm/h	0.25 – 0.75 (mm/h)	Conductivité hydraulique à saturation à la base du MHE
th_aq (b)	0.60	0.40 – 1.00	Épaisseur de l'aquifère potentielle
sauvegarde	1	-	Code de sauvegarde des variables d'état des milieux humides équivalents

*La fraction de l'UHRH / Versant drainée par le milieu humide inclut la superficie du milieu humide lui-même.

Dans les tableaux précédents, les noms des paramètres font référence à la fois aux noms des paramètres dans les fichiers descriptifs des milieux humides dans le projet HYDROTEL ainsi que les noms des paramètres dans la section courante. Les plages de valeurs proposées font plus spécifiquement référence à des variations de 50% de la valeur attribuée et ce, conséquemment à une analyse de sensibilité menée lors de travaux connexes Carrer (2014), Carrer *et al.* (2014) et également des travaux de Wang *et al.* (2008) et Liu *et al.* (2008). Il demeure aussi important de noter que le modèle comporte aussi certaines limites :

- 1) Il n'y a pas de modélisation de l'écoulement de l'eau à l'intérieur des milieux humides ou tourbières. Ainsi les milieux humides agissent comme des réservoirs dont les volumes en eau évoluent.
- 2) L'implantation du modèle est effectuée au niveau des UHRH / Versants selon le concept de milieux humides équivalents. La distribution spatiale de milieux humides est donc résumée à l'échelle des UHRH / Versants.
- 3) À l'heure actuelle, le contrôle du modèle et l'édition des paramètres sont effectués uniquement via les fichiers relatifs aux projets HYDROTEL. Il n'y a donc aucun contrôle via l'interface d'HYDROTEL.
- 4) De par la structure de programmation d'HYDROTEL et du module relatif aux milieux humides riverains, l'évapotranspiration de ces milieux humides spécifique est plutôt fondue dans le calcul de l'évapotranspiration à l'échelle de l'UHRH / Versants. Ce pourquoi, il n'y a pas de coefficient de l'évapotranspiration potentielle pour les milieux humides riverains.

En complément, les fichiers descriptifs des milieux humides permettent au besoin, la sauvegarde des variables d'états décrivant l'évolution et le comportement de ces milieux lors de la modélisation hydrologique.

6 PHYSITEL et HYDROTEL versions 64 bits

Tout au long du projet, des efforts ont été portés sur le développement de nouvelles versions des logiciels PHYSITEL et HYDROTEL afin de rendre ces logiciels pleinement compatibles avec des bassins d'envergure du nord Québécois. Ces efforts visent entre autres à:

- 1) Améliorer la performance des outils et rendre leurs usages possibles sur de très grandes superficies comme c'est le cas du complexe La Grande. Traditionnellement PHYSITEL ne permettait pas d'intégrer des matrices ayant un nombre de lignes et colonnes supérieur à 5000 x 5000. Avec une version PHYSITEL 64bits, cette limite n'existe plus.
- 2) Se sevrer de l'usage de logiciels tiers commerciaux afin d'offrir des versions dites « open source ».
- 3) Recourir à des fichiers ayant des formats standardisés qui facilitent leurs prises en charge et leurs lectures par d'autres logiciels courants.

Le tableau 6.1 présente des éléments comparatifs pour les versions PHYSITEL 3.0 32 bits vs. 4.0 64 bits

Tableau 6.1 Éléments de comparaison entre les versions du SIG PHYSITEL.

Éléments	PHYSITEL 3.0 (32 bits)	PHYSITEL 4.0 (64 bits)
Plateforme	Windows 32 bits	Windows et Linux, 32 et 64 bits
Programmation	C++ MFC	C++ STL
Gestion SIG	MapInfo MapX et VerticalMapper	GDAL/OGR, DotSpatial
Format des données spatiales	MapInfo (.tab)	ESRI Shapefile et ESRI Grid (Possibilité de supporter la majorité des formats disponibles)

En raison de la durée du projet, nous avons été contraints à recourir à la version 3.0 de PHYSITEL pour effectuer la mise en place des sous-bassins du Complexe La Grande. En

ce sens, la version PHYSITEL 4.0 qui ne présente pas d'interface, n'offrait pas la robustesse nécessaire pour l'intégration satisfaisante de tels bassins. Le fait de subdiviser le Complexe La Grande en sous-bassins nous a permis d'utiliser directement la version PHYSITEL 3.0.

En ce qui a trait à HYDROTEL, le tableau 6.2 présente des éléments comparatifs pour les versions HYDROTEL 2.6 (32 bits) vs. 2.8 (64 bits)

Tableau 6.2 Éléments de comparaison entre les versions du modèle hydrologique HYDROTEL.

Éléments	HYDROTEL 2.6 (32 bits)	HYDROTEL 2.8 (i.e., 4.0 compatible avec PHYSITEL 4.0)
Plateforme	Windows 32 bits	Windows et Linux, 32 et 64 bits
Programmation (noyau)	C++ MFC	C++ STL
Programmation (interface)	C++ MFC	C#
Gestion SIG	(aucune) (géré manuellement avec les MFC)	GDAL/OGR, DotSpatial
Format des données spatiales		ESRI Shapefile et ESRI Grid (Possibilité de supporter la majorité des formats disponibles)

Contrairement à la version PHYSITEL 64 bits, la version HYDROTEL 64 bits présente une interface relativement achevée. Aussi cette nouvelle version dispose les résultats dans des fichiers de type « .csv » qui est un format standard facilitant leurs lectures par d'autres logiciels.

7 Recommandations et conclusions

7.1 Intégration à la modélisation hydrologique.

Tous les sous-bassins du Complexe La Grande ont été dans un premier temps, discrétisés par le SIG PHYSITEL 3.0 (32 bits) comme la version 4.0 (64 bits) n'était pas assez avancée notamment au niveau de l'interface. Par la suite, l'ensemble des fichiers nécessaires à la modélisation hydrologique ont été préparés afin de permettre une première intégration au modèle hydrologique HYDROTEL version 2.6 (32 bits). Par la suite, à l'outil développé à cet effet les projets d'intégration ont été convertis et adaptés à la version HYDROTEL 2.8 (i.e., 4.0 64 bits). L'ensemble des projets PHYSITEL et HYDDROTEL ainsi qu'une version à jour des logiciels ont été remis à nos collègues de l'unité de Prévision d'Hydro-Québec Production.

Il est important de noter que le calage pourra être effectué avec l'une ou l'autre des versions d'HYDROTEL puisque les deux versions donnent des résultats pratiquement identiques pour un même jeu de paramètres. Cependant, seule la version HYDROTEL 2.8 comporte un modèle d'estimation des températures et de gel du sol.

Dans les projets mis en place avec la version HYDROTEL 2.8, des modules de milieux humides et températures des sols et du gel et dégel sont considérés. Au besoin, l'utilisateur peut ne pas considérer ces impacts par l'édition du fichier « .prj » descripteur du projet pour la version HYDROTEL 2.6 (32 bits) ou dans le fichier de simulation de type « .csv » portant le nom de la simulation donné rattaché au projet (ex : *simulation.csv*) pour la version HYDROTEL 2.8 (64 bits).

Dans un contexte de calcul des CMP, certaines recommandations doivent être considérées :

- i) Afin de reproduire les apports naturels aux réservoirs, ceux-ci doivent être édités afin d'adopter le type lac sans laminage. Ainsi les volumes en eau entrant dans un réservoir seront automatiquement acheminés vers son exutoire. Il suffit alors de

considérer les débits dans le tronçon à l'exutoire du réservoir. Il est à noter que dans le cas du Complexe La Grande les sous-bassins considérés ne recevront pas les apports en eau des sous-bassins amont. Il conviendra alors aux utilisateurs de considérer ces apports lors de leurs travaux.

- ii) Les versions 2.6 et 2.8 d'HYDROTEL permettent la saturation des sols requise lors des calculs des CMP d'été-automne par l'édition du fichier saturation.pmp pour la version HYDROTEL 2.6 (32 bits) et *correction.csv* dans la version HYDROTEL 2.8 (64 bits) placés dans le dossier de simulation visé. Ce fichier très simple présente une ligne directrice où l'on retrouve la date et le coefficient multiplicatif de la teneur en eau à saturation pour chacune des couches de sols. Dans un contexte de CMP, la date correspond à celle du jour de la PMP afin de maximiser le ruissellement de surface et les débits en rivières qui en découlent.
- iii) En début de simulation, l'ensemble du réseau de lacs, réservoirs et rivières est vide, il est donc recommandé d'effectuer une première simulation comportant des conditions météorologiques moyennes sur une durée d'au moins une année hydrologique afin de générer en fin de simulation des variables d'états qui seront alors utilisées en début de simulation dans un contexte d'étude de CMP.

À titre de complément, la version HYDROTEL 2.8 (64 bits) transférée permet de lire certains formats de données météorologiques sur grille de format NETcdf ou hdf5 qui sont des formats plutôt standards. Ainsi, peut-être est-il possible de formater les données sur grille d'HQ selon ces formats. Sinon, une stratégie de remplacement est de représenter les données sur grille d'HQ comme des données à des stations fictives localisées au centre des tuiles de la grille originale.

De même, les deux versions d'HYDROTEL permettent l'utilisation de séquences météorologiques issues des simulations de changements climatiques en traduisant la grille source en stations fictives. Cette même approche a été utilisée lors du calcul de CMP sur les réservoirs Kénogami et Choinière (Rousseau *et al.* 2012).

7.2 Caractérisation des types de sol sur le Complexe La Grande

Tous les projets d'intégration à la modélisation hydrologique à l'aide HYDROTEL sur le Complexe La Grande comportent un fichier descriptif des propriétés hydrodynamiques des sols. Ce fichier qui porte le nom proprietehydrolique.sol présente des propriétés à la fois pour les sols minéraux et non-minéraux, issues de la littérature et de travaux antérieurs sur le secteur de la rivière Nécopastic. Au besoin, ces propriétés peuvent être changées par l'utilisateur. Dans le cas présent, il n'est pas jugé nécessaire d'intégrer ces propriétés dans la démarche initiale de calage du modèle HYDROTEL. Aussi en complément d'une mise à jour de la représentation des milieux humides sur le secteur d'étude, il serait alors pertinent de procéder à une mise à jour des types de sol organiques caractéristiques des milieux humides de types tourbières qui semblent sous-représentés dans la classification courante.

7.3 Modèle de températures et de gel du sol

Tel que mentionné, seule la version HYDROTEL 64 bits comporte un modèle d'estimation des températures et du gel et dégel du sol. À ce jour, très peu de tests ont été menés sur ce modèle à la fois dans la représentation des températures mais aussi dans l'évaluation de l'impact du gel du sol sur les écoulements et l'hydrologie d'un bassin versant. L'implantation d'un tel modèle dans HYDROTEL pourrait être grandement bonifiée à l'aide de mesures terrains offrant un profil de températures verticales pour différents milieux ou types de sol (minéraux ou organiques). Aussi, lors de travaux futurs de modélisation sur les divers sous-bassins du Complexe La Grande, l'impact du gel du sol sur les régimes d'écoulement pourra être quantifié à l'aide de deux simulations complémentaires. La première simulation considérant la température et le gel du sol et la seconde sans considération pour la présence de gel du sol. Le modèle HYDROTEL peut ou non considérer le modèle de températures et de gel du sol simplement en indiquant le nom du modèle « RANKINEN » dans le fichier de simulation

de type « .csv » portant le nom de la simulation donné rattaché au projet (ex : *simulation.csv*) pour la version HYDROTEL 2.8 (64 bits).

Dans le futur il pourrait aussi être envisageable d'intégrer un autre modèle de détermination de la limite du gel du sol basé, par exemple, sur les travaux de Thorsen *et al.* (2010) afin d'offrir certaines options de comparaison à l'utilisateur.

7.4 Modèle des milieux humides et tourbières

Tous les projets d'intégration à la modélisation hydrologique à l'aide HYDROTEL sur le Complexe La Grande considèrent l'impact des milieux humides présents dans la classification de l'occupation du territoire. Le modèle des milieux humides et tourbières, qui distingue à la fois les milieux humides isolés et riverains, a été adapté aux types de milieux présents sur le Complexe La Grande sur la base des travaux antérieurs menés sur des milieux similaires. Tel que mentionné, il semble que la classification de l'occupation du territoire sous-estime la présence des milieux humides sur l'ensemble du secteur La Grande ce qui a pour effet de mitiger l'impact des milieux humides sur les régimes d'écoulement. À notre connaissance, des travaux sont menés actuellement afin de mieux caractériser ces milieux mais ceux-ci demeurent à ce jour, soit trop fragmentaire ou incomplet, pour être considéré dans une perspective d'ensemble. Lorsque de nouveaux produits de classification seront disponibles sur l'ensemble du secteur, il pourrait être envisagé de mettre à jour la carte d'occupation du territoire ainsi que la carte des types de sol afin de mieux identifier les milieux humides et les sols organiques généralement rencontrés sur de tels milieux. Pour les projets HYDROTEL mis en place, il n'est pas jugé pertinent de tenter d'ajuster les paramètres descriptifs des milieux humides lors des premiers efforts de calage. Ceux-ci pourront au besoin être ajustés en présence d'une meilleure représentation des milieux humides et tourbières et dans un contexte d'amélioration du calage. Également, les utilisateurs peuvent prendre en compte ou non la présence des milieux humides en éditant le fichier .prj (HYDROTEL 32 bits) ou dans le fichier de simulation de type « .csv » portant le nom de la

7. Recommandations et conclusions

simulation donné rattaché au projet (ex : *simulation.csv*) pour la version HYDROTEL 2.8 (64 bits).

7.5 PHYSITEL et HYDROTEL versions 64 bits

Comme la version PHYSITEL 64 bits ne présente pas d'interface, il est recommandé d'utiliser la version la plus à jour de PHYSITEL qui a été transmise. C'est cette même version qui a été utilisée pour la mise en place de la modélisation hydrologique sur l'ensemble des sous-bassins du Complexe La Grande. Également, tous les projets d'intégration dans le SIG PHYSITEL ont été remis pour d'éventuelles modifications ou test futurs (ex : mise à jour de la carte d'occupation et des types de sol).

Il est également recommandé de recourir à la version HYDROTEL 64 bits pour les travaux futurs de calage et modélisation afin de bénéficier du modèle des températures et du gel du sol. Nous savons qu'un système de calage automatisé a été développé pour la version HYDROTEL 2.6 32 bits et nous encourageons fortement HQ à adapter ce système à la nouvelle version d'HYDROTEL. Au besoin, nous serons en mesure de fournir les indications nécessaires afin de comprendre les concordances entre les deux versions d'HYDROTEL. Aussi la nouvelle version d'HYDROTEL 64 bits devrait accélérer le temps requis de simulation et améliorer le temps alloué au calage.

7.6 Conclusions

Au terme de ce projet, Hydro-Québec dispose donc d'un nouvel outil de modélisation hydrologique. En ce sens, le modèle hydrologique distribué HYDROTEL a été adapté aux caractéristiques et conditions des bassins nordiques du Québec. À l'aide de cette nouvelle version d'HYDROTEL, il sera désormais possible de procéder à des travaux de modélisations hydrologiques distribuées sur les sous-bassins ciblés du Complexe La Grande. Ces travaux pourront débuter par un calage du modèle afin de reproduire les apports naturels aux réservoirs. Suite au calage, le modèle HYDROTEL pourra être utilisé

tant dans la prévision des apports que dans des études spécifiques comme la révision de crues maximales probables (CMP) ou l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les régimes d'écoulement nordiques. Ainsi, l'implantation des sous-bassins du Complexe La Grande dans le modèle distribué HYDROTEL s'ajoute et complète les outils déjà existants sur ce secteur d'étude de haute importance dans la production hydroélectrique du Québec.

8 Références bibliographiques

Ames, D.P., Rafn, E.B., 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.

Carrer, G.E. 2014. Dynamique des écoulements et du stockage d'eau d'un petit bassin versant boréal influencé par une tourbière minérotrophe aqualysée des Hautes-terres de la baie de James, Québec, Canada. Thèse de doctorat (Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ.). 216p.

Carrer, G. E., Rousseau, A. N., St-Hilaire, A. et Jutras, S. 2014. Mosaic surface storages of a small boreal catchment. *Hydrol. Process.*, EN LIGNE. » DOI : 10.1002/hyp.10195

Centre for Land and Biological Resources Research. 1996. Soil Landscapes of Canada, v.2.2, Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa.

Clerc, C., 2009. Suivi de la nappe, de la recharge et de l'écoulement à l'aide de méthodes in situ afin de comprendre la dynamique de tourbières ombrotrophes de la région de la Baie de James. MSc thesis, Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec, PQ.

Dissanska, M.; Bernier, M.; Rousseau, A.N.; Chokmani, K.; Jutras, S. 2007. Étude de la connectivité physique des tourbières au réseau hydrographique du bassin versant de La Grande rivière à l'aide d'une classification orientée objet d'images Landsat-7 ETM+. Rapport de recherche (R927). Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE. Québec.

Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., Villeneuve, J.-P. 2001. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part I: Description of the model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2): 91-99.

Jutras, S., Rousseau, A.N., Clerc, C. 2009. Implementation of a peatland-specific water budget algorithm in HYDROTEL. *Canadian Water Resources Journal*, 34(4): 349-361.

Lafleur, P.M., Hember, R.A., Admiral, S.W., Roulet, N.T. 2005. Annual and seasonal variability in evapotranspiration and water table at a shrubcovered bog in southern Ontario, Canada. *Hydrological Processes* 19: 3533–3550. DOI: 10.1002/hyp.5842.

Levrel, G., Rousseau, A.N. 2010. Étalonnage de sondes FDR sur les cinq premiers centimètres des sols et des couverts de bryophytes de deux tourbières minérotrophes du milieu boréal Québécois (Canada). *Canadian Journal of Remote Sensing/Journal canadien de Télédétection*, 36(4): 313-331

Levrel, G., Rousseau, A.N., Lafrance, P., Jutras, S., Clerc, C. 2009. Caractérisation des propriétés de rétention hydrique et de conductivité hydraulique dans les sols boréaux de la baie de James : présentation d'une démarche expérimentale et de résultats préliminaires. *Canadian Water Resources Journal*, 34(4): 329-348.

Letts, M.G., Roulet N.T., Comer, N.T., Skarupa, M.R., Versegny, D.L. 2000, Parametrization of peatland hydraulic properties for the Canadian Land Surface Scheme. *Atmos. Ocean*, 38(1), 141–160.

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.

Moeys J. 2009 - The Soil Texture Wizard : R functions for plotting, classifying and transforming soil texture data. 99p.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, Version 2005. Temple, Tex.: USDA-ARS Grassland, Soil and Water Research Laboratory.

8. Références bibliographiques

Oreiller, M., Rousseau, A.N., Minville, M., Nadeau, D.F. 2013. Modeling snow water equivalent and spring runoff in a boreal watershed, James Bay, Canada. *Hydrological Processes* DOI: 10.1002/hyp.10091

Orlandini, S., Moretti, G., Franchini, M. 2003. Path-based methods for the determination of non-dispersive drainage directions in grid-based digital elevation models. *Water Resources Research*, 39(6), 1114.

Payette, S. and Rochefort, L. 2001. *Écologie des tourbières boréales du Québec-Labrador*. Québec: Presses de l'Université Laval.

Rankinen, K., Karvonen, T., Butterfield, D. 2004. A simple model for predicting soil temperature in snow-covered and seasonally frozen soil: model description and testing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 8, 706-716, doi:10.5194/hess-8-706-2004.

Rawls, W.J. and Brakensiek, D.L. 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, A.N., Savary, S., Fossey, M. 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

Rousseau, A.N., Gagnon, P., Savary, S., Freudiger, D., Klein, I. 2012. Intégration de l'impact des C.C. dans la détermination des CMP afin d'appuyer les usagers dans l'évaluation de la sécurité des barrages. Symposium Ouranos. Montréal, Québec. Novembre 2012. Rapport final présenté à Ouranos et aux différents acteurs du milieu.

Rousseau, A.N., Fortin, J.-P., Turcotte, R., Royer, A., Savary, S., Quévy, F., Noël, P., Paniconi, C. 2011. PHYSITEL, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models. *Water News - Official Magazine of the Canadian Water Resources Association*, 31(1): 18-20.

Rousseau, A.N., Hentati, A., Tremblay, S., Quilbé, R., Villeneuve J.-P., 2005 Computation of the topographic index of 16 watersheds in Quebec. *Rapport de recherche N° R-800-F*. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE, Québec, Canada.

Royer, A., Rousseau, A.N., Fortin, J.-P., Turcotte, R. 2006. PHYSITEL, un SIG pour la mise en place de modèles hydrologiques. Affiche présentée au « Deuxième Symposium Scientifique d'Ouranos sur la Climatologie et adaptation à l'échelle régionale », 2-3 November 2006, Montreal, QC, Canada.

Szeto, K.K., Motchalova, T., Vivier, P. (Updated by M. Law); 2000. (update 2008). On the preparation of a 1-km resolution gridded soil texture dataset - *A CRB internal report*. Environment Canada, Downview, Ontario.

Tarnocai, C., Kettles, I.M., Lacelle, B. 2000. Peatlands of Canada: Geological survey of Canada. *Open File Report 3834*.

Thorsen, S. M., Roer, A.-G., van Oijen, M. 2010. Modelling the dynamics of snow cover, soil frost and surface ice in Norwegian grasslands, *Polar Res.*, 29, 110–126.

Turcotte, R., Rousseau, A.N., Fortin, J.-P., Villeneuve, J.-P. 2003. Development of a process-oriented, multiple-objective, hydrological calibration strategy accounting for model structure. Dans :Duan, Q., S. Sorooshian, H. Gupta, A.N. Rousseau, R. Turcotte, *Advances in Calibration of Watershed Models*, Water Science & Application 6, AGU: 153-163.

8. Références bibliographiques

Turcotte, R., Fortin, J.-P., Rousseau, A.N., Massicotte, S., Villeneuve, J.-P. 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*. 240, 225-242.

Wang, X., Yang, W., Melesse, A.M. 2008. Using hydrological equivalent wetland concept within SWAT to estimate streamflow in watersheds with numerous wetlands. *Transactions of the ASABE* 51(1):55-72.