

**Implantation du modèle HYDROTEL sur le bassin
de la rivière Montmorency afin de simuler les débits
observés et de produire des scénarios de crues
du printemps pour l'année 2008**

Rapport présenté à la
Ville de Québec

Alain N. Rousseau ing., Ph.D.
Stéphane Savary ing. jr, M.Sc.
Brou Konan Ph.D.

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

Rapport No R-921

02 juin 2008

© Alain N. Rousseau, 2008
ISBN : 978-2-89146-574-8

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
1 Sommaire exécutif	1
2 Mise en contexte	3
2.1 Problématique.....	3
2.2 Objectifs	4
2.3 Organisation du rapport.....	4
3 Mise en place de la modélisation hydrologique distribuée.....	5
3.1 Discrétisation et caractérisation du bassin versant de la rivière Montmorency à l'aide de PHYSITEL	5
3.2 Intégration du bassin versant de la rivière Montmorency au modèle HYDROTEL	13
3.3 Calage du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency	19
3.3.1 Pas de temps journaliers	20
3.3.2 Pas de temps de 3 heures.....	27
4 Scénarios des crues printanières.....	35
4.1 Crues journalières à l'aide chroniques météorologiques.....	35
4.2 Crues journalières à l'aide de prévisions météorologiques	46
4.3 Crues aux 3 heures à l'aide de prévisions météorologiques.....	48
5 Conclusion et perspectives de travaux futurs	51
6 Références bibliographiques	53

LISTE DES FIGURES

Figure 3.1	Modèle Numérique d'altitude du bassin versant de la rivière Montmorency.....	6
Figure 3.2	Réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Montmorency	7
Figure 3.3	Directions générales d'écoulement à l'échelle des mailles du modèle.....	8
Figure 3.4	Segmentation en UHRH du bassin versant de la rivière Montmorency par PHYSITEL	10
Figure 3.5	Carte d'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Montmorency	11
Figure 3.6	Carte des types de sol par défaut sur le bassin versant de la rivière Montmorency	13
Figure 3.7	Intégration du bassin de la rivière Montmorency au modèle HYDROTEL	15
Figure 3.8	Localisation de la station hydrométrique (051001) à proximité de l'embouchure de la rivière Montmorency	20
Figure 3.9	Exemple de comparaison des débits mesurés et simulés pour le calage du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (année hydrologique 2006-2007 (a) ; 2007-2008 (b) ; pas de temps journalier).....	22
Figure 3.10	Exemple Comparaison des débits mesurés et simulés pour la validation du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (année hydrologique 2001-2002 (a) ; 2002-2003 (b) ; pas de temps journalier).....	23
Figure 3.11	Courbes de fréquence cumulée des débits mesurés et simulés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency pour l'ensemble des années hydrologiques (1998-2008)....	24
Figure 3.12	Courbes de récurrence des débits mesurés et simulés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency pour l'ensemble des années hydrologiques (1998-2008)	25
Figure 3.13	Distribution des erreurs absolues entre les débits moyens journaliers mesurés et simulés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency pour l'ensemble des années hydrologiques (1998-2008)	25
Figure 3.14	Positionnement des points de grille de données météorologiques sur le bassin de la rivière Montmorency	28
Figure 3.15	Exemple de comparaison des débits mesurés et simulés pour le calage du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (année hydrologique 2006-2007 (a) ; 2007-2008 (b) ; pas de temps de 3 heures)	30
Figure 3.16	Exemple de comparaison des débits mesurés et simulés pour la validation du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (année hydrologique 2001-2002 (a) ; 2002-2003 (b) ; pas de temps de 3 heures)	31
Figure 4.1	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 1998	36

Figure 4.2	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 1999	37
Figure 4.3	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2000	38
Figure 4.4	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2001	39
Figure 4.5	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2002	40
Figure 4.6	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2003	41
Figure 4.7	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2004	42
Figure 4.8	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2005	43
Figure 4.9	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2006	44
Figure 4.10	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2007	45
Figure 4.11	Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction des prévisions météorologiques journalières émises par Environnement Canada	47
Figure 4.12	Prévisions des crues au 3 heures à la station 051001 en fonction des prévisions météorologiques horaires aux points de grille émises par le CEHQ	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1	Pourcentage de couverture des classes d'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Montmorency	11
Tableau 3.2	Stations météorologiques associées aux simulations hydrologiques effectuées sur un pas de temps journalier	16
Tableau 3.3	Stations météorologiques associées aux simulations hydrologiques effectuées sur un pas de temps journalier	16
Tableau 3.4	Processus simulés et algorithmes disponibles pour les simulations hydrologiques	18
Tableau 3.5	Performances du modèle HYDROTEL pour la période de calage	22
Tableau 3.6	Performances journalières du modèle HYDROTEL pour la période de validation	23
Tableau 3.7	Performance journalières à long terme du modèle HYDROTEL (1998-2008).....	24
Tableau 3.8	Erreurs relatives et absolues moyennes pour différentes classes de débits moyens journaliers	26
Tableau 3.9	Erreurs relatives et absolues moyennes, lors de la fonte printanière, pour différentes classes de débits moyens journaliers	26
Tableau 3.10	Performances tri-horaires du modèle HYDROTEL pour la période de calage	30
Tableau 3.11	Performances tri-horaires du modèle HYDROTEL pour la période de validation	31
Tableau 3.12	Erreurs relatives et absolues moyennes pour différentes classes de débits sur un pas de temps de 3 heures	32
Tableau 3.13	Erreurs relatives et absolues moyennes, lors de la fonte printanière, pour différentes classes de débits sur un pas de temps de 3 heures	32

1 Sommaire exécutif

Dans le cadre de ce projet, l'INRS-ETE a construit les bases de données physiographiques nécessaires à la modélisation hydrologique avec le SIG PHYSITEL et étalonné le modèle hydrologique HYDROTEL sur la base des données hydrométéorologiques disponibles. L'INRS-ETE a produit également différents scénarios de crues printanières 2008 sur la base des données météorologiques disponibles ainsi que des prévisions à court terme. Fait à noter, l'INRS-ETE n'a pas mis en place un système de prévision hydrologique à proprement dit car cette expertise est celle du Centre d'expertise hydrologique du Québec (CEHQ). Qui plus est, l'INRS-ETE transférera au CEHQ, à la suite de ce projet, sa base de données PHYSITEL/HYDROTEL du bassin de la Montmorency afin que ce dernier l'intègre graduellement à son Système de prévision hydrologique (SPH ; Turcotte *et al.*, 2004), selon les modalités convenues entre la Ville de Québec et le CEHQ. Ceci étant dit, et ce, jusqu'à ce que l'intégration au SPH soit faite, l'INRS-ETE demeurera disponible à la Ville de Québec pour réaliser des études contractuelles spécifiques (événementielles) sur ce bassin.

À noter que dans le cadre de ce projet, l'INRS-ETE a travaillé en étroite collaboration avec la Ville de Québec, le CEHQ et le Conseil de bassin de la rivière Montmorency (CBRM). Ainsi, le CEHQ a fourni à l'INRS-ETE des grilles de prévisions météorologiques à court terme produites à partir des prévisions d'Environnement Canada ainsi que des équivalents en eau du couvert nival du bassin versant de la rivière Montmorency. Le CEHQ a également appuyé l'INRS-ETE dans la collecte des données hydrométéorologiques historiques. Enfin, le CBRM a collaboré avec l'INRS-ETE au niveau de la mise en commun d'informations nécessaires au bon déroulement de ce projet.

2 Mise en contexte

2.1 Problématique

Selon les personnes impliquées, la crue du 29 avril 2008 sur le bassin de la rivière Montmorency a illustré à quel point le déploiement des mesures de préparation et d'intervention d'urgence dépend de bonnes prévisions hydrologiques à court terme. En effet, une prévision de crue grossière impose d'inclure des marges de sécurité qui conduisent à mettre en place une logistique mobilisant des ressources humaines (ex. : pompiers et policiers, centres d'accueil aux sinistrés) et financières au-delà des besoins effectifs. En revanche, la sous-estimation d'une crue peut entraîner un sous-déploiement de ressources humaines pouvant avoir des conséquences très néfastes tant pour les riverains que pour leurs habitations.

La mise en place d'une modélisation hydrologique distribuée à un pas de temps adéquat (ex. : trois heures) permet de préciser le niveau des crues attendues, de mieux ajuster le degré d'intervention nécessaire (marges d'incertitude). En effet, il est possible, en tenant compte de bonnes conditions initiales du bassin versant (ex. : contenu en eau du couvert nival, le degré de saturation des sols, l'occupation du territoire, les types de sol) et de prévisions météorologiques à court et moyen termes, d'établir différents scénarios de débits de pointe et ainsi de mettre en place ou pas les mesures d'intervention en conséquence.

Les principaux risques associés à ce projet étaient : (i) le retard au niveau de l'acquisition des données hydrométéorologiques historiques; (ii) la qualité des informations sur les caractéristiques du couvert nival de 2008 (couverture spatio-temporelle de l'équivalent en eau); (iii) la qualité des données nécessaires à l'étalonnage de la modélisation hydrologique; et (iv) la disponibilité et l'accès dans un court délai aux données météorologiques horaires nécessaires à l'élaboration des scénarios prévisionnels de crues sur un pas de temps inférieur à celui de la journée. Le court temps de réponse de la Montmorency, de l'ordre d'une douzaine d'heures, impose cette contrainte temporelle.

2.2 Objectifs

L'INRS-ETE a développé au cours des 15 dernières années des outils performants de caractérisation physiographique des bassins versants et de mise en place de la modélisation hydrologique, en l'occurrence le système d'information géographique (SIG) PHYSITEL (Rousseau *et al.*, 2008 ; Royer *et al.*, 2006 ; Turcotte *et al.*, 2001) et le modèle hydrologique distribué HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001a, b ; Turcotte *et al.*, 2003). Ces outils sont d'ailleurs à la base du système de prévision hydrologique du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) qui, à notre connaissance, est le seul système opérationnel de prévision basé sur une modélisation hydrologique distribuée (Turcotte *et al.*, 2004). Le SIG PHYSITEL sert à la construction des bases de données hydrométéorologiques et physiographiques nécessaires à la mise en place d'HYDROTEL. L'objectif de ce projet porte sur l'implantation de ces outils (PHYSITEL et HYDROTEL) sur le bassin versant de la rivière Montmorency afin de reproduire et simuler les débits observés et de produire des scénarios de crue du printemps 2008, voire à plus long terme.

2.3 Organisation du rapport

Les trois prochains chapitres, (3, 4 et 5) présentent successivement la mise en place de la modélisation hydrologique (construction de la base de données et calage du modèle hydrologique) sur le bassin versant de la Montmorency, les différents scénarios de crues du printemps 2008 ainsi que la conclusion et la présentation de travaux futurs potentiels. Pour le lecteur non initié à la modélisation hydrologique, le chapitre 3 introduit quelques bases nécessaires à la compréhension de ce domaine.

Pour le gestionnaire, il va sans dire que le chapitre 4 démontre toute la pertinence de mettre en place un système de prévision hydrologique sur le bassin de la Montmorency. Ce chapitre se veut complet en soit et ne requiert pas la lecture du chapitre 3 pour en apprécier l'essentiel. En fait, la lecture seule du chapitre 4 illustre que la modélisation hydrologique aurait permis d'anticiper avec une très bonne justesse la crue du 29 avril 2008 et de mieux ajuster (à la baisse) le niveau d'intervention, et sans doute de réaliser des économies importantes.

3 Mise en place de la modélisation hydrologique distribuée

3.1 Discrétisation et caractérisation du bassin versant de la rivière Montmorency à l'aide de PHYSITEL

PHYSITEL (Rousseau *et al.*, 2008 ; Royer *et al.*, 2006 ; Turcotte *et al.*, 2001) est un SIG (système d'information géographique) dédié, développé afin de déterminer la structure d'écoulement d'un bassin versant en support à la modélisation hydrologique à l'aide du modèle HYDROTEL (Fortin *et al.*, 2001a, b ; Turcotte *et al.*, 2003). Pour permettre la détermination de la structure d'écoulement, PHYSITEL nécessite en entrée : un modèle numérique d'altitude (MNA) et une représentation vectorielle du réseau hydrographique. Également, tel qu'il est requis par le modèle HYDROTEL, les données spatiales d'occupation et du type de sol 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 d'un bassin en unités hydrologiques sur lesquelles sont simulés les divers processus d'écoulement de l'eau au sol.

Dans le cadre de l'intégration du bassin versant de la rivière Montmorency, nous avons eu recours à un MNA de 25 m de résolution. Le MNA a été créé à partir des feuillets d'altitudes disponibles gratuitement en ligne, sur le site du gouvernement canadien, *Géobase* (<http://www.geobase.ca/geobase/fr/>). Cette résolution assure une représentation suffisamment détaillée du bassin versant décrivant la variabilité spatiale de la topographie du bassin et du réseau hydrographique. Les données matricielles du MNA servent à la détermination de la pente et des orientations d'écoulement liées aux UHRH. La figure 3.1 présente le MNA du bassin versant de la rivière Montmorency.

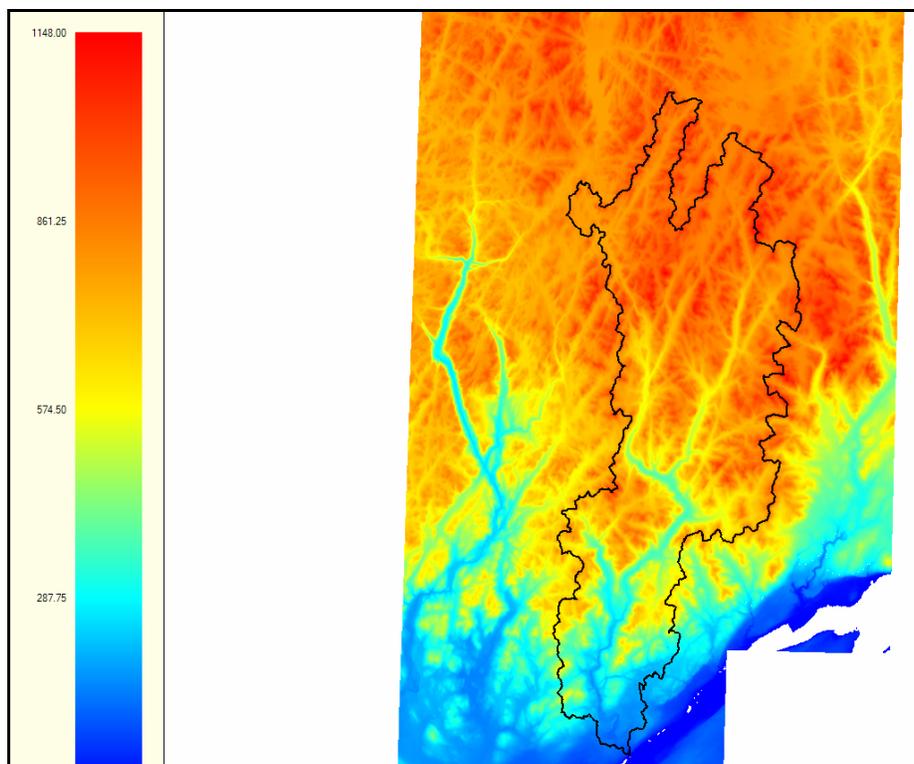


Figure 3.1 Modèle Numérique d'altitude du bassin versant de la rivière Montmorency

(Source : Géobase <http://www.geobase.ca/geobase/fr/>)

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 repérés 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 la rivière Montmorency peut être représenté ou reproduit par un nombre variable de tronçons qui restreignent ou accentuent la définition des UHRH. La figure 3.2 présente les ramifications du réseau hydrographique filamentaire à l'intérieur des limites du bassin versant de la rivière Montmorency. Ce réseau a été obtenu gratuitement sur le site de *Géobase* (<http://www.geobase.ca/geobase/fr/>).

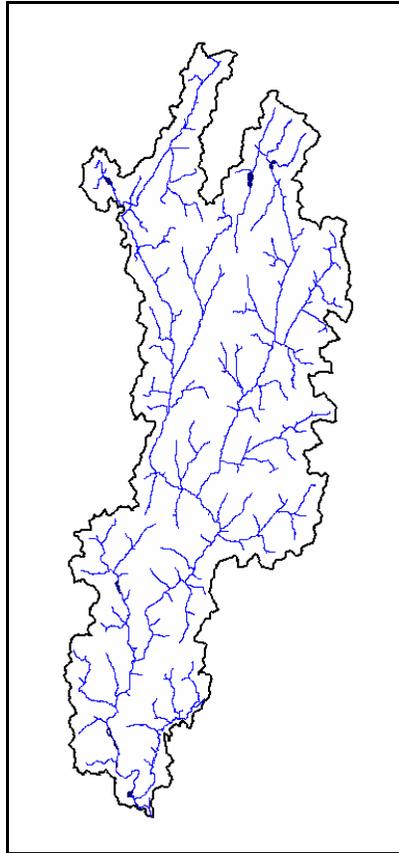


Figure 3.2 Réseau hydrographique du bassin versant de la rivière Montmorency

(Source : Géobase (<http://www.geobase.ca/geobase/fr/>))

L'étape suivante requise par PHYSITEL est la détermination d'altitudes modifiées sous le réseau hydrographique et sur les berges des cours d'eau. Ce processus permet de simplifier la structure d'écoulement et le drainage de l'eau de la partie terrestre jusqu'au cours d'eau. 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.

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. La figure 3.3 présente les directions d'écoulement sur l'ensemble du MNA et à l'exutoire du bassin versant de la rivière Montmorency.

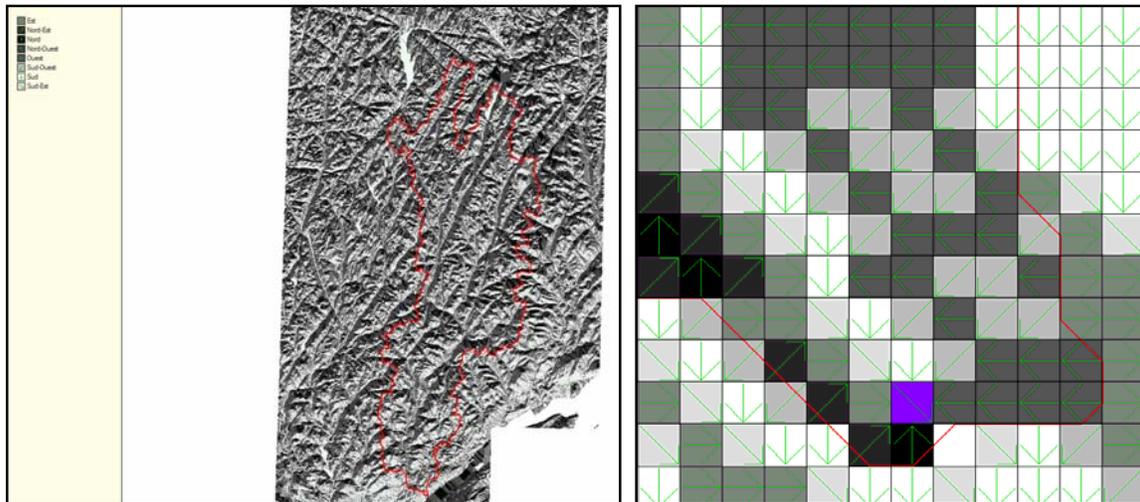


Figure 3.3 Directions générales d'écoulement à l'échelle des mailles du modèle
(le pixel en mauve est voisin de l'exutoire de la rivière Montmorency)

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. Les limites résultantes du bassin versant peuvent être modifiées par l'édition des directions d'écoulement afin d'assurer la superposition adéquate de l'occupation et du type de sol sur la région couverte par le bassin versant. Ce processus itératif prévient l'absence de données d'occupation et du type de sol à l'intérieur des limites du bassin versant.

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 découlent du seuil de pixel amont drainé fixé par l'utilisateur. 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 seuil élevée résulte en un réseau hydrographique et une distribution d'UHRH simplifiés. L'application actuelle présente un réseau hydrographique détaillé en accord avec le réseau de cours d'eau intégré. Conséquemment, le niveau de détail et l'arborescence du réseau

hydrographique régénéré supportent un nombre relativement élevé d'UHRH sur le bassin versant de la rivière Montmorency. Il est à 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 de façon satisfaisante le niveau de détail des cours d'eau initialement intégrés.

Le réseau nouvellement régénéré permet la segmentation du bassin versant en UHRH. Ces UHRH décrivent la segmentation du bassin versant de la rivière Montmorency en surface d'écoulement vers un tronçon du réseau hydrographique régénéré. Ainsi, chaque UHRH est associé à un tronçon unique.

La figure 3.4 démontre la segmentation du bassin versant de la rivière Montmorency en 366 UHRH d'une superficie moyenne de 300 ha. Cette discrétisation du bassin versant assure une représentation satisfaisante du réseau hydrographique et permet d'effectuer des simulations hydrologiques dans un délai de calcul raisonnable.

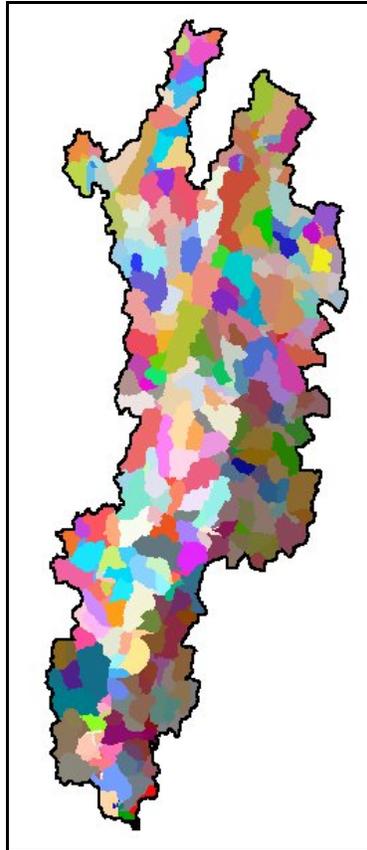


Figure 3.4 Segmentation en UHRH du bassin versant de la rivière Montmorency par PHYSITEL

Afin de compléter l'intégration du bassin versant au SIG PHYSITEL, l'occupation du territoire et le type de sol doivent être définis pour l'ensemble du bassin. La définition de l'occupation du sol sur l'ensemble du bassin versant découle de la cartographie canadienne de l'occupation terrestre disponible gratuitement sur le site du ministère de Ressources naturelles du Canada (<http://eosd.cfs.nrcan.gc.ca/>). Cette cartographie est disponible pour l'ensemble du Canada pour l'année 2000 et a été développée dans le contexte d'un projet sur l'observation de la terre pour le développement durable des forêts (OTDD). Suite à l'obtention de la classification de l'occupation du sol, certaines classes présentes sur la mosaïque canadienne ont été regroupées en classes plus générales afin de faciliter le calage ultérieur du modèle HYDROTEL. La figure 3.5 présente la classification résultante de l'occupation du sol sur le bassin pour l'année 2000. Le tableau 3.1 décrit les pourcentages occupés par chacune des classes sur le bassin.

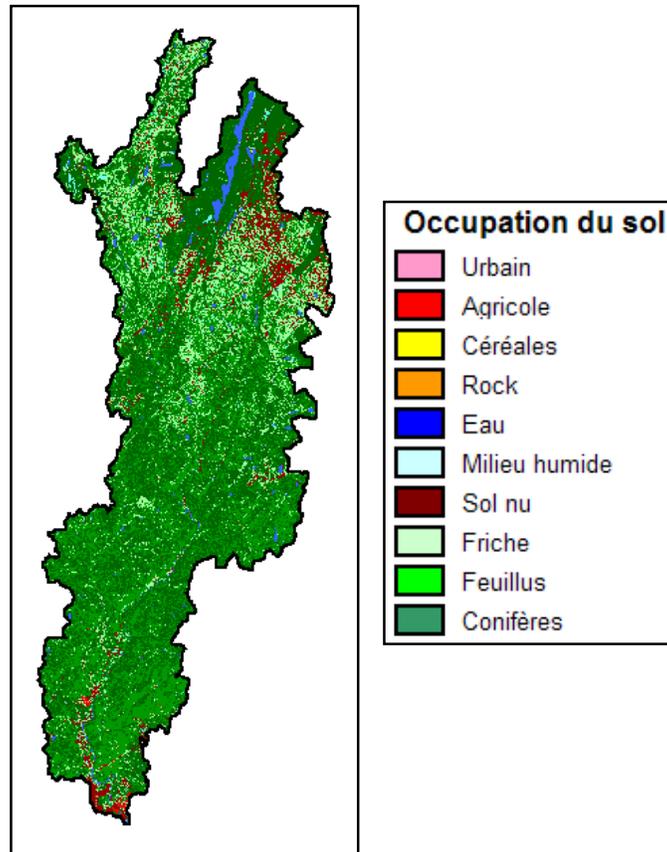


Figure 3.5 Carte d'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Montmorency

Tableau 3.1 Pourcentage de couverture des classes d'occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Montmorency

Classes d'occupation du sol	Montmorency Superficie (%)
Pâturage et foin	0,137 %
Eau	1,672 %
Milieu humide	0,842 %
Urbain ou sol nu	5,532 %
Friche	13,723 %
Feuillus	32,588 %
Conifères	45,507 %

Le tableau 3.1 démontre clairement que le bassin versant à l'étude est couvert principalement par le milieu forestier (en friche, feuillus, conifères). Globalement, le bassin est couvert à 92 % par des forêts conifériennes ou feuillues. La portion restante de la superficie totale, environ 8 %, est occupée par les autres classes comme les zones urbaines, les milieux humides et l'eau.

Finalement, le SIG PHYSITEL nécessite l'intégration des types de sol (pédologie) pour chaque UHRH. En raison de la disponibilité assez limitée de données sur les types de sol et du délai relativement restreint pour l'obtention de prévisions hydrologiques, il a été jugé raisonnable de créer une carte des types de sol à partir des classes d'occupation présentes sur le bassin versant. À noter que dans la version actuelle du modèle HYDROTEL, les caractéristiques hydrodynamiques des types de sol sont par défaut considérées constantes sur les différents horizons verticaux des sols. Pour des applications plus complexes, il est à noter qu'il est possible d'avoir différentes caractéristiques sur les différents horizons verticaux des sols. Des valeurs par défaut, basées sur les tables de Rawls et Brakensiek (1989), sont disponibles dans le SIG PHYSITEL et peuvent être attribuées aux caractéristiques des sols; par contre, l'utilisateur peut attribuer des valeurs plus appropriées. Dans le cas présent, c'est l'approche par défaut qui a été appliquée (figure 3.6). Par conséquent, les classes pâturages et foin, urbain, sol nu, friche, feuillus et conifères ont été associées au type de sol sable-loameux, la classe milieu humide a été associée au type de sol sable-argileux et la classe eau a été associée à la classe argile. Par la suite, le SIG PHYSITEL procède au calcul des propriétés hydrodynamiques des sols pour chacun des UHRH constituant le bassin versant. Ces propriétés sont déterminées en fonction des sols dominants sur chaque UHRH. Ainsi, les propriétés hydrodynamiques attribuées aux différents types de sol présents dans la table de Rawls et Brakensiek sont appliquées aux UHRH en fonction du sol dominant observé sur chacune.

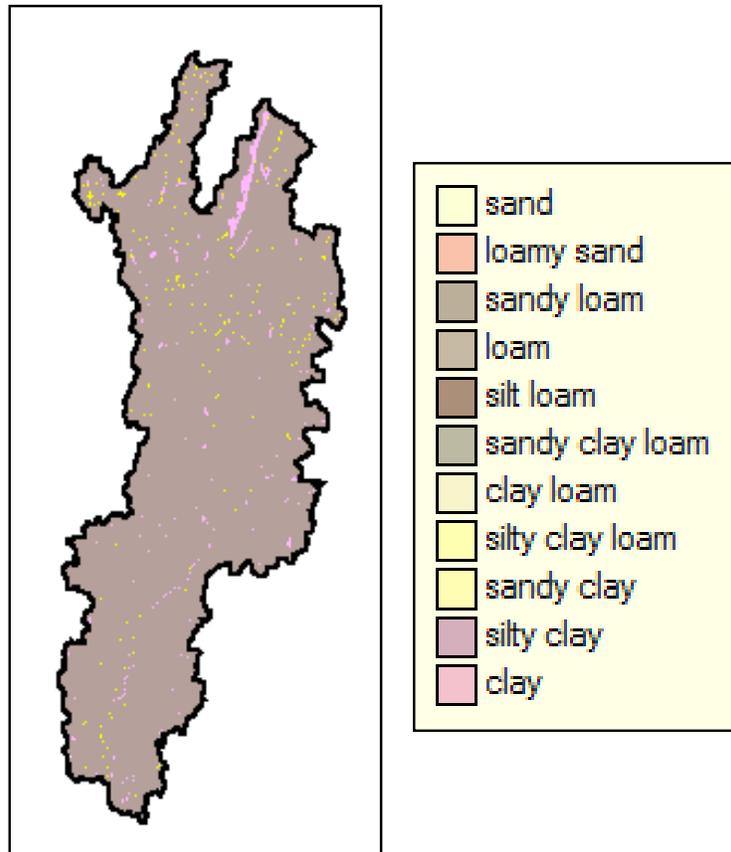


Figure 3.6 Carte des types de sol par défaut sur le bassin versant de la rivière Montmorency

L'intégration du bassin versant 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.

Finalement, PHYSITEL permet l'exportation et la création des fichiers d'entrée du modèle HYDROTEL.

3.2 Intégration du bassin versant de la rivière Montmorency au modèle HYDROTEL

Dans la présente étude, la modélisation hydrologique est effectuée par le modèle HYDROTEL. Ce modèle est utilisé afin de procéder à l'étalonnage de l'écoulement de l'eau sur le bassin versant de la rivière Montmorency. Suite à l'application du SIG PHYSITEL, le bassin versant de la rivière Montmorency a été intégré au modèle hydrologique HYDROTEL.

Ce dernier constitue un modèle hydrologique distribué compatible avec la télédétection et supporté par PHYSITEL. Les calculs effectués par le modèle sont réalisés 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 caractéristiques physiographiques du bassin à l'étude (topographie, occupation du sol, types de sol, etc.) et 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 ensemble intégré 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. À ces fichiers s'ajoutent deux fichiers supplémentaires portant sur l'évolution annuelle de la profondeur racinaire et de l'indice foliaire des cultures, le cas échéant. La figure 3.7 présente l'intégration du bassin versant de la rivière Montmorency au modèle HYDROTEL.

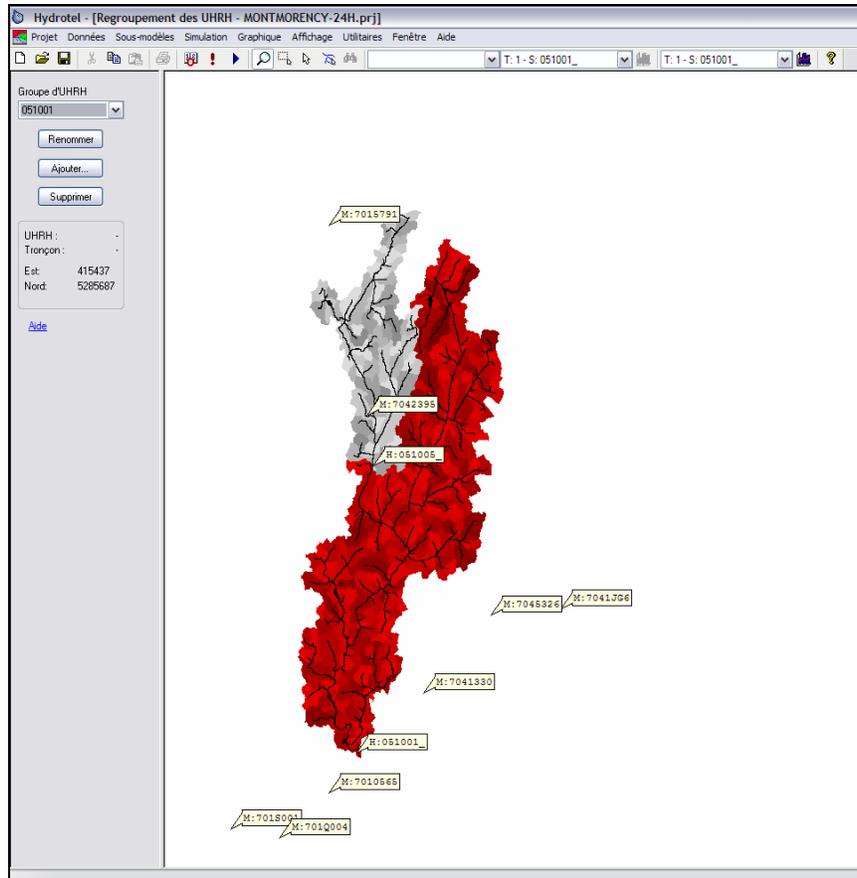


Figure 3.7 Intégration du bassin de la rivière Montmorency au modèle HYDROTEL

Il est à noter que les simulations hydrologiques effectuées sur un pas de temps journalier sont supportées par neuf stations météorologiques associées au bassin de la Montmorency. Il est à noter qu'une seule station est située à l'intérieur des limites du bassin. Le tableau 3.2 présente les différentes stations météorologiques prises en compte dans les simulations hydrologiques.

Tableau 3.2 Stations météorologiques associées aux simulations hydrologiques effectuées sur un pas de temps journalier

Stations météorologiques	# de la station	Latitude	Longitude	Altitudes	Mesures
FORÊT MONTMORENCY	7042395	47° 19.200' N	71° 09.000' O	673m	Horaires
BEAUPORT	7010565	46° 50.400' N	71° 12.000' O	10m	Horaires
CAP-TOURMENTE	7041JG6	47° 04.800' N	70° 46.800' O	6m	Horaires
CHÂTEAU RICHER	7041330	46° 58.200' N	71° 01.800' O	15m	Journalières
L'ETAPE	7015791	47° 33.600' N	71° 13.800' O	791m	Horaires
MONT STE-ANNE	7045326	47° 04.200' N	70° 54.600' O	168m	Journalières
QUEBEC/JEAN LESAGE	701S001	46° 47.400' N	71° 22.800' O	74m	Horaires
STE-FOY (U.LAVAL)	701Q004	46° 46.800' N	71° 17.400' O	91m	Horaires
VALCARTIER A	7018573	46° 54.000' N	71° 30.000' O	168m	Horaires

Les données météorologiques aux stations ont été obtenues gratuitement en ligne sur le site d'Environnement Canada (http://www.climat.meteo.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html). Par contre, seules les données journalières ou bilans quotidiens (disponibles sur l'ensemble de ces stations) présentent des valeurs de précipitations qui sont requises par le modèle HYDROTEL. Aussi, les données horaires disponibles sur le site d'Environnement Canada se limitent essentiellement à la température et sont insuffisantes à des fins de simulations hydrologiques sur un pas de temps horaire. En ce sens, lors des simulations hydrologiques sur un pas de temps de 3 heures, ces stations sont substituées par des points de grilles distribués uniformément sur l'ensemble du bassin versant. Les données météorologiques à ces points de grilles ont été générées par le CEHQ pour ensuite nous être transmises.

En complément, deux stations de mesures de débits en rivière peuvent être localisées sur le réseau hydrographique du bassin. Le tableau 3.3 introduit les différentes stations hydrométriques présentes sur le bassin. Celles-ci permettront la comparaison de débits simulés et mesurés afin d'évaluer la performance du modèle sur le bassin versant de la rivière Montmorency.

Tableau 3.3 Stations météorologiques associées aux simulations hydrologiques effectuées sur un pas de temps journalier

Stations hydrométriques	# de la station	Localisation
MONTMORENCY	051001	à 0,6 km en aval du barrage des Marches Naturelles
MONTMORENCY	051005	à 0,3 km en amont de la Blanche

Lors des travaux de calage du modèle HYDROTEL, seuls les débits mesurés à la station 051001 ont été considérés en raison de la trop grande incertitude liée aux mesures de débit à la station 051005, notamment en période hivernale. Les sommaires journaliers ainsi que les débits mesurés aux 15 minutes à la station 051001 nous été transmis par le CEHQ. Également, lors des prévisions journalières et sur un pas de temps de 3 heures, les données historiques des débits mesurés ont été obtenues gratuitement en ligne sur le site du CEHQ (<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=051001>).

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. Pour chacun des processus hydrologiques, HYDROTEL offre le choix entre un ou plusieurs algorithmes (Tableau 3.4). 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 exécutées à la fois sur un pas de temps journalier ou formant un 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 l'application actuelle fait référence à un pas de temps journalier à l'aide des stations météorologiques d'Environnement Canada, et à un pas de temps de 3 heures à l'aide des données météorologiques générées aux points de grilles par le CEHQ. Au tableau 3.4, les algorithmes de simulation des processus hydrologiques mis en évidence (caractères en gras) sont ceux qui ont été finalement retenus.

Tableau 3.4 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 3 stations les plus proches
2. Évolution du couvert nival:	2.1 Approche mixte (degrés-jour) et bilan énergétique
	3.1 Thornthwaite
3. Évapotranspiration potentielle :	3.2 Linacre
	3.3 Penman-Monteith
	3.4 Priestley-Taylor
	3.5 Hydro-Québec
	4.1 Bilan vertical en trois couches (BV3C)
4. Bilan d'eau vertical	4.2 CEQUEAU
	5.1 Onde cinématique
5. Écoulement sur la partie terrestre du bassin	6.1 Onde cinématique
6. Écoulement par le réseau hydrographique	6.2 Onde diffusante

Il peut être pertinent de faire le lien entre les processus hydrologiques, les UHRH et les tronçons du réseau hydrographique. Les quatre premiers processus sont simulés au niveau de chaque UHRH ; en d'autres termes, la distribution spatiale de ces processus à l'intérieur d'un bassin versant est réalisée au niveau de chaque UHRH. 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 (HGM) à chaque UHRH et généré par l'écoulement de pixel en pixel sur un UHRH d'une lame d'eau de référence. Il est important de noter que les flux entre les algorithmes qui simulent les cinq premiers processus hydrologiques sont réalisés au niveau des UHRH. Ainsi, le sous-modèle qui effectue le calcul de l'écoulement sur la partie terrestre du bassin reçoit à chaque pas de temps et au niveau de l'UHRH une lame d'eau qu'il distribue dans le temps en fonction de l'HGM précédemment estimé à partir de la structure spécifique d'écoulement interne à l'UHRH. Finalement, l'écoulement par le réseau hydrographique est simulé sur les tronçons du réseau. Les entrées de chaque tronçon proviennent alors du tronçon amont et des apports latéraux des UHRH connexes.

Avant de procéder au calage hydrologique, le modèle HYDROTEL permet de procéder à un regroupement d'UHRH tel qu'il est illustré à la figure 3.7 (surface en gris : ensemble des UHRH situées en amont de la station 051005; surface en rouge : portion restante du bassin

versant de la rivière Montmorency). À l'aide du modèle HYDROTEL, il est possible d'attribuer des valeurs individuelles pour certaines variables physiographiques ou météorologiques à chaque UHRH. Par contre, cette manœuvre est très coûteuse en temps et requiert une disponibilité très détaillée de données rarement discrétisées à ce niveau. En ce sens, il demeure acceptable de fournir des valeurs homogènes à ces variables à une plus grande échelle. Il est donc possible de former des groupes d'UHRH en fonction de la localisation de stations hydrométriques et de la connaissance de l'occupation et du type de sol d'un sous-bassin versant. Ainsi, il est alors envisageable de fournir les valeurs de certaines variables physiographiques et météorologiques spécifiques pour chacun des groupes d'UHRH créés. Dans le contexte actuel, l'ensemble des UHRH situé en amont de la station hydrométrique 051005 a été regroupé afin d'optimiser le calage hydrologique sur cette portion du bassin versant la rivière Montmorency. Par contre, lors de nos travaux de calage, très peu de modifications ont été apportées aux paramètres associés au regroupement d'UHRH, et ce, en raison de la grande incertitude liée aux débits mesurés à la station 051005. Par conséquent, les paramètres de calage associés au regroupement d'UHRH sur la portion amont du bassin versant diffèrent très peu de ceux associés à la portion restante du bassin versant de la rivière Montmorency liée à la station hydrométrique 051001 près de l'embouchure.

3.3 Calage du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency

L'application d'HYDROTEL nécessite de procéder au calage préalable du modèle. Ce calage permet essentiellement de vérifier la performance du modèle à simuler les débits mesurés en divers points du réseau hydrographique. Tel qu'il est mentionné, le calage du modèle HYDROTEL est effectué initialement sur un pas de temps journalier à l'aide des débits mesurés à la station 051001 (Figure 3.8) sur la base des observations météorologiques journalières disponibles aux stations d'Environnement Canada. Par la suite, ce calage est ajusté sur un pas de temps de 3 heures à l'aide des données météorologiques générées aux points de grille. Plus spécifiquement, le calage d'HYDROTEL est guidé par les travaux de Fortin *et al.* (2001b), Turcotte *et al.* (2003) et Lavigne (2007).

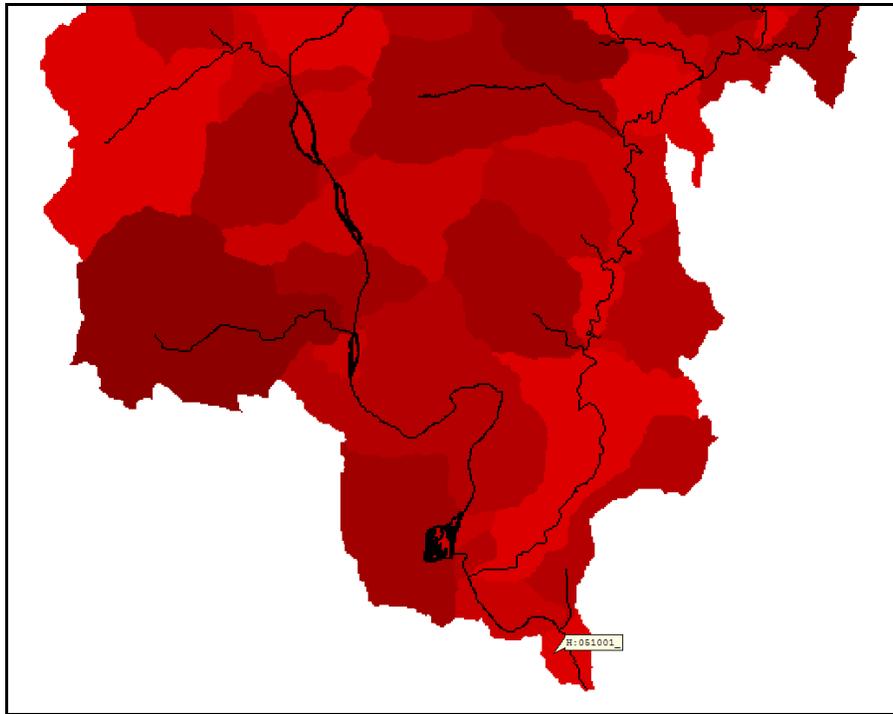


Figure 3.8 Localisation de la station hydrométrique (051001) à proximité de l'embouchure de la rivière Montmorency

3.3.1 Pas de temps journaliers

Le calage du modèle HYDROTEL est basé sur la comparaison des débits simulés et mesurés à la station hydrométrique (051001) située à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency. Les résultats de calage sur un pas de temps journalier démontrent une très bonne correspondance entre les débits mesurés et simulés, et ce, pour différentes années hydrologiques (octobre de l'année i à septembre de l'année $i+1$). À l'échelle du bassin versant, la période de calage fait référence aux années hydrologiques 2003-2008. Les résultats actuels découlent de l'optimisation manuelle des paramètres de calage du modèle. La validation temporelle du calage d'HYDROTEL fait référence aux années hydrologiques 1998-2003. Le choix des périodes de calage et de validation est influencé par :

- (i) la disponibilité des mesures hydrométriques à la station 051001 à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency;
- (ii) la volonté d'obtenir des prévisions de crues pour la fin du mois de mai 2008.

Également, la performance globale du modèle HYDROTEL a été résumée pour l'ensemble des années hydrologiques compris entre 1998 et 2008.

La figure 3.9 présente des exemples de résultats de calage à la station 051001 (années hydrologiques 2006-2007 et 2007-2008) tandis que le tableau 3.5 présente la performance du modèle, basée sur le critère de Nash-Sutcliffe, pour l'ensemble de la période de calage. Ce critère de performance est couramment utilisé pour vérifier la performance d'un modèle hydrologique. Les valeurs obtenues pour ce critère s'étendent de $-\infty$ à 1. Une valeur de 1 correspond à une représentation exacte des débits mesurés. Essentiellement, plus la valeur du critère s'approche de 1, plus le modèle est performant. Les figures 3.9a et 3.9b démontrent des simulations satisfaisantes des débits mesurés sur un pas de temps journalier à l'échelle du bassin versant. Au cours des deux années hydrologiques, les plus importantes crues printanières sont très bien représentées. Il est à noter que les écarts majeurs entre les débits simulés et mesurés surviennent essentiellement lors de l'amorce des crues printanières, ou encore lors d'événement de pluies d'importance en périodes automnale et estivale.

HYDROTEL semble par contre avoir une tendance à sous-estimer les pointes de crues associées à l'amorce de la fonte printanière; par contre, les plus fortes crues printanières sont bien représentées. Plus précisément, pour l'année 2008, le modèle HYDROTEL simule avec une assez bonne justesse la crue observée le 29 avril 2008. Ainsi, le débit moyen journalier simulé en cette date précise ($351 \text{ m}^3/\text{s}$) se rapproche du débit moyen mesuré ($381 \text{ m}^3/\text{s}$). Pour cette date précise, le modèle HYDROTEL sous-estime de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ le débit moyen journalier mesuré, soit une erreur relative de -7.9% . D'autre part, il peut être noté que certains événements de crue ne sont pas reproduits. Le défaut de simuler ces crues peut être lié à l'inexistence de données de précipitations météorologiques, ou encore à l'occurrence d'événements pluvieux locaux non détectés aux stations. En ce sens, il est pertinent de rappeler qu'une seule station météorologique est située à l'intérieur des limites du bassin versant.

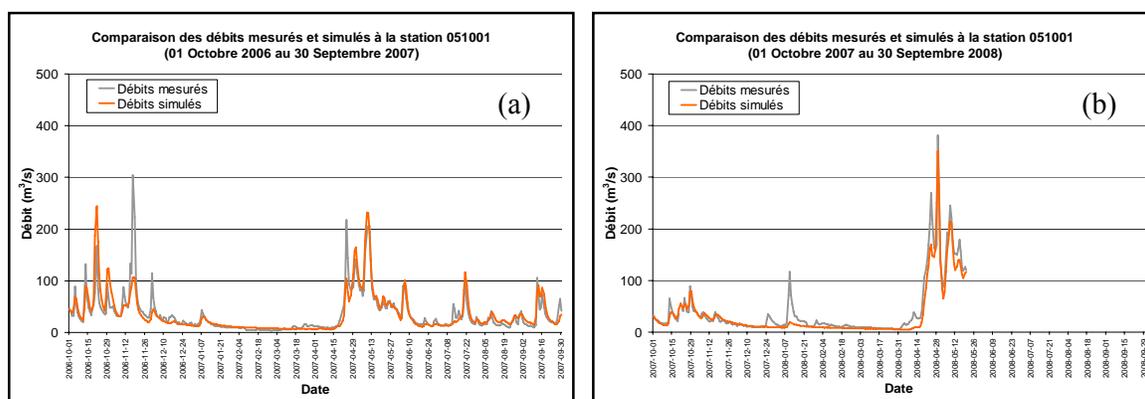


Figure 3.9 Exemple de comparaison des débits mesurés et simulés pour le calage du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (année hydrologique 2006-2007 (a); 2007-2008 (b); pas de temps journalier)

Tableau 3.5 Performances du modèle HYDROTEL pour la période de calage

	Période de calage (Années hydrologiques / 1 ^{er} octobre au 30 septembre)					
Nash-Sutcliffe	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	Total
	0,53	0,75	0,85	0,71	0,91	0,75

La figure 3.9 ainsi que le tableau 3.5 démontrent que le calage présente des résultats satisfaisants et relativement constants bien que l'année hydrologique 2003-2004 soit moins bien représentée. Les variations annuelles peuvent être attribuées à la synchronisation des pointes de crues, aux mesures hivernales de débit et aux données météorologiques erronées ou aux événements météorologiques non détectés.

La figure 3.10 présente des exemples de résultats de validation à la station 051001 à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency (années hydrologiques 2001-2002 et 2002-2003). De plus, le tableau 3.6 présente la performance du modèle, basé sur le critère de Nash-Sutcliffe, pour l'ensemble de la période de validation.

La figure 3.10 présente une correspondance relativement bonne entre les débits simulés et mesurés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency, et ce, en comparaison avec la période de calage. Par contre, les pointes de crues associées à des événements pluvieux sont quelque peu sous-estimées de même que pour les pointes de crues printanières pour l'année hydrologique 2001-2002. Ces tendances du modèle soulignent l'incertitude liée à la simulation de la fonte printanière du couvert nival.

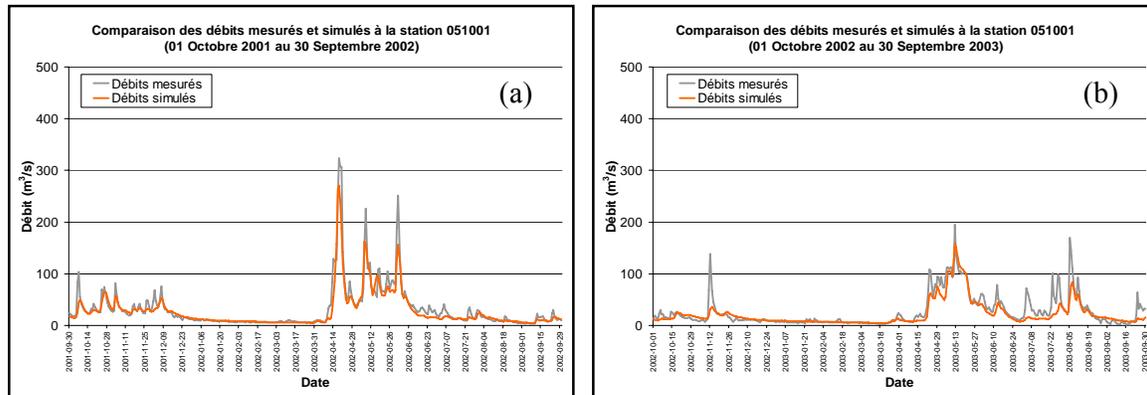


Figure 3.10 Exemple de comparaison des débits mesurés et simulés pour la validation du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (années hydrologiques 2001-2002 (a); 2002-2003 (b); pas de temps journalier)

Tableau 3.6 Performances journalières du modèle HYDROTEL pour la période de validation

	Période de validation (Années hydrologiques / 1 ^{er} octobre au 30 septembre)					
	1998-1999	1999-2000	2000-2001	2001-2002	2002-2003	Total
Nash-Sutcliffe	0,92	0,85	0,84	0,88	0,73	0,86

La figure 3.10 ainsi que le tableau 3.6 démontrent que les résultats de validation du modèle HYDROTEL performant aussi bien sinon mieux que pour la période de calage. À nouveau, les variations annuelles peuvent être attribuées à la synchronisation des pointes de crues et aux données météorologiques erronées ou aux événements météorologiques non détectés.

Finalement, le tableau 3.7 résume le comportement à long terme du modèle HYDROTEL, pour l'ensemble de la période 1998-2008. Le tableau 3.7 présente des performances, à long terme, du modèle HYDROTEL très satisfaisantes. Néanmoins, le modèle tend à sous-estimer les débits mesurés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency. Cette sous-estimation est fortement liée aux incertitudes des mesures de débit en présence d'un couvert de glace. Conséquemment, il est raisonnable d'affirmer que l'exercice de calage, sur pas de temps journalier, à l'échelle du bassin, est satisfaisant en regard des objectifs visant la prévision des crues. Il est très important de mentionner qu'en aucun temps les débits simulés ne sont ajustés en fonction des débits mesurés. En revanche, dans un contexte de système prévisionnel des crues, les débits simulés sont corrigés en fonction des débits mesurés afin d'obtenir une meilleure précision dans la prévision des crues. Dans le contexte des travaux actuels, de telles

corrections ne peuvent être considérées en raison de leurs complexités opérationnelles et du caractère itératif de telles manœuvres.

Tableau 3.7 Performances journalières à long terme du modèle HYDROTEL (1998-2008)

Critère de Performance	Résultats
Coefficient de détermination (R^2)	0,81
Critère de Nash-Sutcliffe	0,80
Lame d'eau annuelle mesurée (mm)	929
Lame d'eau annuelle simulée (mm)	811

Les résultats de performance globale d'HYDROTEL peuvent être appuyés par une représentation graphique des courbes de fréquence cumulée (Figure 3.11) et de récurrence (Figure 3.12) des débits simulés en fonction des débits mesurés pour l'ensemble des années hydrologiques.

Les figures 3.11 et 3.12 démontrent la très bonne correspondance entre la distribution des débits simulés et mesurés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency pour l'ensemble des années hydrologiques. Tel qu'il est mentionné, le modèle HYDROTEL tend à sous-estimer très légèrement les débits moyens journaliers.

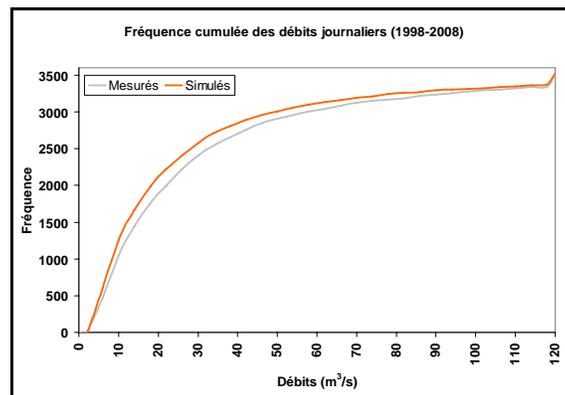


Figure 3.11 Courbes de fréquence cumulée des débits mesurés et simulés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency pour l'ensemble des années hydrologiques (1998-2008)

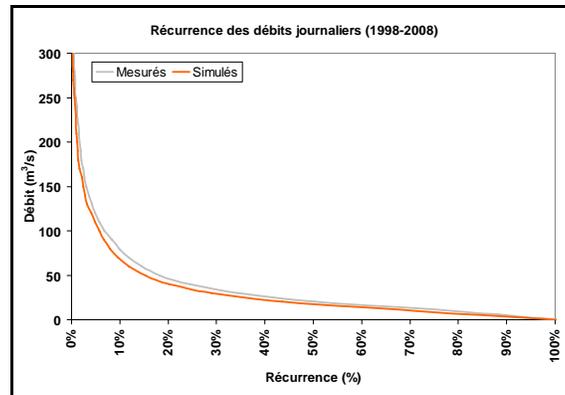


Figure 3.12 Courbes de récurrence des débits mesurés et simulés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency pour l'ensemble des années hydrologiques (1998-2008)

Afin de compléter l'analyse de la performance globale du modèle HYDROTEL, à l'échelle du bassin versant de la rivière Montmorency, la figure 3.13 présente la répartition des erreurs absolues pour l'ensemble des années hydrologiques.

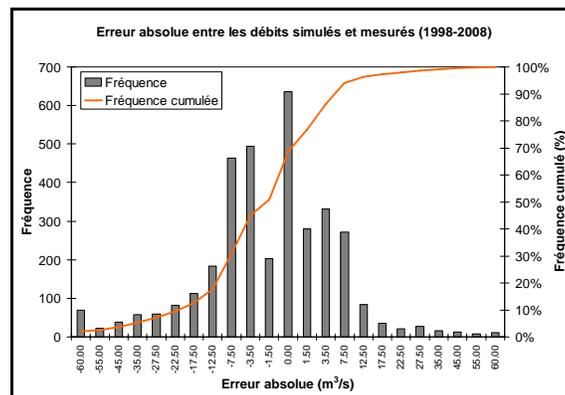


Figure 3.13 Distribution des erreurs absolues entre les débits moyens journaliers mesurés et simulés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency pour l'ensemble des années hydrologiques (1998-2008)

La figure 3.13 s'accorde également avec les remarques précédentes, à savoir qu'HYDROTEL tend à sous-estimer légèrement les débits moyens journaliers. En ce sens, la distribution des erreurs sur les débits moyens journaliers est légèrement décalée vers la gauche et, par conséquent, le modèle HYDROTEL sous-estime plus souvent les débits moyens journaliers mesurés qu'il ne les surestime. Néanmoins, 75 % des erreurs sur les débits sont distribuées entre $-7,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$. De plus, la figure 3.13 démontre clairement que la distribution des erreurs est relativement centrée entre $-3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est à noter que les valeurs en

abscisse représentent le centre des classes d'erreurs absolues. Également, les fréquences associées aux classes d'erreurs absolues de $-60 \text{ m}^3/\text{s}$ et $60 \text{ m}^3/\text{s}$ font référence aux dénombrements des erreurs inférieures à $-60 \text{ m}^3/\text{s}$ ou supérieures à $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Afin de préciser l'évaluation de l'erreur sur les débits moyens journaliers, il est possible de déterminer l'erreur relative et absolue pour des classes de débits précises. Ces erreurs pourront, par la suite, être appliquées aux prévisions et ainsi être prises en compte dans la planification des interventions d'urgence. Le tableau 3.8 présente les moyennes des erreurs relatives et absolues globales pour différentes classes de débits. Ces erreurs sont déterminées à partir des simulations sur l'ensemble des années hydrologiques (1998-2008).

Tableau 3.8 Erreurs relatives et absolues moyennes pour différentes classes de débits moyens journaliers

Erreur	Classes de débits			Globale
	D. $<100 \text{ m}^3/\text{s}$	$100 \text{ m}^3/\text{s} \leq \text{D.} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$	$300 \text{ m}^3/\text{s} \leq \text{D.}$	
Relative	-3,92 %	-17,81 %	-20,34 %	-4,88 %
Absolue	$-2,50 \text{ m}^3/\text{s}$	$-28,48 \text{ m}^3/\text{s}$	$-67,84 \text{ m}^3/\text{s}$	$-4,48 \text{ m}^3/\text{s}$

Le tableau 3.8 démontre essentiellement que les débits d'importance sont plus fortement sous-estimés par le modèle HYDROTEL. En ce sens, les erreurs sont plus importantes pour les fortes crues simulées. Afin d'approfondir cette étude sur les erreurs, il est également pertinent de déterminer les moyennes des erreurs relatives et absolues pour la période spécifique de la fonte du couvert de neige. Ainsi, le tableau 3.9 présente les moyennes des erreurs relatives et absolues pour les mois de mars, avril et mai, et ce, pour les mêmes classes de débits décrites au tableau 3.8.

Tableau 3.9 Erreurs relatives et absolues moyennes, lors de la fonte printanière, pour différentes classes de débits moyens journaliers

Erreur	Classes de débits			Globale
	D. $<100 \text{ m}^3/\text{s}$	$100 \text{ m}^3/\text{s} \leq \text{D.} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$	$300 \text{ m}^3/\text{s} \leq \text{D.}$	
Relative	-13,17 %	-11,15 %	-17,18 %	-12,92 %
Absolue	$-3,44 \text{ m}^3/\text{s}$	$-19,02 \text{ m}^3/\text{s}$	$-58,06 \text{ m}^3/\text{s}$	$-6,84 \text{ m}^3/\text{s}$

Le tableau 3.9 démontre notamment une meilleure représentation des débits supérieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ lors des mois de mars, avril et mai. Par contre, l'erreur demeure non négligeable

pour les plus fortes crues journalières pour cette même période. Ainsi, ces estimations d'erreurs pourront être prises en compte et considérées lors de la prévision des crues et débits journaliers. Il est pertinent de rappeler que ces erreurs sont très variables, par exemple, pour l'année en cours, la crue simulée en date du 29 avril présente une erreur de $30 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 7,9 %.

En résumé, les écarts majeurs entre les débits simulés et mesurés, à proximité de l'exutoire du bassin versant de la rivière Montmorency, surviennent essentiellement lors de l'amorce de la fonte du couvert nival, ou lors d'événements singuliers de pointe de crue. Cette sous-estimation peut être liée notamment au nombre très limité de stations météorologiques situées à l'intérieur des limites du bassin. De plus, ces écarts sont plus marqués pour les débits d'importance, et ce, pour l'ensemble de l'année. Ces observations soulignent certaines limitations du modèle HYDROTEL à reproduire des événements très localisés. Néanmoins, HYDROTEL offre une très bonne performance dans la simulation sur un pas de temps journalier des débits mesurés à proximité de l'exutoire. En effet, la synchronisation temporelle entre les crues mesurées et simulées est très bien représentée. Aussi, les plus importantes crues printanières sont, dans l'ensemble, bien représentées par le modèle. Également, les distributions des débits simulés et mesurés sont très similaires. Finalement, les écarts entre les débits mesurés et simulés sont concentrés entre $-3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Ainsi l'exercice de calage d'HYDROTEL à l'échelle du bassin demeure satisfaisant en regard des objectifs de prévision des crues journalières présentant un risque potentiel.

3.3.2 Pas de temps de 3 heures

Suite au calage du modèle HYDROTEL sur un pas de temps journalier, il est pertinent de vérifier la performance du modèle sur un pas de 3 heures, une période plus appropriée, compte tenu de la dynamique intrinsèque des écoulements de cette rivière. Les nouvelles simulations obtenues permettent la détection de crues d'importance dépassant la moyenne des débits journaliers. Lors de la période de fonte, ou encore en présence d'événements orageux localisés, ces crues peuvent présenter un niveau de risque considérable qui nécessite diverses interventions. Dans le cadre des travaux actuels, le calage d'HYDROTEL sur un pas de temps de 3 heures consiste essentiellement au raffinement du calage journalier présenté à la section précédente. Toutefois, les simulations hydrologiques sur un pas de temps de 3 heures sont

supportées par des données météorologiques générées pour divers points de grilles distribués uniformément à l'intérieur des limites du bassin versant. La figure 3.14 présente le positionnement de ces points de grilles à l'intérieur des limites du bassin versant de la rivière Montmorency.

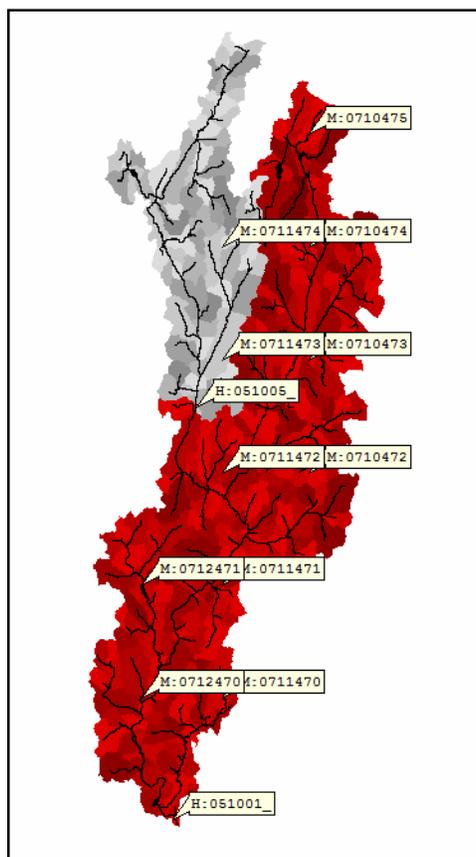


Figure 3.14 Positionnement des points de grilles de données météorologiques sur le bassin de la rivière Montmorency

Ces points de grilles agissent en quelque sorte comme stations météorologiques virtuelles pour lesquelles sont interpolées des données météorologiques sur un pas de temps de 3 heures. Ces données météorologiques ont été générées par le CEHQ. Il est à noter que les données et stations de référence pour l'interpolation aux points de grilles sont beaucoup plus restreintes que le nombre de stations météorologiques utilisées pour les simulations hydrologiques. Par conséquent, les données météorologiques résultantes sur un pas de temps de 3 heures présentent un niveau d'incertitude beaucoup plus élevé qui limite le calage du modèle à cette échelle temporelle. À nouveau, le calage du modèle HYDROTEL sur un pas de temps de trois heures est basé sur la comparaison des débits simulés et mesurés à la station

hydrométrique 051001 (Marches-Naturelles). Les résultats de calage sur un pas de temps de 3 heures démontrent une assez bonne correspondance entre les débits mesurés et simulés. Différentes années hydrologiques ont été également sélectionnées pour le calage du modèle. La période de calage fait référence aux années hydrologiques 2004-2008. Les résultats actuels découlent du raffinement des paramètres de calage optimisés manuellement et préalablement sur un pas de temps journalier. La validation temporelle du calage du modèle HYDROTEL sur un pas de temps de trois heures fait référence aux années hydrologiques 2001-2004. Le choix des périodes de calage et de validation a été déterminé en fonction de la disponibilité des données météorologiques aux points de grilles ainsi que par la volonté d'obtenir des prévisions de crues pour la fin du mois de mai 2008. La figure 3.15 présente des exemples de résultats de calage à la station 051001 à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency (années hydrologiques 2006-2007 et 2007-2008). Également, le tableau 3.10 présente la performance du modèle, basée sur le critère de Nash-Sutcliffe, pour l'ensemble de la période de calage. La figure 3.15 démontre une simulation assez satisfaisante des débits mesurés sur un pas de temps de 3 heures. Au cours des deux années hydrologiques, les plus importantes crues printanières sont très bien représentées. Plus spécifiquement, pour l'année 2008, le modèle HYDROTEL simule à nouveau, avec une bonne précision, la crue observée le 29 avril 2008 entre 21 h 00 et 24 h 00. En ce sens, le débit moyen simulé entre 21 h 00 et 24 h 00 en cette date précise ($406 \text{ m}^3/\text{s}$) s'apparente au débit moyen mesuré correspondant ($416 \text{ m}^3/\text{s}$). Ainsi, pour cette période précise, le modèle HYDROTEL sous-estime de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ le débit moyen mesuré entre 21 h 00 et 24 h 00, soit une erreur relative de $-2,4 \%$. Globalement, il est aussi à noter que les écarts majeurs entre les débits simulés et mesurés surviennent essentiellement lors d'événement de pluies d'importance en périodes automnale et estivale.

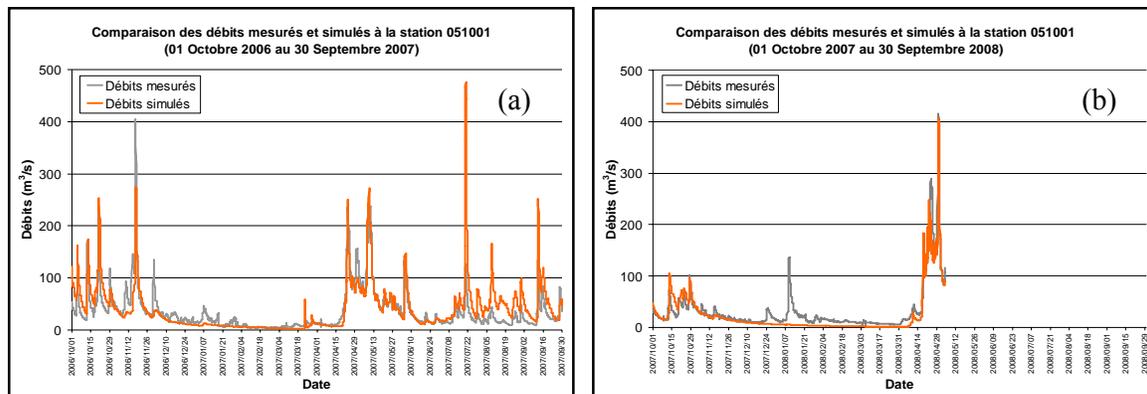


Figure 3.15 Exemple de comparaison des débits mesurés et simulés pour le calage du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (années hydrologiques 2006-2007 (a); 2007-2008 (b); pas de temps de 3 heures)

HYDROTEL offre une moins bonne stabilité sur un pas de temps de trois heures avec des séquences de surestimation ou sous-estimation des crues. Néanmoins, il est possible de noter une bonne représentation des fortes crues printanières. Toutefois, certains événements de crues ne sont pas reproduits. L'absence de telles crues peut être liée à l'inexistence de données de précipitations météorologiques, ou encore à l'occurrence d'événements pluvieux locaux non détectés aux points de grilles. En ce sens, il est pertinent de rappeler que l'interpolation aux points de grilles par le CEHQ fait référence à un nombre restreint de stations météorologiques situées à proximité du bassin versant.

Tableau 3.10 Performances tri-horaires du modèle HYDROTEL pour la période de calage

Période de calage (Années hydrologiques / 1 ^{er} octobre au 30 septembre)					
Nash-Sutcliffe	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	Total
	0,56	0,74	0,48	0,83	0,69

La figure 3.15 ainsi que le tableau 3.10 démontrent que le calage présente des résultats satisfaisants et relativement constants bien que l'année hydrologique 2004-2005 soit moins bien représentée. Les variations annuelles peuvent être attribuées à la synchronisation des pointes de crues, aux mesures hivernales de débit et à des données météorologiques imprécises, ou encore à des événements météorologiques non détectés. Enfin, il est possible de noter une diminution de la performance du modèle HYDROTEL sur un pas de temps de 3 heures en comparaison avec les résultats de calage sur un pas de temps journalier. Cette diminution s'explique en grande partie par l'incertitude liée aux données météorologiques interpolées aux points de grilles.

La figure 3.16 présente des exemples de résultats de validation à la station 051001 à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency (années hydrologiques 2001-2002 et 2002-2003). De plus, le tableau 3.11 présente la performance du modèle, basée sur le critère de Nash-Sutcliffe, pour l'ensemble de la période de validation.

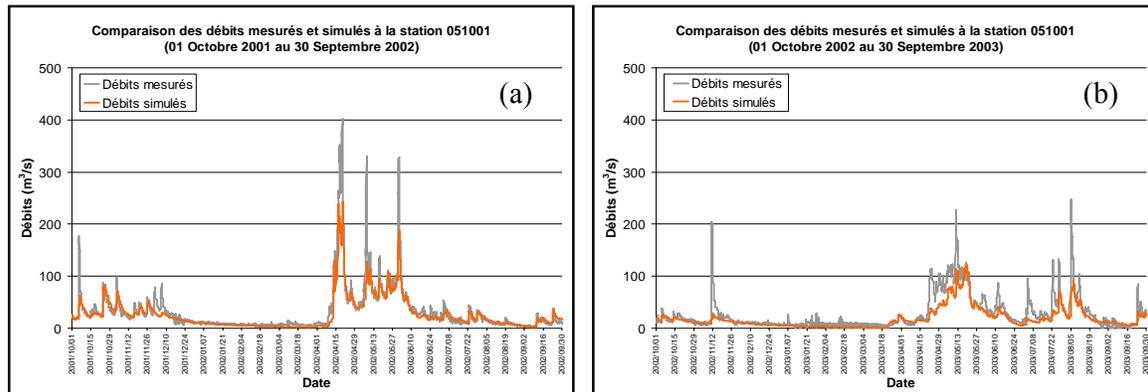


Figure 3.16 Exemple de comparaison des débits mesurés et simulés pour la validation du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (années hydrologiques 2001-2002 (a); 2002-2003 (b); pas de temps de 3 heures)

Tableau 3.11 Performances tri-horaires du modèle HYDROTEL pour la période de validation

Période de validation (Années hydrologiques / 1 ^{er} octobre au 30 septembre)				
Nash-Sutcliffe	2001-2002	2002-2003	2003-2004	Total
	0,82	0,61	0,45	0,63

La figure 3.16 présente une correspondance acceptable entre les débits simulés et mesurés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency, et ce, en comparaison avec la période de calage. Par contre, les pointes de crues associées à des événements pluvieux sont plus fortement sous-estimées de même que pour les pointes de crues printanières, et ce, plus fortement pour l'année hydrologique 2002-2003. Ces tendances du modèle soulignent l'incertitude liée à la simulation de la fonte printanière du couvert nival, et celle des données météorologiques interpolées.

La figure 3.16 ainsi que le tableau 3.11 démontrent que la validation du modèle HYDROTEL présente des résultats similaires ou quelque peu inférieurs à ceux obtenus pour la période de calage. À nouveau, les variations annuelles peuvent être attribuées à la synchronisation des pointes de crues et aux données météorologiques insuffisamment précises, ou à des événements météorologiques non détectés.

De même que pour les débits moyens journaliers, il est possible de préciser l'évaluation de l'erreur sur les débits sur un pas de temps de 3 heures. À nouveau, il est possible de déterminer l'erreur relative et absolue pour des classes de débits précises. Ces erreurs pourront, par la suite, être appliquées aux prévisions et ainsi être prises en compte dans la planification des interventions d'urgence. Le tableau 3.12 présente les moyennes des erreurs relatives et absolues globales pour différentes classes de débits sur un pas de temps de 3 heures. Ces erreurs sont déterminées à partir des simulations sur l'ensemble des années hydrologiques (2001-2008).

Tableau 3.12 Erreurs relatives et absolues moyennes pour différentes classes de débits sur un pas de temps de 3 heures

Erreur	Classes de débits			
	D. <100 m ³ /s	100 m ³ /s ≤ D. < 300 m ³ /s	300 m ³ /s ≤ D.	Globale
Relative	-5.79%	-21.14%	-35.54%	-6.87%
Absolue	-1,41 m ³ /s	-34,13 m ³ /s	-127,90 m ³ /s	-4,03 m ³ /s

De même que pour les débits moyens journaliers, le tableau 3.12 démontre essentiellement que les débits d'importance au pas de temps de 3 heures sont plus fortement sous-estimés par le modèle HYDROTEL. En ce sens, les erreurs sont plus importantes pour les fortes crues simulées. Afin d'approfondir cette étude sur les erreurs, il est également pertinent de déterminer les moyennes des erreurs relatives et absolues pour la période spécifique de la fonte du couvert de neige. Ainsi, le tableau 3.13 présente les moyennes des erreurs relatives et absolues pour les mois de mars, avril et mai, et ce, pour les mêmes classes de débits précédemment.

Tableau 3.13 Erreurs relatives et absolues moyennes, lors de la fonte printanière, pour différentes classes de débits sur un pas de temps de 3 heures

Erreur	Classes de débits			
	D. <100 m ³ /s	100 m ³ /s ≤ D. < 300 m ³ /s	300 m ³ /s ≤ D.	Globale
Relative	-17,22 %	-16,75 %	-36,18 %	-17,51 %
Absolue	-1,26 m ³ /s	-27,57 m ³ /s	-133,28 m ³ /s	-7,73 m ³ /s

Le tableau 3.13 démontre notamment une meilleure représentation des débits supérieurs à 100 m³/s et inférieurs à 300 m³/s lors des mois de mars, avril et mai. Par contre, l'erreur

demeure non négligeable pour les plus fortes crues aux 3 heures pour cette même période. Ainsi, ces estimations d'erreurs pourront être prises en compte et considérées lors de la prévision des crues et débits journaliers. Il est pertinent de rappeler que ces erreurs sont très variables, par exemple, pour l'année en cours, la crue simulée en date du 29 avril présente une erreur de $-10 \text{ m}^3/\text{s}$, soit 2,4 %.

Dans l'ensemble, les efforts de calage du modèle sur un pas de temps de trois heures ne permettent pas d'améliorer la simulation des débits mesurés à proximité de l'exutoire de la rivière Montmorency. Par contre, l'amplitude et la synchronisation des crues printanières sur un pas de temps de 3 heures sont généralement bien respectées, notamment pour l'année en cours. Ainsi, ces efforts de calage demeurent importants afin de détecter et prévoir les variations intra-journalières des débits lors des crues printanières présentant un risque potentiel.

4 Scénarios des crues printanières

Dans le cadre du projet actuel, diverses stratégies visent l'obtention de scénarios de crues printanières. Ces stratégies mobilisent, soit des chroniques météorologiques historiques disponibles aux diverses stations intégrées au modèle HYDROTEL, soit des prévisions météorologiques du temps à venir, les deux approches étant complémentaires.

Les résultats obtenus à l'aide des chroniques météorologiques constituent des scénarios prévisionnels possibles des crues printanières basées sur divers scénarios météorologiques observés dans le passé sur une période relativement longue. Ils permettent d'apprécier la réponse typique du bassin à divers événements météorologiques observés en utilisant les conditions initiales actuelles du modèle. En comparant la météo annoncée avec celle des divers scénarios de crue pré-simulés, on peut déjà se former une idée de la crue à venir. En cas de crue risquant de devenir problématique, il est alors pertinent de lancer une simulation prenant en compte la prévision météorologique. C'est la deuxième approche.

Le recours aux prévisions météorologiques tant journalières que sur un pas de temps de trois heures permet de prévoir la crue effective sur un laps de temps plus court se limitant aux jours à venir. Les descriptions plus détaillées des diverses stratégies de prévisions et les résultats qui en découlent sont présentées aux sections suivantes.

4.1 Crues journalières à l'aide de chroniques météorologiques

La prévision journalière à l'aide de chroniques météorologiques permet de dresser un portrait plus global des crues possibles pouvant être observées à proximité de l'exutoire (station 051001, Marches-Naturelles) du bassin versant à partir de conditions initiales actualisées au 9 mai 2008. Cette méthode fait appel aux données météorologiques historiques disponibles aux diverses stations météorologiques influençant le bassin versant à partir de la date d'initialisation des scénarios (9 mai). Suite à l'amorce du projet et à l'observation d'une crue d'importance le 29 avril 2008, il a été déterminé que les chroniques météorologiques s'étendraient du 9 mai au 30 juin pour chacun des scénarios annuels. Ainsi, dix scénarios basés sur les chroniques météorologiques disponibles aux neuf stations ont été générés.

Chacun de ces scénarios fait référence aux données météorologiques historiques disponibles. Par exemple, pour le scénario 1998, les données disponibles à chacune des neuf stations météorologiques entre le 9 mai 1998 et 30 juin 1998 ont été imposées aux stations pour la séquence hydrologique prévisionnelle comprise entre ces dates. Il a donc été possible de générer dix scénarios météorologiques intégrant les données des années 1998 à 2007. Les figures suivantes présentent les résultats de prévision de crues journalières pour chacun de ces scénarios. Les résultats incluent les conditions météorologiques sous-jacentes.

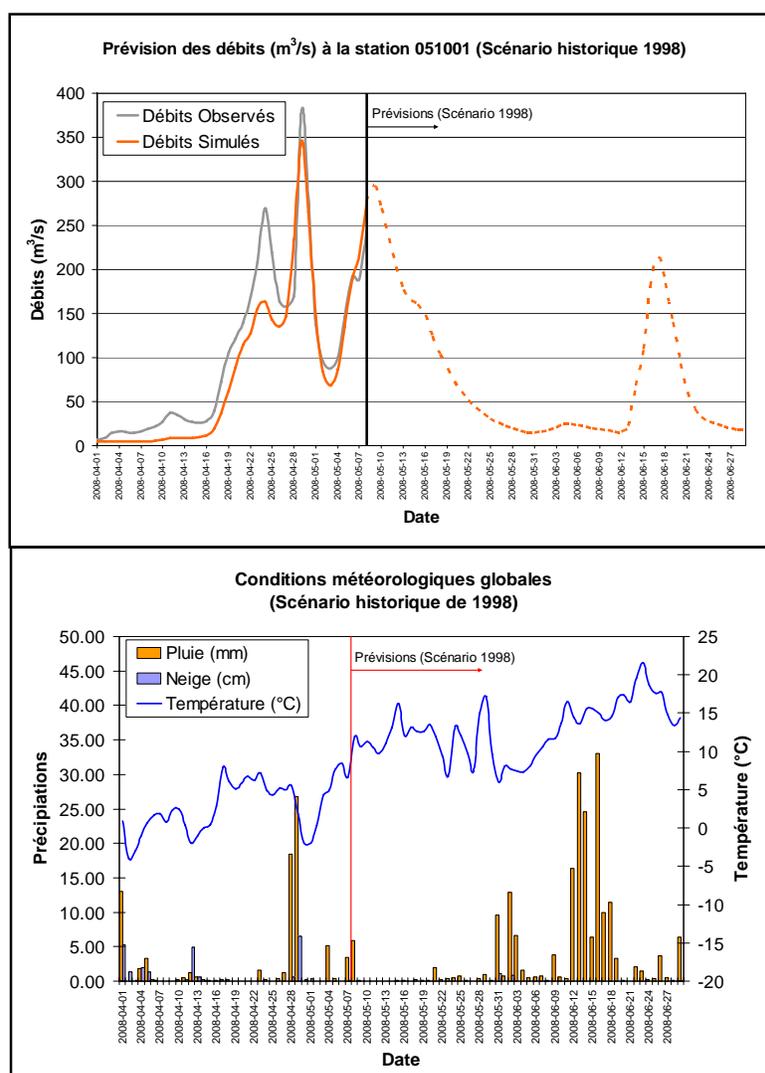


Figure 4.1 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 1998

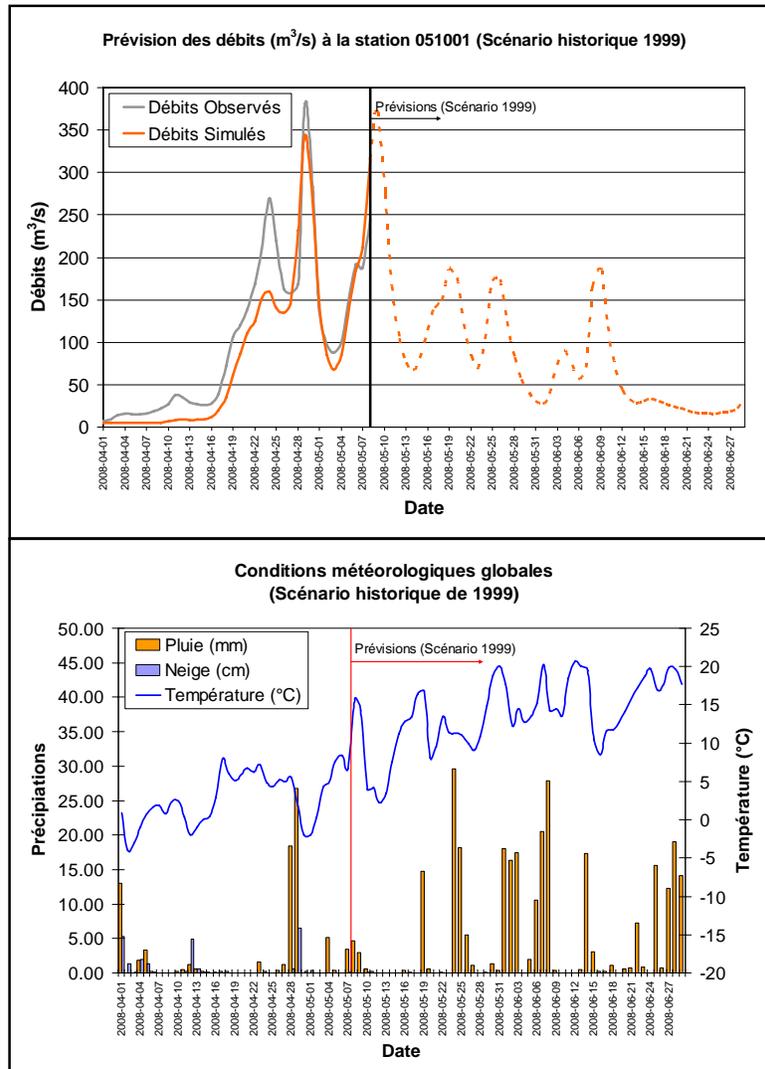


Figure 4.2 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 1999

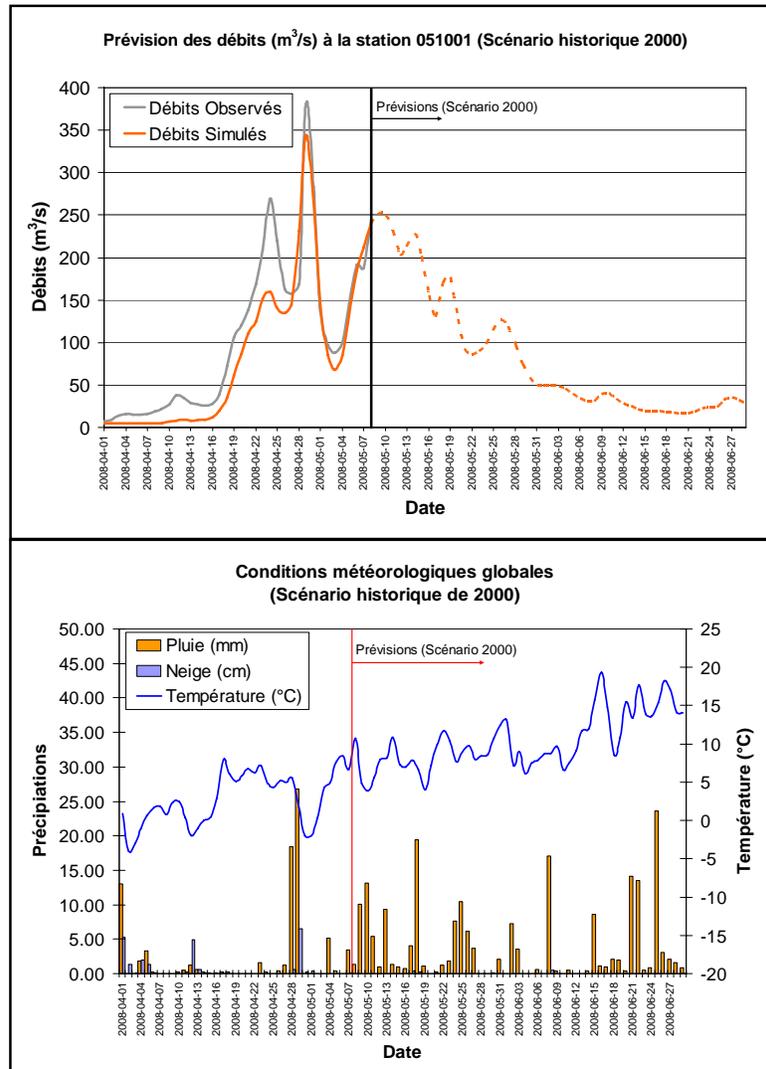


Figure 4.3 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2000

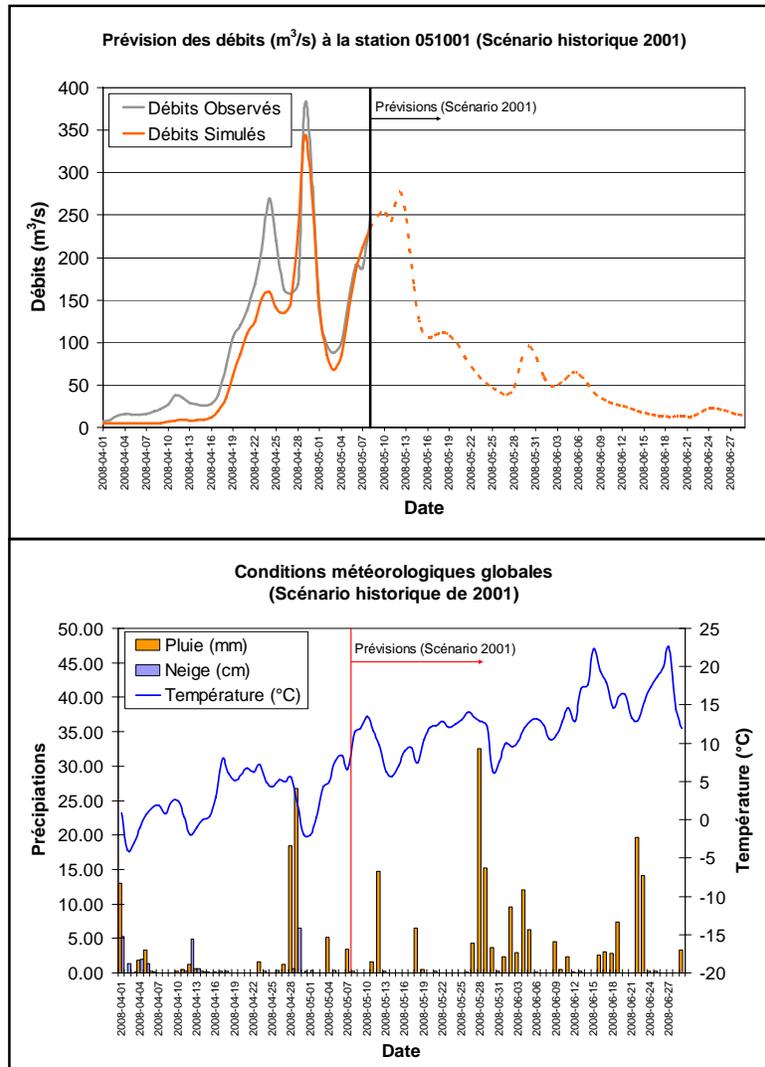


Figure 4.4 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2001

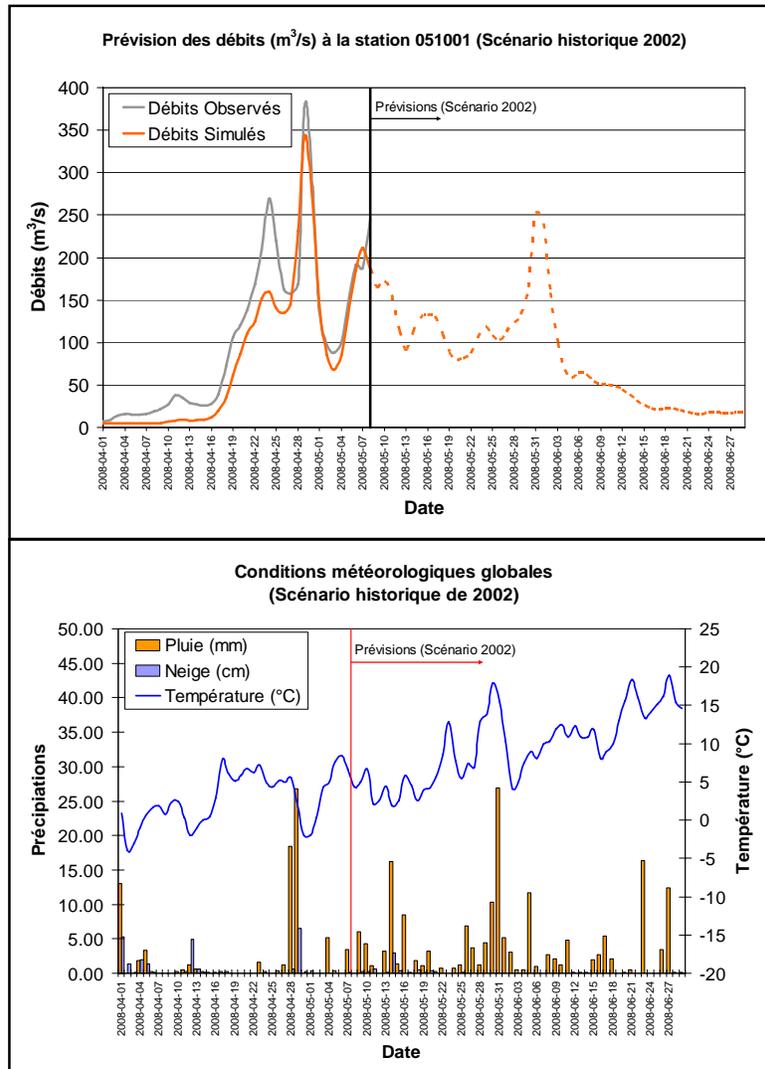


Figure 4.5 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2002

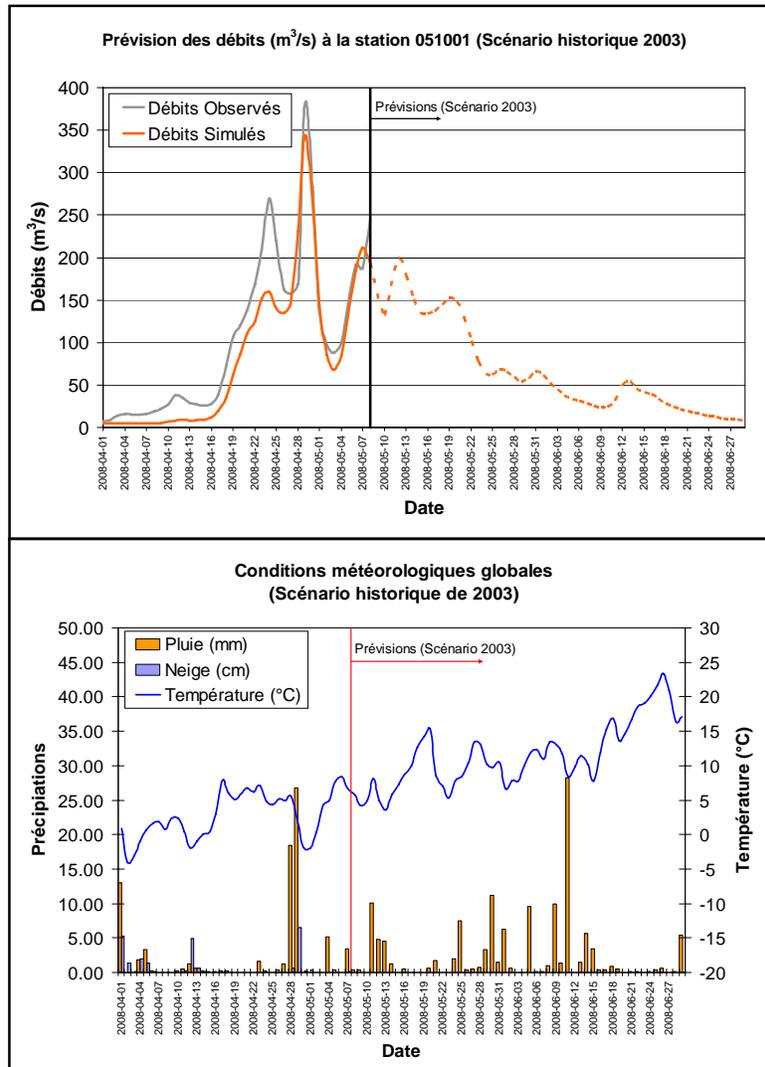


Figure 4.6 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2003

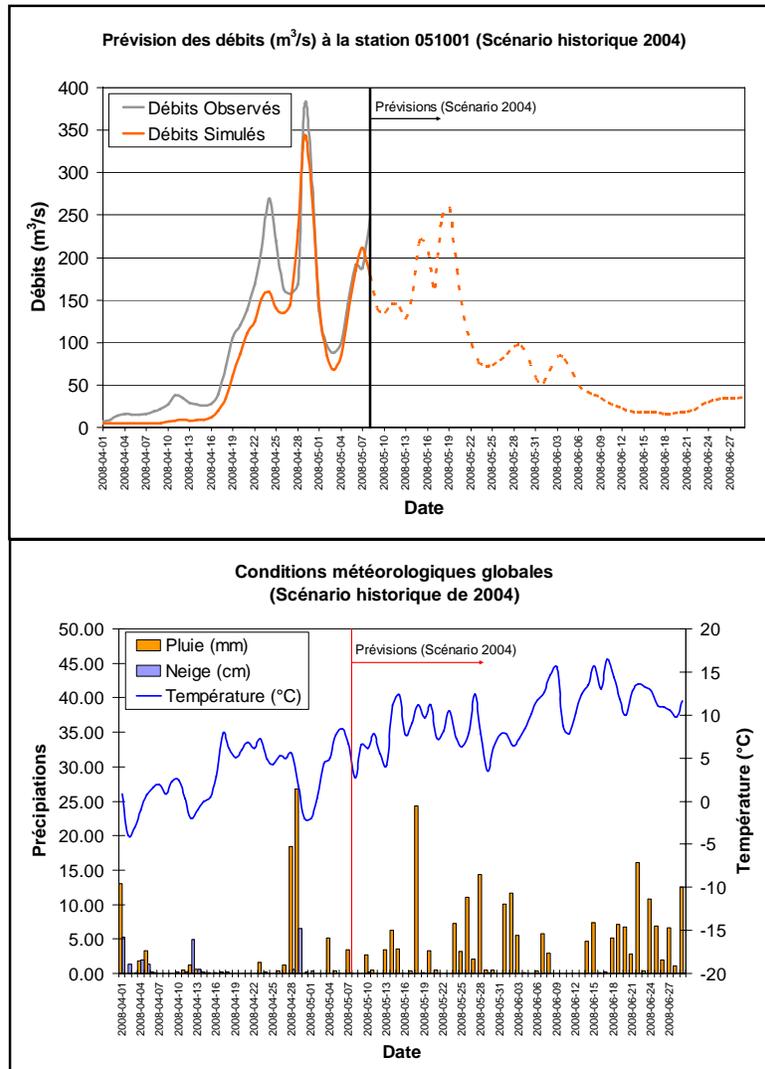


Figure 4.7 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2004

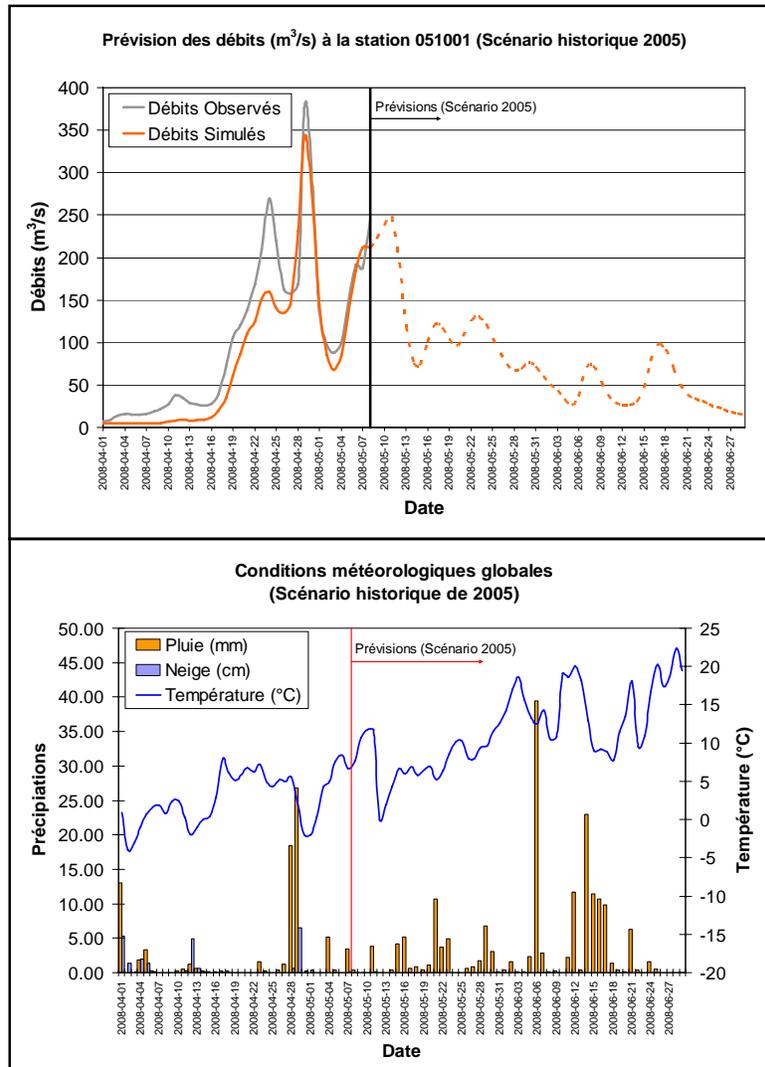


Figure 4.8 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2005

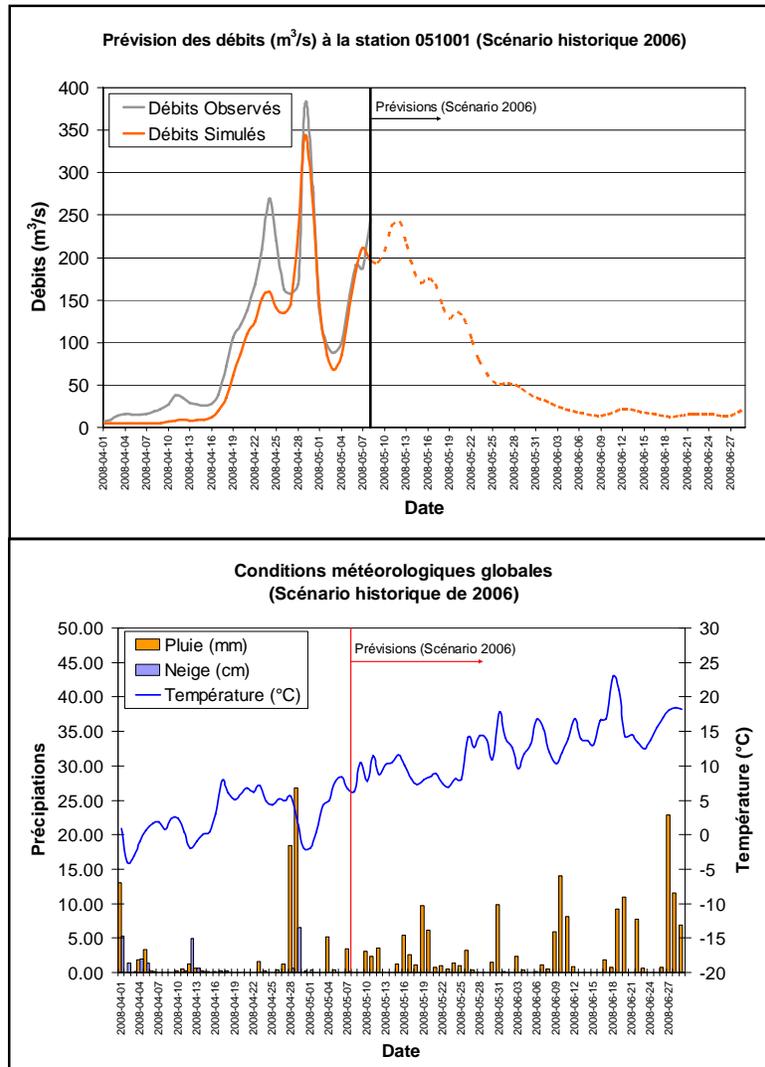


Figure 4.9 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2006

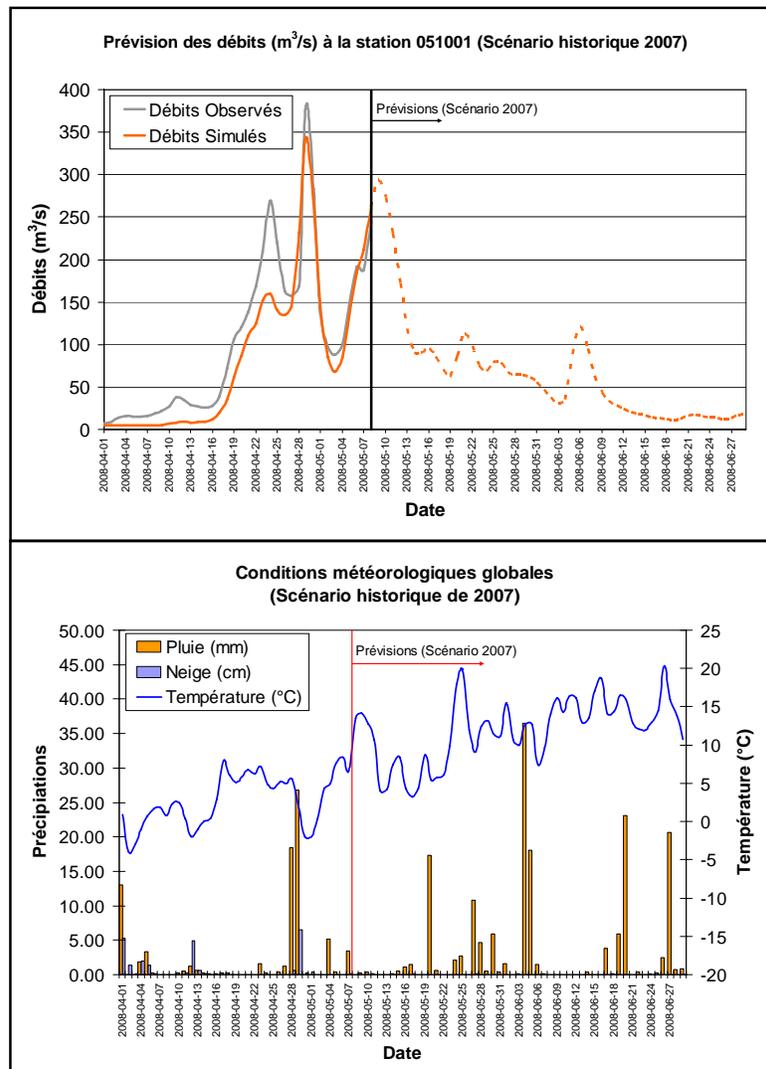


Figure 4.10 Prévisions des crues journalières à la station 051001 en fonction du scénario météorologique de 2007

Les différents scénarios de chroniques météorologiques dressent un ensemble de prévisions de crues journalières pour la période entre le 9 mai 2008 et le 30 juin 2008. À l'aide de ces prévisions, il est intéressant de vérifier l'importance des crues maximales associées aux divers scénarios. Ainsi, la plus importante crue journalière maximale s'élève à $372 m^3/s$ pour le scénario faisant référence aux chroniques météorologiques de l'année 1999. Inversement, la plus faible crue journalière maximale s'élève à $199 m^3/s$ pour le scénario faisant référence aux chroniques météorologiques de l'année 2003. Il est à noter que la moyenne des crues journalières maximales est de $269 m^3/s$ pour l'ensemble des scénarios météorologiques. Cette méthode de prévision des crues permet de dresser un portrait hypothétique global des crues journalières probables sur une période plus longue en se basant sur des scénarios

météorologiques réels. Ces résultats contribuent également à l'évaluation sommaire du risque inhérent à l'occurrence de crues extrêmes pouvant occasionner des dommages ou nécessitant diverses interventions.

4.2 Crues journalières à l'aide de prévisions météorologiques

L'obtention de crues journalières à l'aide de prévisions météorologiques se limite à un horizon temporel plus restreint s'étendant aux jours à venir. Cette méthode fait appel aux prévisions météorologiques émises par Environnement Canada et disponibles en ligne pour les cinq jours à venir. Il est à noter que les quantités de précipitations anticipées se limitent aux 24 prochaines heures. Par conséquent, les précipitations annoncées au-delà des 24 prochaines heures doivent être estimées. Aussi, ces prévisions sont émises pour la station de l'aéroport Jean-Lesage de Québec et sont par la suite distribuées sur l'ensemble des stations météorologiques supportant les simulations hydrologiques. Ainsi, il est possible d'effectuer des prévisions de crues journalières pour une période future de cinq jours, mais plus spécifiquement pour les 24 prochaines heures. Cette méthode peut être appliquée sur une base journalière en prenant soin de mettre à jour les données météorologiques aux stations disponibles gratuitement en ligne. Cette procédure a été appliquée pour certaines dates précises entre les 9 et 27 mai 2008. La figure 4.11 présente les dernières prévisions de crues obtenues entre les 27 et 31 mai 2008.

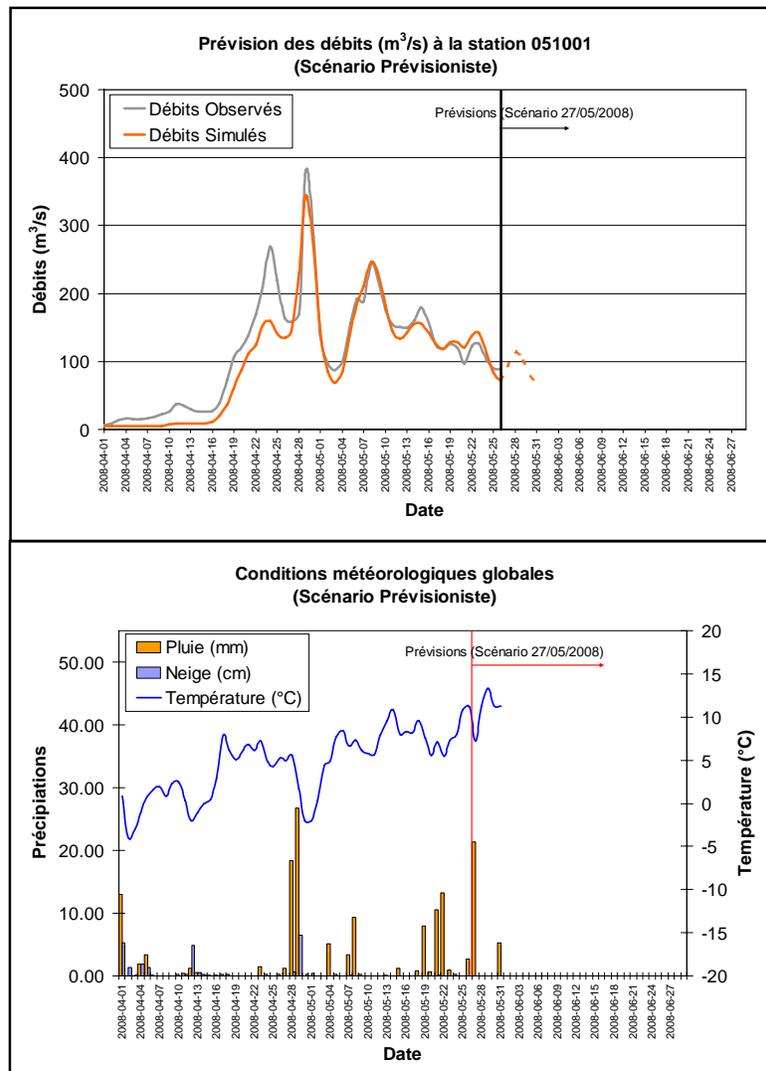


Figure 4.11 Prévissions des crues journalières à la station 051001 en fonction des prévissions météorologiques journalières émises par Environnement Canada

Lors de cette période, il est possible d'observer des précipitations relativement importantes en date du 27 mai 2008 qui sont associées à une augmentation du débit à proximité de l'exutoire. Cette augmentation s'exprime par une crue de 114 m³/s en date du 28 mai 2008. Ces résultats de prévision démontrent la possibilité d'utiliser le modèle HYDROTEL comme outil de prévision des crues journalières à la station de mesure de débit #051001 opérée par le CEHQ. Aussi, il est raisonnable d'affirmer que le modèle HYDROTEL aurait été en mesure de prédire la crue journalière du 29 avril 2008 avec une précision acceptable selon la qualité des prévissions météorologiques émises par Environnement Canada. Par conséquent, dans le contexte d'un système automatisé de prévissions des crues, il serait possible d'effectuer une estimation journalière du débit en rivière et des crues à risque potentielles.

4.3 Crues aux 3 heures à l'aide de prévisions météorologiques

L'obtention de crues sur un pas de temps de 3 heures à l'aide de prévisions météorologiques se limite également à un horizon temporel plus restreint s'étendant aux jours à venir. Cette méthode fait appel aux prévisions météorologiques émises par le CEHQ aux points de grilles uniformément distribués à l'intérieur des limites du bassin versant de la rivière Montmorency. Il est à noter que ces prévisions météorologiques sont générées à partir de prévisions émises pour diverses stations intégrées au SPH mis en place par le CEHQ. Ces stations diffèrent notamment des stations météorologiques intégrées au modèle HYDROTEL dans un contexte de simulation des débits ou crues journaliers. Les données de prévisions disponibles aux divers points de grilles incluent les températures maximale et minimale ainsi que les précipitations distribuées sur un pas de temps de 3 heures. Il est à noter que le système de prévision des crues développé par le CEHQ est également opéré sur un pas de temps de trois heures. De même que pour les prévisions journalières, il est possible d'effectuer des prévisions de crue sur un pas de temps de 3 heures pour une période future de plus ou moins cinq jours dépendant de la portée des prévisions météorologiques déterminées par le CEHQ. Cette méthode pourrait être appliquée sur une fréquence journalière en prenant soin de mettre à jour les données et prévisions météorologiques aux points de grilles. Cette procédure a également été appliquée pour certaines dates précises entre les 9 et 27 mai 2008. La figure 4.12 présente les dernières prévisions de crues obtenues entre les 27 et 31 mai 2008.

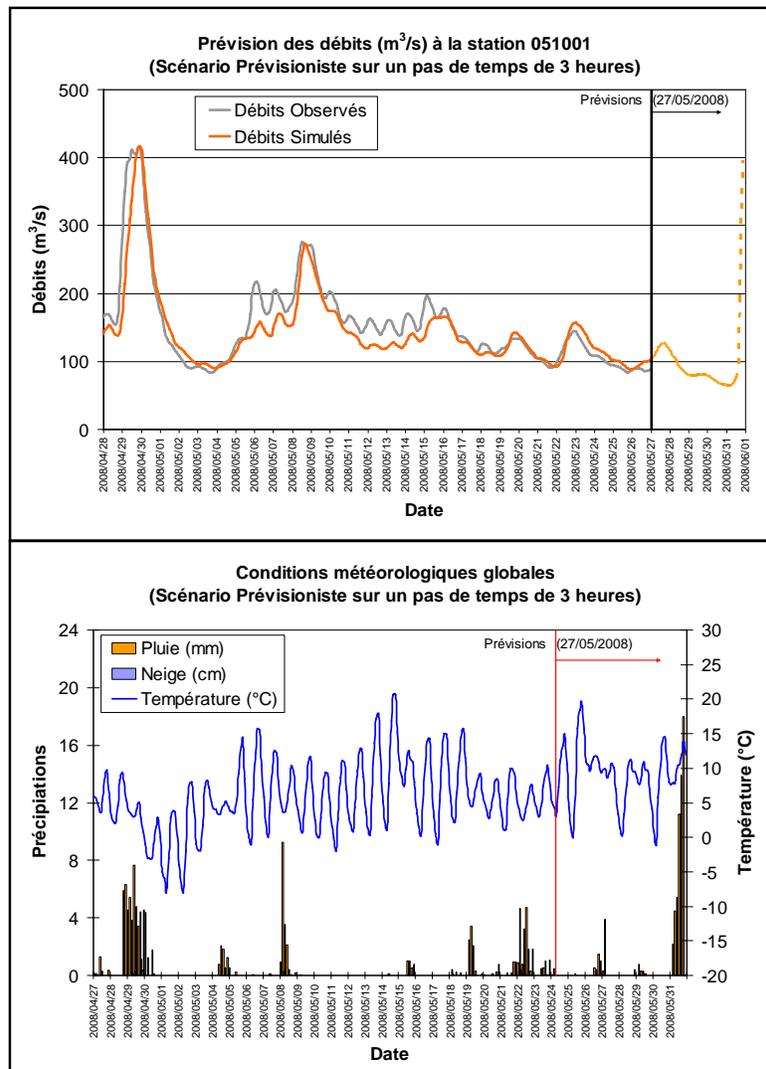


Figure 4.12 Prévissions des crues au 3 heures à la station 051001 en fonction des prévissions météorologiques horaires aux points de grilles émises par le CEHQ

Lors de cette période, il est possible d'observer des précipitations relativement importantes en date du 31 mai 2008 qui sont associées à une augmentation du débit à proximité de l'embouchure. Cette augmentation s'exprime par une crue de $396 \text{ m}^3/\text{s}$ en date du 31 mai 2008 entre 21 h et 24 h. Par contre, cette crue importante est associée à des prévissions de précipitations relativement incertaines en raison de leur horizon temporel important par rapport à la date de référence. Inversement, il est possible de croire que le modèle HYDROTEL aurait été en mesure de prédire la crue observée le 29 avril 2008 entre 21 h et 24 h, et ce, avec une assez bonne précision (voir page 27). Par contre, la précision d'une telle prédiction aurait été alors dépendante de la qualité des prévissions météorologiques déterminées aux points de grilles par le CEHQ. Par conséquent, les résultats

de prévisions sur un pas de temps de 3 heures tendent à démontrer la possibilité d'utiliser le modèle HYDROTEL comme outil de prévision des crues aux 3 heures à la station de mesure de débit #051001. Par conséquent, l'étalonnage du modèle HYDROTEL et les résultats obtenus au pas de temps de 3 heures constituent un outil pertinent dans le contexte d'un système automatisé de prévision des crues, tel que celui développé par le CEHQ. De plus ce système permet une correction en continu des débits simulés en fonction des mesures disponibles. Ces corrections permettent notamment de raffiner les prévisions de crues sur un pas de temps inférieur à celui de la journée.

5 Conclusion et perspectives de travaux futurs

Suite à la crue importante du 29 avril 2008 et face au besoin réel de l'obtention de prévisions hydrologiques sur le bassin de la rivière Montmorency, l'équipe de l'INRS-ETE a procédé à l'implantation complète du modèle HYDROTEL sur ce bassin versant.

Cette implantation comprend premièrement la construction des bases de données nécessaires à la modélisation hydrologique à l'aide du SIG PHYSITEL, et deuxièmement, l'étalonnage du modèle HYDROTEL en fonction des données hydrométéorologiques disponibles. Plus précisément, l'étalonnage du modèle HYDROTEL a été effectué à la fois sur des pas de temps journaliers, et aux 3 heures. Les différents pas de temps résultent de la disponibilité des données météorologiques.

Pour le pas de temps journalier, les données météorologiques sont disponibles à neuf stations d'Environnement Canada décrivant les conditions de températures et de précipitations sur le secteur du bassin de la rivière Montmorency. Par contre, les simulations sur un pas de temps de 3 heures font référence à des données météorologiques interpolées en divers points de grilles uniformément distribués sur le bassin hydrographique. Ces données sont basées sur des mesures effectuées sur un nombre plus restreint de stations météorologiques. Par conséquent, elles présentent un niveau d'incertitude plus élevé, en particulier les quantités de précipitations.

Les résultats obtenus pour un pas de temps journalier ont démontré une très bonne correspondance entre les débits simulés et mesurés à la station 051001 située à proximité de l'exutoire du bassin versant de la rivière Montmorency. Les débits simulés et mesurés sur un pas de temps de 3 heures présentent, également, une correspondance entre eux relativement bonne. Bien que le modèle HYDROTEL sous-estime par moment certaines crues, il est possible de noter une bonne représentation des plus fortes crues printanières. De plus, les résultats de l'exercice de calage démontrent que les simulations aux pas de temps journaliers et trois heures représentent fidèlement la crue du 29 avril 2008 (voir pages 20 et 27). Par conséquent, cette modélisation avec HYDROTEL peut être considérée d'assez bonne précision dans un contexte de prévisions des crues.

Deux approches ont été adoptées afin de détecter ou prévoir les crues et débits à venir sur différents horizons temporels. La première approche a fait référence à des scénarios météorologiques historiques enregistrés aux neuf stations entre le 9 mai et le 30 juin de chacune des années comprises entre 1998 et 2007. Les simulations découlant de ces scénarios ont présenté des crues journalières maximales entre 199 m³/s et 372 m³/s avec une moyenne de 269 m³/s. La deuxième approche permet une prévision des crues à court terme selon les prévisions météorologiques journalières d'Environnement Canada à l'aéroport de Québec, ou encore selon les grilles de prévisions météorologiques aux trois heures construites par le CEHQ. Ces simulations avec les deux pas de temps (journalier et aux 3 heures) se sont montrées efficaces et rapidement rendues opérationnelles. D'ailleurs, tout au long de la présente étude, des prévisions ont été acheminées aux différents acteurs du projet afin de prévoir toute intervention sur différents secteurs à risque du bassin versant de la rivière Montmorency.

Il est à noter que la méthode de prévision des crues sur un pas de temps de 3 heures décrite dans le rapport actuel se rapproche grandement de celle développée par le CEHQ dans le cadre de son système prévisionnel. Puisque le CEHQ a mis en place un dispositif fonctionnel pour opérer ce genre d'outil au moment voulu, l'INRS-ETE transfèrera au CEHQ, tel qu'il a été convenu entre les divers intervenants, sa base de données PHYSITEL/HYDROTEL de la Montmorency afin que ce dernier l'intègre graduellement à son système de prévision hydrologique (SPH).

Jusqu'à ce que l'intégration au SPH soit complétée, l'INRS- ETE demeurera disponible à la Ville de Québec pour réaliser des études contractuelles spécifiques sur ce bassin. Ces études ou travaux futurs comprennent notamment le raffinement du calage du modèle HYDROTEL sur un pas de temps de 3 heures à l'aide de données météorologiques extrapolées aux points de grilles en tenant compte de l'ensemble des stations météorologiques présentes sur le secteur du bassin de la Montmorency. D'autres travaux futurs pourraient inclure le développement d'un modèle d'erreurs afin de définir les intervalles de confiance de la prévision hydrologique. Parallèlement à ces efforts de calage, l'INRS-ETE est en mesure de mettre à jour le suivi journalier, ou sur un pas de temps de 3 heures, les débits simulés par le modèle HYDROTEL. L'INRS-ETE est également en mesure de fournir des prévisions de crues en fonction des besoins des différents acteurs du projet, ou encore lors d'importantes précipitations observées ou annoncées.

6 Références bibliographiques

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

Fortin J.P., Turcotte R., Massicotte S., Moussa R., Fitzback J. 2001b. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data, part 2: Application to the Chaudière watershed. *Journal of Hydraulic Engineering*, **6**(2): 100-108.

Lavigne, M.-P., 2007. Modélisation du régime hydrologique et de l'impact des coupes forestières sur l'écoulement du ruisseau des Eaux-Volées à l'aide d'HYDROTEL, Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, mai 2007.

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.

Rousseau A.N., Royer A., Fortin J.-P., Turcotte R., 2008. PHYSITEL, a specialized GIS for distributed hydrological models. (To be submitted to *Environmental Modeling & Software*)

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, 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. Poster présenté dans le cadre du deuxième symposium scientifique d'Ouranos sur la climatologie et adaptation à l'échelle régionale, 2-3 novembre 2006, Montréal, Qc, Canada.

Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C., Villeneuve, J.P., 2004. Prévision hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. *Revue canadienne de génie civil*. 31(2) : 308-320.

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.

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.