

**Étalonnage au pas de temps de trois heures d'HYDROTEL
en vue de son intégration au CEHQ dans le cadre de
la prévision de crues sur le bassin de la rivière Montmorency**

Rapport R-1018 présenté à la
Ville de Québec

Alain N. Rousseau ing., Ph.D.¹,
Brou Konan Docteur¹
Stéphane Savary ing. jr, M.Sc.¹

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

24 septembre 2008

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

© Alain N. Rousseau, 2008
ISBN 978-2-89146-584-7
Dépôt légal Bibliothèque nationale du Québec
Dépôt légal Bibliothèque nationale du Canada

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
1 Sommaire exécutif	1
2 Mise à jour du calage au pas de temps de trois heures	3
2.1 Résultats	5
2.2 Analyse.....	8
2.2.1 Évaluation de la performance par classe de débits.....	9
3 Conclusion et perspectives de travaux futurs.....	13
4 Références bibliographiques	15

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Intégration du bassin de la rivière Montmorency au modèle HYDROTEL.....	4
Figure 2.2 : Comparaison des débits mesurés et simulés pour le calage du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency(années hydrologiques 2005-2006 (a);	6
Figure 2.3 : Comparaison des débits mesurés et simulés pour la validation du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (période 2002-2005)	8
Figure 2.4 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits	10
Figure 2.5 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits en été	11
Figure 2.6 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits en automne	11
Figure 2.7 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits	12
Figure 2.8 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits	12

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Stations météorologiques virtuelles associés aux points de grille.....	4
Tableau 2.2 : Stations hydrométriques associées aux simulations hydrologiques.....	5
Tableau 2.3 : Performances du modèle HYDROTEL pour la période de calage	7
Tableau 2.4 : Performances horaires du modèle HYDROTEL pour la période de validation...	8
Tableau 2.5 : Performance au pas de temps de trois heures du modèle HYDROTEL	9

1 Sommaire exécutif

Lors de l'application du modèle HYDROTEL pour la prévision de crues du printemps 2008 sur la Montmorency, l'INRS-ETE (Rousseau *et al.*, 2008) a effectué un étalonnage (calage) du modèle au pas de temps de trois (3) heures sur la base des données météorologiques aux points de grille générées par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Bien que ces données aient permis d'effectuer un calage satisfaisant, il n'en demeure pas moins qu'elles avaient été produites à partir d'un nombre minimal de stations météorologiques.

Sur la base de la proposition à la Ville de Québec d'un projet pilote visant à rendre disponibles des prévisions de débits sur la rivière Montmorency, le CEHQ a ajouté les données d'environ neuf stations météorologiques du secteur afin de produire des données de précipitation à plus haute résolution. Comme le calage dépend directement de ces données, l'INRS-ETE a refait le calage au pas de temps de trois heures d'HYDROTEL sur la base des nouvelles données météorologiques aux points de grille fournies par le CEHQ. Ainsi, le 24 septembre dernier, l'INRS-ETE a transféré la nouvelle base de données PHYSITEL/HYDROTEL du bassin de la Montmorency au CEHQ afin que celui-ci l'intègre graduellement au sein de son Système de Prévision Hydrologique (SPH) selon les modalités convenues entre la Ville de Québec et le CEHQ.

Les résultats de l'exercice de calage démontrent que les débits en hiver sont sous estimés par le modèle; en particulier ceux supérieurs à $60 \text{ m}^3/\text{s}$ (- $59,80 \text{ m}^3/\text{s}$). Les classes des débits inférieurs à $60 \text{ m}^3/\text{s}$ sont relativement bien estimées (entre - $16,09$ et - $3,05 \text{ m}^3/\text{s}$). À noter que les débits mesurés en période hivernale sont en général de qualité douteuse. Pendant la période de printemps, les classes inférieures à $200 \text{ m}^3/\text{s}$ sont sous estimées (entre - $6,78$ et - $16,26 \text{ m}^3/\text{s}$). Au-delà de cette classe, les écarts sont plus importants (entre - $26,51$ et - $32,15 \text{ m}^3/\text{s}$) mais dans des proportions très acceptables (- 12 %). En été, les débits supérieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ sont plus fortement surestimés (entre $30,44$ et $37,06 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 20 à 25 %) alors que ceux inférieurs à cette classe sont mieux estimés (entre $0,31$ et $8,30 \text{ m}^3/\text{s}$). Les débits en automne sont sous estimés à partir de $100 \text{ m}^3/\text{s}$; plus particulièrement ceux supérieurs à $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (écarts entre - $26,84$ et - $51,45 \text{ m}^3/\text{s}$ soit - 15 à - 20 %). Les écarts sont plus faibles pour les classes de débits inférieurs à $150 \text{ m}^3/\text{s}$ (entre - $1,68$ à - $7,13 \text{ m}^3/\text{s}$).

Les paramètres de calage obtenus sont un compromis qui minimise les surestimations en été et au contraire les sous-estimations en automne.

À noter que tous les détails du processus de modélisation hydrologique du bassin de la Montmorency à l'aide d'HYDROTEL ont été rapportés dans le rapport final de la première phase de ce projet (voir Rousseau *et al.*, 2008). Nous rapportons, ici, seulement les éléments nouveaux du calage au pas de temps de trois heures.

2 Mise à jour du calage au pas de temps de trois heures

L'application d'HYDROTEL calé sur un pas de temps de trois (3) heures permet de détecter des crues intra journalières dépassant la moyenne des débits journaliers. Lors de la période de fonte ou encore en présence d'évènements orageux localisés, ces crues peuvent présenter un niveau de risque considérable qui nécessite diverses interventions.

Les simulations hydrologiques sur le pas de temps de trois (3) heures a été fait sur la base des nouvelles données météorologiques générées par le CEHQ pour divers points de grille distribués uniformément à l'intérieur des limites du bassin versant. Ces points de grille agissent comme stations météorologiques pour lesquelles sont interpolées les données sur un pas de temps de trois heures. Par conséquent, les données météorologiques résultantes peuvent présenter un niveau d'incertitude élevé qui peut limiter le calage du modèle à cette échelle temporelle. La figure 2.1 présente l'intégration du bassin de la Montmorency au modèle HYDROTEL et la localisation des points de grille. Le tableau 2.1 présente les stations météorologiques virtuelles correspondant à ces points de grille et influençant les simulations hydrologiques. Les données météorologiques à ces points de grille 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 (Tableau 2.2). 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. À noter que 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 débits à la station 051005, notamment en période hivernale. Les sommaires journaliers ainsi que les débits mesurés aux 15 minutes à la station 051001 nous ont été transmis par le CEHQ. Ces données sont également disponibles en ligne sur le site du CEHQ (<http://www.cehq.gouv.qc.ca/suivihydro/graphique.asp?NoStation=051001>).

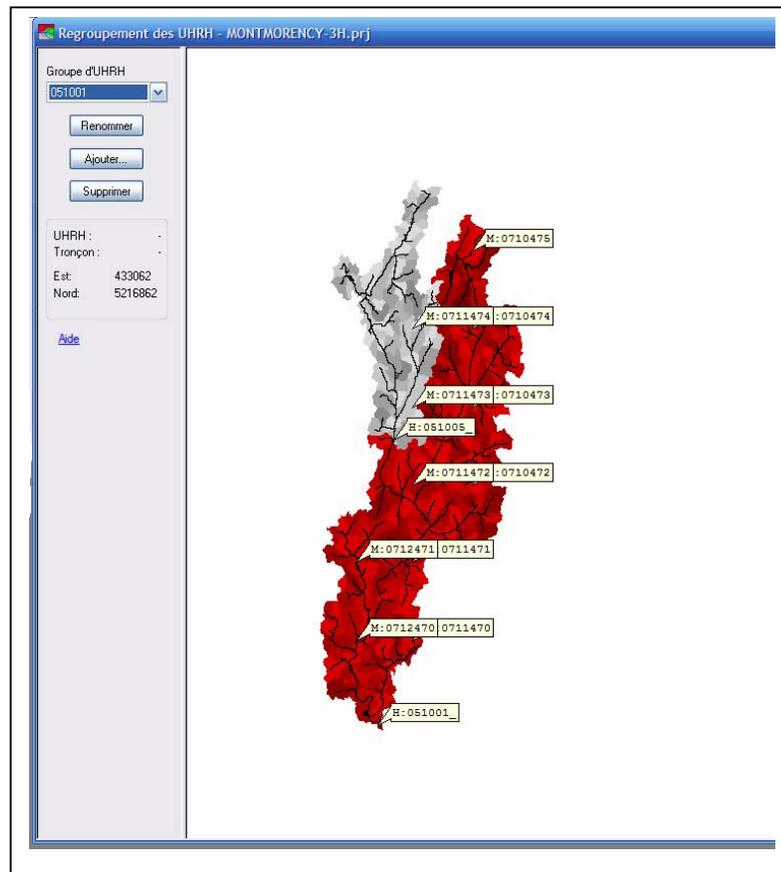


Figure 2.1 : Intégration du bassin de la rivière Montmorency au modèle HYDROTEL

Tableau 2.1 : Stations météorologiques virtuelles associés aux points de grille

# du point de grille	Longitude	Latitude	Altitude
710472	70° 59' O	47° 12' N	792 m
710473	70° 59' O	47° 18' N	819 m
710474	70° 59' O	47° 24' N	852 m
710475	70° 59' O	47° 30' N	852 m
711470	71° 5' O	47° 0' N	302 m
711471	71° 5' O	47° 6' N	496 m
711472	71° 5' O	47° 12' N	730 m
711473	71° 5' O	47° 18' N	857 m
711474	71° 5' O	47° 24' N	1116 m
712470	71° 11' O	47° 0' N	246 m
712471	71° 11' O	47° 6' N	349 m

Tableau 2.2 : Stations hydrométriques associées aux simulations hydrologiques

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

2.1 Résultats

Le calage a été effectué sur la période 2005-2008 et la validation sur la période 2002-2004. La période de calage a été choisie en fonction de la disponibilité des données météorologiques aux points de grilles, de la représentativité des événements hydrologiques, ainsi que par le souci de reproduire les événements hydrologiques récents. La figure 2.2 présente les résultats sur les trois années hydrologiques de la période de calage. La performance du modèle, selon le critère de Nash-Sutcliffe, pour l'ensemble de la période de calage, est présentée au tableau 2.3. Ce critère de performance est couramment utilisé pour quantifier la performance d'un modèle hydrologique à simuler les débits mesurés. 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 résultats de calage sur un pas de temps de trois heures démontrent un assez bon synchronisme entre les débits mesurés et simulés à l'exutoire du bassin versant de la rivière Montmorency. Le modèle HYDROTEL offre une bonne stabilité sur un pas de temps de trois heures avec des séquences de surestimation ou sous-estimation des crues.

Les plus importantes crues de printemps sont bien reproduites à l'exception de l'année 2006. L'amplitude et la synchronisation des crues printanières sont généralement bien respectées, notamment pour l'année en cours. Plus spécifiquement, pour l'année 2008, la crue observée le 29 avril 2008 entre 21 h et 24 h est simulée avec une bonne précision. Le débit moyen simulé entre 21 h et 24 h en cette date précise ($432 \text{ m}^3/\text{s}$) s'apparente au débit moyen mesuré ($416 \text{ m}^3/\text{s}$). Pour cette période, la simulation surestime de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ le débit mesuré, soit une erreur de + 4 %. Globalement, il est à noter que les écarts majeurs entre les débits simulés et mesurés surviennent essentiellement lors d'évènements de pluies d'importance en période automnale et estivale.

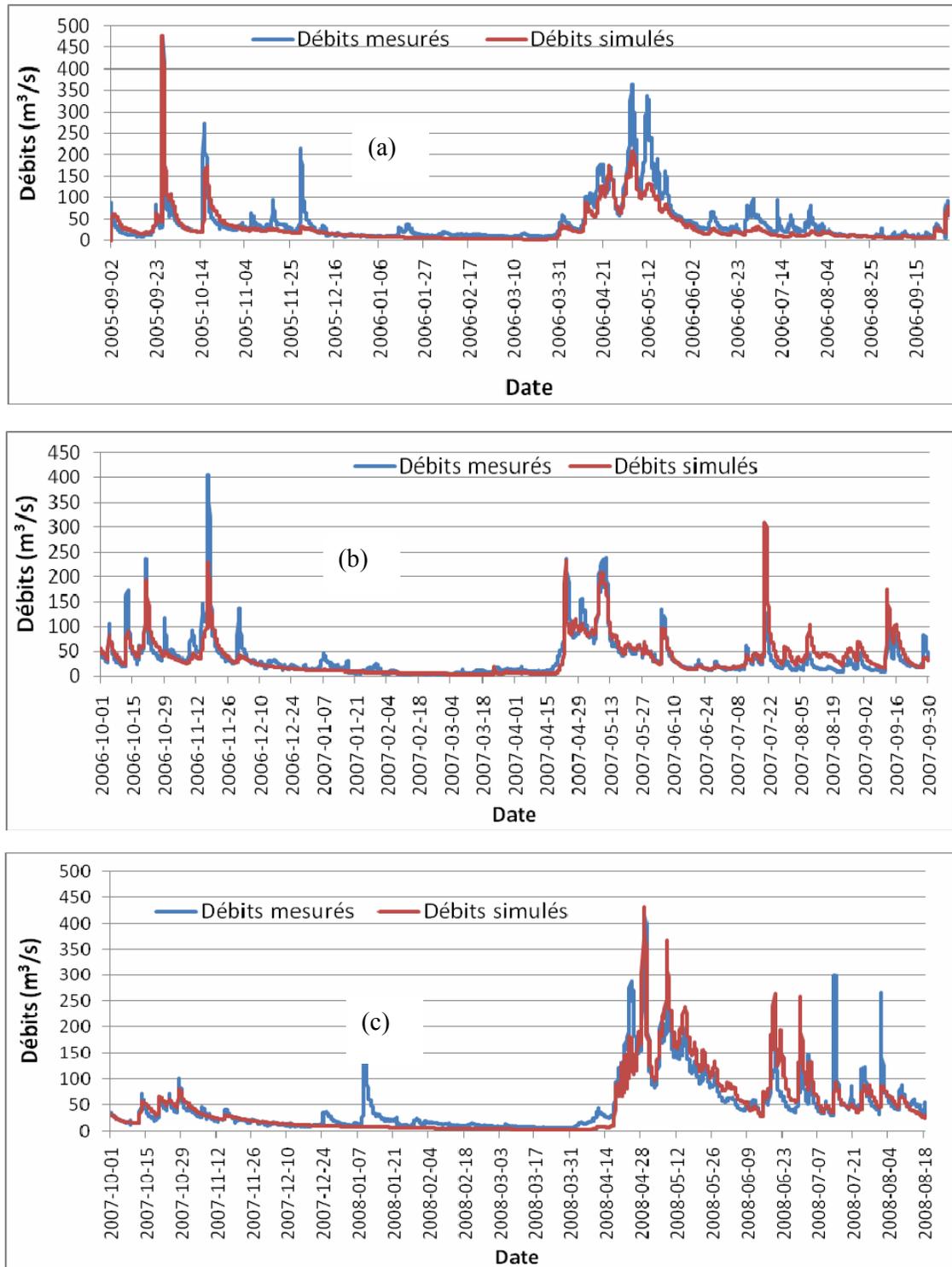


Figure 2.2 : Comparaison des débits mesurés et simulés pour le calage du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency(années hydrologiques 2005-2006 (a); 2006-2007 (b); 2007-2008 (c))

Tableau 2.3 : Performances du modèle HYDROTEL pour la période de calage

Période de calage (Années hydrologiques / 1 ^{er} octobre au 30 septembre)				
	2005-2006	2006-2007	2007-2008	Total
Nash-Sutcliffe	0,71	0,72	0,78	0,74

Certains évènements de crues ne sont pas bien simulés (absences ou désynchronisation des débits). L'absence de telles crues peut être liée à une représentation erronée : (i) des données de précipitations aux points de grille du CEHQ ou (ii) encore à l'occurrence d'évènements pluvieux locaux non détectés par le réseau qui a servi à générer les données aux points de grille. Les différences peuvent également être attribuées aux mesures erronées hivernales de débits.

La figure 2.3 présente les résultats sur la période de validation 2002-2004. Le tableau 2.4 introduit la performance du modèle, selon le critère de Nash-Sutcliffe, pour l'ensemble de la période de validation. Ils démontrent que la validation du modèle HYDROTEL présente des résultats inférieurs à ceux obtenus pour la période de calage. Les pointes de crues associées à des évènements pluvieux sont plus fortement sous-estimées de même que les pointes de crues printanières. Ces tendances du modèle soulignent encore une fois que la qualité des simulations est tributaire de la qualité des données météorologiques. L'incertitude liée aux données météorologiques a été déjà soulignée. Ce qui peut avoir pour conséquence la non-représentativité des paramètres de calage pour la simulation sur des périodes éloignées de celle qui a servi au calage.

Cependant, ce calage peut être utilisable pour faire des simulations sur des courtes périodes proches de celle du calage. En effet, lors de la surveillance de ce bassin pour la prévision des crues de 2008, des résultats satisfaisants ont été obtenus sur de courtes périodes (voir Rousseau *et al.*, 2008). Cela pourrait être dû au fait que sur ces courtes périodes, les prévisions météorologiques sont généralement de bonne qualité et les valeurs des variables d'états du modèle sont représentatives des conditions initiales du bassin versant.

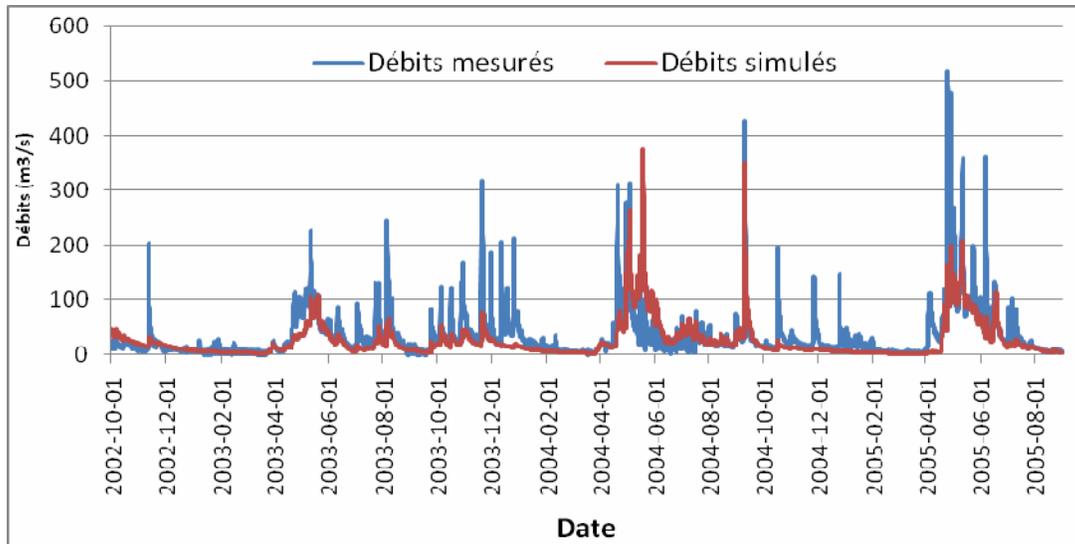


Figure 2.3 : Comparaison des débits mesurés et simulés pour la validation du modèle HYDROTEL sur le bassin versant de la rivière Montmorency (période 2002-2005)

Tableau 2.4 : Performances horaires du modèle HYDROTEL pour la période de validation

Période de validation (Années hydrologiques / 1 ^{er} octobre au 30 septembre)				
	2002-2003	2003-2004	2004-2005	Total
Nash-Sutcliffe	0,51	0,26	0,55	0,45

2.2 Analyse

Dans l'ensemble, les simulations sur la période de calage du modèle au pas de temps de trois heures reproduisent généralement l'amplitude et la synchronisation des crues printanières et automnales notamment pour l'année en cours. Le tableau 2.5 résume le comportement à long terme du modèle HYDROTEL pour la période de calage 2005-2008. Les performances du modèle HYDROTEL sont très satisfaisantes au regard des critères numériques. 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 débits en présence d'un couvert de glace. Conséquemment, il est raisonnable d'affirmer que l'exercice de calage, sur le pas de temps de trois heures, à l'échelle du bassin de la rivière Montmorency est satisfaisant en regard des objectifs visant l'obtention de prévision de crues

et l'implantation pour une phase opérationnelle de prévision. En effet, dans un contexte de système prévisionnel des crues, c'est le calage sur une période récente qui est mise à jour pour servir de base de travail. Les débits simulés sont corrigés en fonction des débits mesurés afin d'obtenir une meilleure précision dans la prévision des crues. C'est donc la performance sur cette période de calage qui fait l'objet d'analyse dans la suite.

Tableau 2.5 : Performance au pas de temps de trois heures du modèle HYDROTEL sur la période 2005-2008

Critère de Performance	Résultats
Coefficient de détermination (R^2)	0,76
Critère de Nash-Sutcliffe	0,74
Lame d'eau annuelle mesurée (mm)	1 107
Lame d'eau annuelle simulée (mm)	1 007

2.2.1 Évaluation de la performance par classe de débits

L'analyse précédente permet de juger de la performance globale du modèle. Dans cette partie, il s'agit de regarder la qualité des simulations par rapport à la distribution des débits. Pour cela, les erreurs absolues et relatives sont déterminées par classes de débits. La figure 2.4 présente les moyennes des erreurs relatives et absolues globales pour différentes classes de débits sur la période 2005-2008. Cette figure montre essentiellement que les débits d'importances sont plus fortement sous-estimés. Afin d'approfondir ce constat, il est pertinent de déterminer les moyennes des erreurs absolues et relatives pour les périodes spécifiques été, automne, hiver (accumulation de neige) et printemps (fonte du couvert de neige). Ainsi, les figures 2.5 à 2.8 présentent les moyennes des erreurs absolues et relatives pour ces périodes.

Les débits supérieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ sont plus fortement surestimés en été (Figure 2.5). Les erreurs se situent entre 20 et 25 %. Alors que les débits supérieurs à $150 \text{ m}^3/\text{s}$ sont sous-estimés entre - 15 et - 20 % en automne (Figure 2.6). Sur ces deux saisons, les simulations sont faites par le même processus sous HYDROTEL, notamment BV3C. Les paramètres de calage obtenus sont un compromis qui minimise les surestimations en été et au contraire les sous-estimations en automne. La figure 2.7 montre que les débits supérieurs à $100 \text{ m}^3/\text{s}$ au

printemps sont généralement sous-estimés mais dans une proportion plus acceptable (entre - 10 et - 12 %).

Les débits en hiver sont sous estimés (Figure 2.8) par le modèle; en particulier ceux supérieurs à 60 m³/s (- 59,8 m³/s soit - 154 %). Les classes des débits inférieurs à 60 m³/s sont relativement bien estimées (entre - 16 et - 3 m³/s). Les proportions sont cependant élevées (- 51 à - 35 %) du fait de la faiblesse des débits sur cette période. À noter que les débits mesurés à cette période sont en général de qualité douteuse.

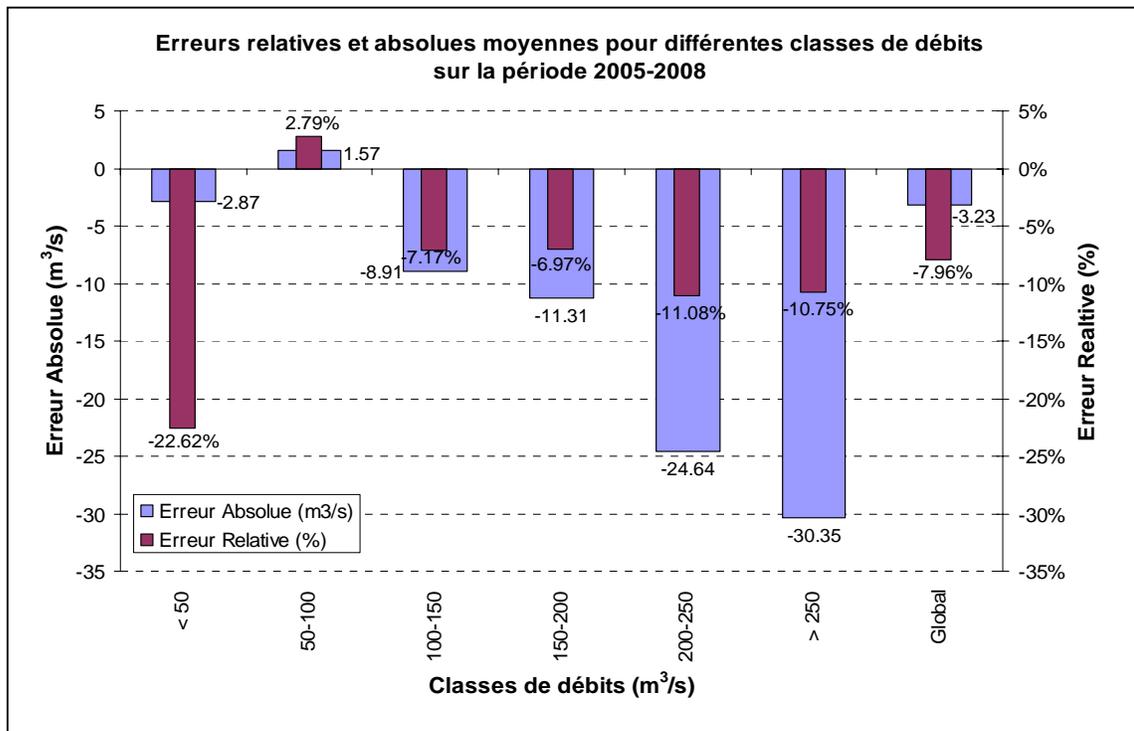


Figure 2.4 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits sur la période 2005-2008

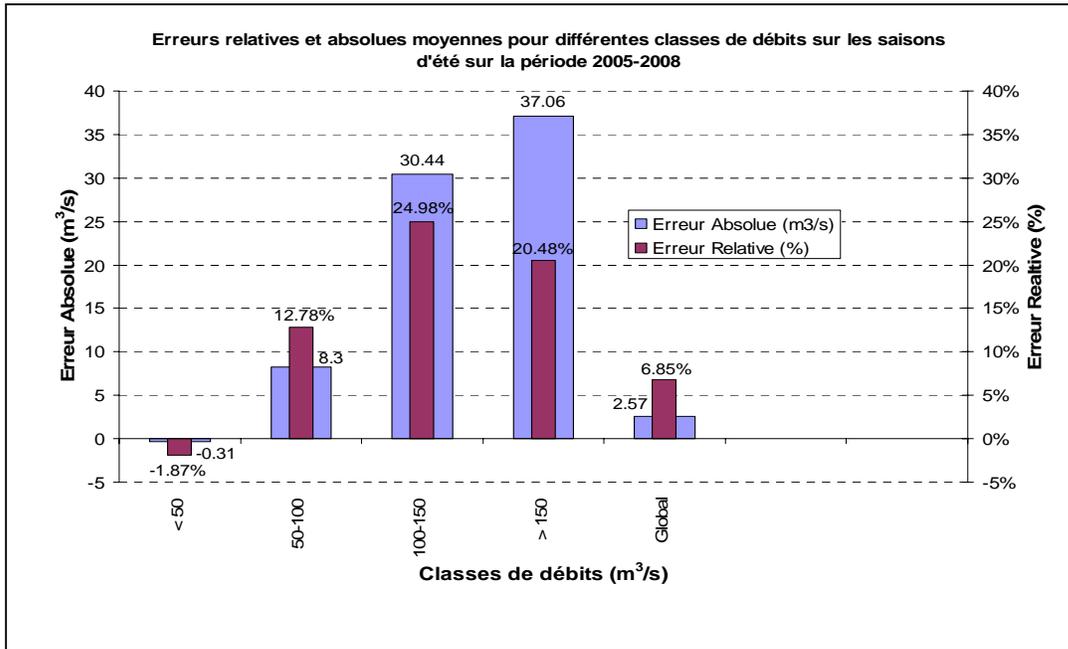


Figure 2.5 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits en été

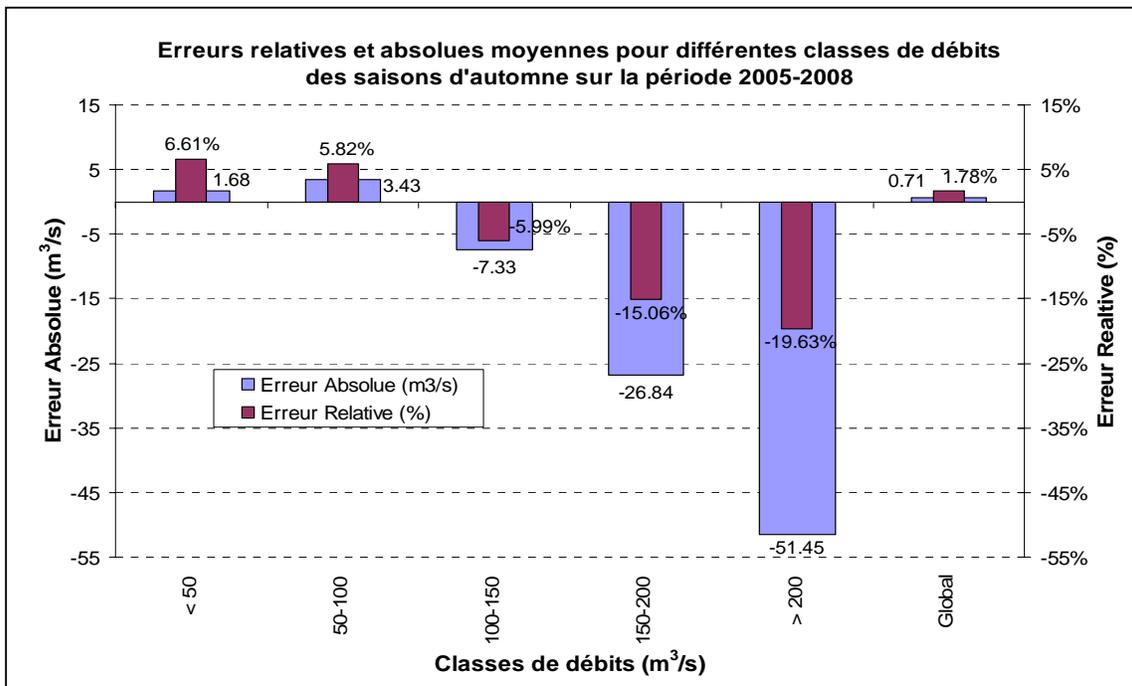


Figure 2.6 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits en automne

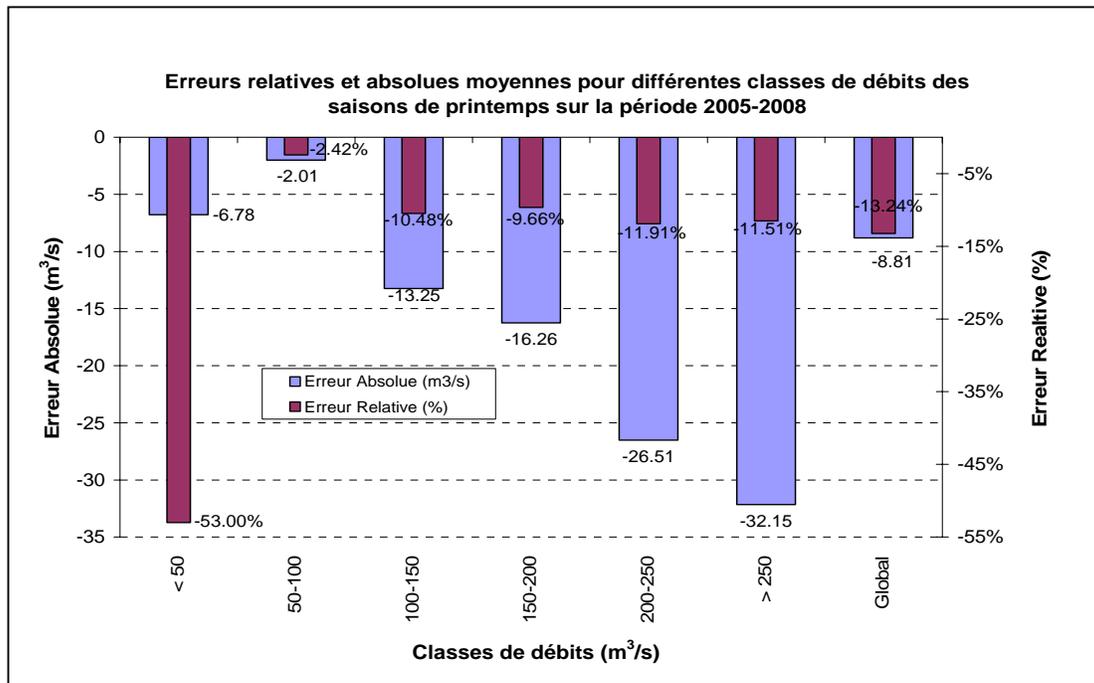


Figure 2.7 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits pour la période printemps

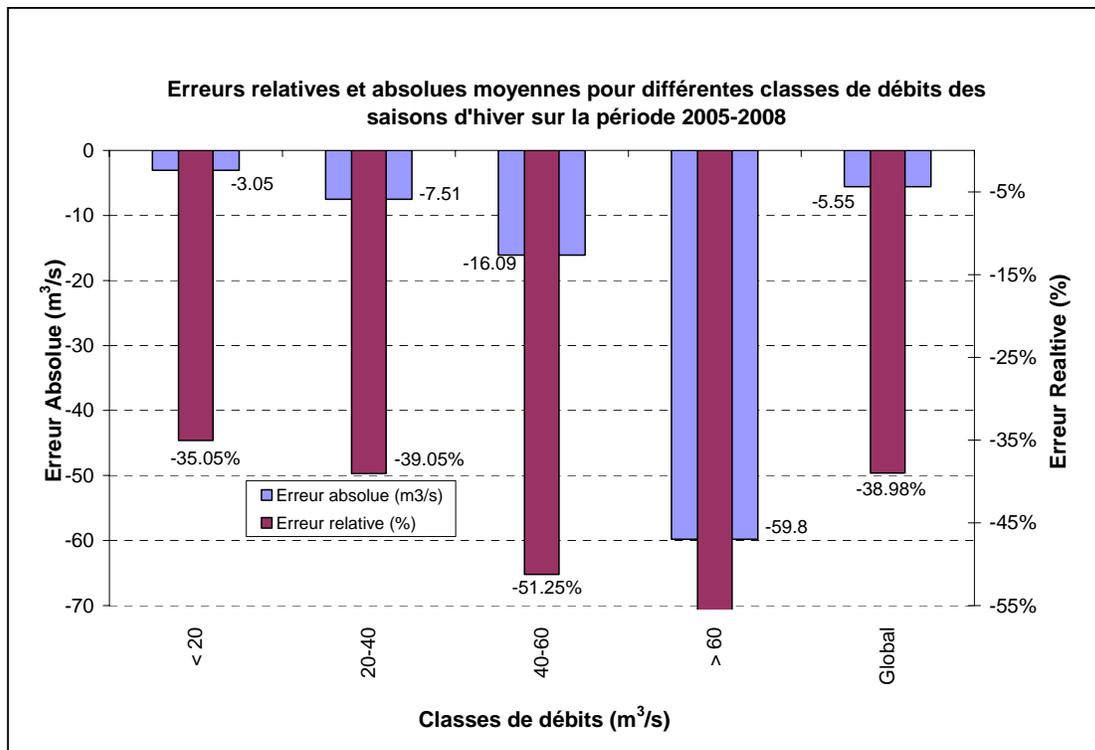


Figure 2.8 : Erreurs absolues et relatives moyennes pour différentes classes de débits pour la période hiver

3 Conclusion et perspectives de travaux futurs

Les simulations au pas de temps de trois heures utilisent des données météorologiques extrapolées par le CEHQ en divers points de grille 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 élevée. Les résultats sur la période de calage montrent une correspondance entre les débits mesurés et simulés relativement bonne. Bien que les simulations sous-estiment par moment certaines crues, il est à noter une bonne représentation des plus fortes crues automnales et printanières, période d'intérêt pour ce bassin versant. Par contre, au niveau de la période de validation, les résultats sont de moins bonne qualité. Cela pose le problème de la représentativité des paramètres obtenus dans un contexte où il y a beaucoup d'incertitudes sur données météorologiques.

Enfin, le calage réalisé peut, cependant, être utilisable pour faire des simulations (phase opérationnelle) sur des courtes périodes proches de celle de calage. En effet, lors de la surveillance de ce bassin pour la prévision des crues de 2008, les résultats obtenus ont été très satisfaisants sur de courtes périodes (Rousseau *et al.*, 2008). Cela s'explique par le fait que sur ces courtes périodes, les prévisions météorologiques sont généralement de bonne qualité et les valeurs des variables d'états du modèle sont représentatives des conditions en cours sur le bassin versant.

Cela dit, le 24 septembre dernier, l'INRS-ETE a transféré la nouvelle base de données PHYSITEL/HYDROTEL du bassin de la Montmorency au CEHQ afin que celui-ci l'intègre graduellement au sein du SPH selon les modalités convenues entre la Ville de Québec et le CEHQ. Jusqu'à ce que l'intégration soit complétée, l'INRS- ETE demeurera disponible pour la Ville de Québec pour réaliser des études contractuelles spécifiques sur ce bassin. Ces études ou travaux futurs pourraient inclure le développement d'un modèle d'incertitudes afin de définir les intervalles de confiance de la prévision hydrologique. Enfin, l'INRS-ETE est en mesure de mettre à jour le suivi journalier, ou sur un pas de temps de trois (3) heures, des 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.

4 Références bibliographiques

Rousseau, A.N., Savary, S. B. Konan. 2008. 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 2008. *Rapport R-921. Centre Eau, Terre et Environnement, Institut national de la recherche scientifique, INRS-ETE*. Québec, PQ 54 pages

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