

Record Number: 18770
Author, Monographic: Fortin, J. P.//Turcotte, R.//Gauthier, Y.//Royer, A.//Bernier, M.
Author Role:
Title, Monographic: Extrait du rapport : simulation des crues maximales probables et prévisions des apports sur le bassin de la rivière Mitis par le modèle HYDROTEL. Rapport d'étape 2
Translated Title:
Reprint Status:
Edition:
Author, Subsidiary:
Author Role:
Place of Publication: Québec
Publisher Name: INRS-Eau
Date of Publication: 2000
Original Publication Date: Janvier 2000
Volume Identification:
Extent of Work: viii, 88
Packaging Method: pages incluant un annexe
Series Editor:
Series Editor Role:
Series Title: INRS-Eau, rapport de recherche
Series Volume ID: 551 e2
Location/URL:
ISBN: 2-89146-327-7
Notes: Rapport annuel 1999-2000
Abstract: ISBN double aussi pour le rapport 555
Ancien R000551 s1
Version non confidentielle
13.00\$
Call Number: R000551 e2
Keywords: rapport/ ok/ dl

***Extrait du rapport: Simulations de crues
maximales probables et prévisions des
apports sur le bassin de la rivière Mitis par le
modèle HYDROTEL***

Janvier 2000

**Extrait du rapport: Simulations de crues maximales probables
et prévisions des apports sur le bassin de la rivière Mitis
par le modèle HYDROTEL**

Rapport d'étape

Version non confidentielle

par

**Jean-Pierre Fortin
Richard Turcotte
Yves Gauthier
Alain Royer
Monique Bernier**

**Institut national de la recherche scientifique, INRS-Eau
2800, rue Einstein, Case postale 7500, SAINTE-FOY (Québec), G1V 4C7**

Rapport de recherche no R-551-s1

Janvier 2000

ISBN 2-89146-327-7

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	vii
1 INTRODUCTION	1
2 LE MODÈLE HYDROLOGIQUE HYDROTEL	3
2.1 Introduction	3
2.2 Historique	4
2.3 Représentation discrétisée du bassin versant	4
2.4 Simulation des processus hydrologiques	7
2.5 Autres caractéristiques du modèle et domaine d'application	10
3 SIMULATION DE L'EFFET DES BARRAGES SUR L'ÉCOULEMENT	13
3.1 Modélisation de la gestion	13
3.2 Modélisation de la capacité d'évacuation	14
3.3 Algorithme	14
3.3.1 Pré-requis	15
3.3.2 Contraintes	16
3.3.3 Fonction niveau-évacuation	17
3.3.4 Approche simplifiée	19
3.3.5 Variation des directives de gestion à l'intérieur d'une année	19
4 LE BASSIN DE LA RIVIÈRE MITIS	21
5 PRÉPARATION DE LA BASE DE DONNÉES DESCRIPTIVE DU BASSIN DE LA RIVIÈRE MITIS	23
5.1 Données descriptives du bassin	23
5.1.1 Détermination de la structure d'écoulement	23
5.1.1.1 Acquisition des données	23
5.1.1.2 Pré-traitement des données	24
5.1.1.3 Détermination de la structure d'écoulement	28
5.1.2 Occupation du sol	30
5.1.2.1 Acquisition des données	33
5.1.2.2 Pré-traitement des données	33
5.1.2.3 Agrégation à l'échelle des sous-bassins versants	33
5.1.2.4 Attributs quantitatifs de l'occupation du sol	34

5.1.3	Types de sol	37
5.1.3.1	Acquisition et justification des données utilisées	38
5.1.3.2	Distribution spatiale et attributs des sols	38
6	DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES, HYDROMÉTRIQUES ET NIVOMÉTRIQUES	41
6.1	Données météorologiques	41
6.1.1	Réseau de stations	41
6.1.2	Pré-traitement	41
6.1.3	Synthèse des données	44
6.2	Données hydrométriques	45
6.2.1	Réseau de stations	45
6.2.2	Pré-traitement	47
6.2.3	Synthèse des données	50
6.3	Données nivométriques	50
7	ÉTALONNAGE DU MODÈLE	53
7.1	Éléments clés et stratégies d'étalonnage	53
7.1.1	Importance des séquences de données météorologiques et hydrométriques	53
7.1.2	Évacuations historiques	56
7.1.3	Distribution des jeux de paramètres	56
7.1.4	Période d'étalonnage	57
7.1.5	Étalonnage versus vérification	57
7.1.6	Choix des sous-modèles	58
7.2	Étalonnage des sous-bassins du Lac Mitis et de Mistigouèche	58
7.3	Étalonnage du sous-bassin Mitis intermédiaire	68
7.4	Différences entre les deux étalonnages	81
8	CONCLUSION	105
	RÉFÉRENCES	107
	ANNEXE	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Options de simulation hydrologique disponibles dans HYDROTEL	8
Tableau 5.1	Résumé statistique des caractéristiques des sous-bassins et des tronçons . . .	30
Tableau 5.2	Classes d'occupation du sol et pourcentages de la superficie du bassin occupé par chacune de ces classes	34
Tableau 5.3	Indices foliaires (IF) et profondeurs racinaires (PR) des classes d'occupation du territoire sur le bassin de la rivière Mitis. Les profondeurs racinaires sont en mètres	37
Tableau 5.4	Propriétés hydrauliques du type de sol retenu	39
Tableau 6.1	Stations météorologiques et caractéristiques des données obtenues	42
Tableau 6.2	Précipitations observées, cumulées sur six mois, sur le bassin de la rivière Mitis	45
Tableau 6.3	Stations hydrométriques et caractéristiques des données obtenues	46
Tableau 6.4	Relations niveau-volume aux réservoirs des trois barrages	46
Tableau 6.6	Stations nivométriques et caractéristiques des données obtenues	51
Tableau 7.1	Les sous-modèles sélectionnés et leurs paramètres de calage	59
Tableau 7.2	Valeurs des paramètres de calage pour les sous-bassins du lac Mitis et du lac Mistigouèche	60
Tableau 7.3	Valeurs des paramètres de calage pour le sous-bassin de Mitis intermédiaire	69
Tableau 7.4	Statistiques sur l'étalonnage de Mitis intermédiaire à la station de Mitis 1 pour les simulations au pas de temps de six heures	73

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Schématisation de la déduction de la structure d'écoulement d'un bassin versant	5
Figure 4.1	Le bassin de la rivière Mitis et ces principales composantes	22
Figure 5.1	Modèle numérique des altitudes englobant le bassin de la rivière Mitis	25
Figure 5.2	Réseau hydrographique numérique obtenu des cartes numérique de la région de la rivière Mitis	27
Figure 5.3	Relation entre le coefficient de Nash-Sutcliffe et le nombre de sous-bassins versants utilisés pour discrétiser le bassin de la rivière Chaudière	31
Figure 5.4	Sous-bassins versants de calcul sur le bassin de la rivière Mitis	32
Figure 5.5	Carte des occupations du sol dans la région du bassin de la rivière Mitis	35
Figure 6.1	Localisation des stations météorologiques	42
Figure 6.2	Localisation des stations hydrométriques	47
Figure 6.3	Localisation des stations nivométriques	51
Figure 7.1	Comparaison entre les apports observés et simulés au lac Mitis avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet	62
Figure 7.2	Comparaison entre les apports observés et simulés au lac Mistigouèche avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet	63
Figure 7.3	Comparaison entre les apports observés et simulés au lac Mitis avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet et de Mistigouèche ...	64
Figure 7.4	Comparaison entre les apports observés et simulés au lac Mistigouèche avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet et de Mistigouèche	65
Figure 7.5	Comparaison entre les apports simulés et observés à Mitis 1 résultant de l'étalonnage préliminaire du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps journalier à l'aide des stations de Ouimet, de Mistigouèche et de Mont-Joli	70
Figure 7.6	Comparaison entre les apports simulés et observés à Mitis 1 résultant de l'étalonnage préliminaire du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps journalier à l'aide des stations de Ouimet et de Mistigouèche	71
Figure 7.7	Comparaison entre les apports simulés et observés à Mitis 1 résultant de l'étalonnage du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps de six heures à l'aide des stations de Ouimet et de Mistigouèche	72
Figure 7.8	Comparaison entre les apports simulés et observés à la Neigette résultant de l'étalonnage préliminaire du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps journalier à l'aide des stations de Ouimet, de Mistigouèche et de Mont-Joli	76

Figure 7.9	Comparaison entre les apports simulés et observés à la Neigette résultant de l'étalonnage préliminaire du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps journalier à l'aide des stations de Ouimet et de Mistigouèche	77
Figure 7.10	Comparaison entre les apports simulés et observés à la Neigette résultant de l'étalonnage du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps de six heures à l'aide des stations de Ouimet et de Mistigouèche	78
Figure 7.11	Comparaison entre les équivalents en eau de la neige au sol observés à la station nivométrique de Saint-Moïse et simulés à un pas de temps de six heures sur le sous-bassin versant de calcul qui inclut la station de Saint-Moïse	79
Figure 7.12	Comparaison entre les équivalents en eau de la neige au sol observés à la station nivométrique de Mitis-Price et simulés à un pas de temps de six heures sur le sous-bassin versant de calcul qui inclut la station de Mitis-Price	80

1 INTRODUCTION

Suite aux discussions des dernières années sur l'opportunité d'utiliser un modèle hydrologique distribué pour effectuer les prévisions hydrologiques d'apports naturels sur les bassins versants servant à la production d'électricité par Hydro-Québec, l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) a mandaté en mai 1999 l'INRS-Eau pour la réalisation d'un projet pilote portant sur l'utilisation du modèle hydrologique HYDROTEL sur le bassin de la rivière Mitis. Ce projet inclut deux volets principaux: (1) le calcul de scénarios de crues maximales probables et (2) l'ajustement du modèle HYDROTEL pour son utilisation en mode prévision.

Le présent document est un extrait du rapport d'étape qui dresse un bilan des activités liées à la simulations des crues maximales probables sur le bassin de la rivière Mitis et dont certaines sections sont sous le couvert de la confidentialité. Le présent rapport traite de l'extraction des données météorologiques et hydrométriques sur le bassin, et de la mise en place et à l'étalonnage du modèle HYDROTEL. Le rapport décrit aussi l'ajustement du modèle pour la simulation du laminage des crues de barrages selon les spécifications d'Hydro-Québec. La réalisation des activités touchant le projet s'est déroulée de la fin mai au début octobre 1999. Une étape de révision de l'étalonnage en fonction de nouvelles données disponibles est prévue d'ici la fin de l'an 2000.

Le rapport débute par une brève description au chapitre 2 des principales caractéristiques du modèle hydrologique HYDROTEL. Le chapitre 3 traite de l'ajustement d'HYDROTEL pour tenir compte de l'effet des barrages sur l'écoulement par le réseau hydrographique de manière à tenir compte des besoins d'Hydro-Québec en la matière. Un court chapitre présentant le bassin de la rivière Mitis suit. Nous discutons au chapitre 5 de l'acquisition et de la préparation de la base de données descriptives spécifique au bassin de la rivière Mitis. Le traitement des données météorologiques et hydrométriques nécessaires au projet est présenté au chapitre 6. L'étalonnage du modèle HYDROTEL est présenté au chapitre 7. Une conclusion rappelant les principales activités complétera ce rapport.

2 LE MODÈLE HYDROLOGIQUE HYDROTEL

Dans ce chapitre, une brève description du modèle HYDROTEL est présentée. Des informations plus complètes peuvent être obtenues en consultant les publications relatives à HYDROTEL, notamment les textes de Fortin *et al.* (1995 et 1999), pour une description détaillée du logiciel HYDROTEL et de ses applications, et de Turcotte *et al.* (1999a) pour la présentation de l'approche utilisée pour la détermination de la structure d'écoulement dans PHYSITEL. HYDROTEL est aussi documenté sommairement sur internet au site:

<http://www.inrs-eau.quebec.ca/activites/modeles/hydrotel/fr/accueil.htm>

2.1 Introduction

Le modèle HYDROTEL est un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG). Les processus hydrologiques variant dans l'espace et dans le temps en fonction de la variabilité spatio-temporelle des entrées météorologiques et de l'occupation du sol, ainsi que de la variabilité spatiale de la topographie et de la nature du terrain, l'un des objectifs principaux a été de développer un modèle capable de bénéficier des moyens les plus aptes à fournir des informations adéquates sur les diverses variables affectant les écoulements.

Les autres objectifs poursuivis lors du développement d'HYDROTEL étaient (a) l'application au plus grand nombre de bassins possible, (b) une sélection d'algorithmes permettant de tenir compte des données disponibles sur un bassin donné, (c) un minimum d'étalonnage des paramètres du modèle par suite de l'utilisation d'algorithmes davantage basés sur les processus physiques, (d) la facilité de transfert d'un bassin à l'autre, (e) une interface conviviale sur micro-ordinateur et (f) le recours à des algorithmes pouvant fonctionner à des pas de temps divers, inférieurs ou égal à la journée.

2.2 Historique

Le développement du modèle HYDROTEL a débuté il y a une dizaine d'années par des équipes de l'INRS-Eau et du Laboratoire d'Hydrologie et modélisation de l'université de Montpellier II (France) dont les chercheurs principaux avaient plus de vingt ans d'expérience en développement et application de modèles hydrologiques. En particulier, le modèle HYDROTEL a bénéficié de l'expérience acquise au Québec, en France et en coopération franco-québécoise avec les modèles hydrologiques CEQUEAU(issu d'une collaboration entre l'INRS-Eau et l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (ORSTOM)), CREC (développé par l'équipe d'Electricité de France en poste à l'université de Montpellier II), MC (modèle couplé surface-nappe développé conjointement par l'INRS-Eau et l'École des Mines de Fontainebleau à partir des modèles de surface et de nappe existants dans les deux institutions) et MDOR (modèle discrétisé à optimisation rapide, développé à l'INRS-Eau).

2.3 Représentation discrétisée du bassin versant

La base de données sur un bassin versant comprend la structure d'écoulement interne du bassin ainsi que la distribution spatiale des classes d'occupation du territoire (forêts de conifères ou de feuillus, cultures diverses, plans d'eau,...) et des types de sol (des argiles aux sables). Cette base de données est préparée par PHYSITEL, un logiciel complémentaire à HYDROTEL.

La structure d'écoulement d'un bassin est obtenue par traitement d'un modèle numérique d'altitude (MNA) sous format matriciel à la résolution spatiale désirée (figure 2.1) et, complémentairement, d'un réseau vectoriel obtenu de la couche hydrographique d'une carte numérique. La matrice des altitudes est utilisée conjointement avec le réseau hydrographique vectoriel pour déterminer les pentes et les orientations de chacune des mailles. Les orientations sont déterminées par l'évaluation de la direction de la pente descendante la plus prononcée parmi les mailles voisines d'une maille donnée. Le réseau vectoriel permet principalement d'ajuster les

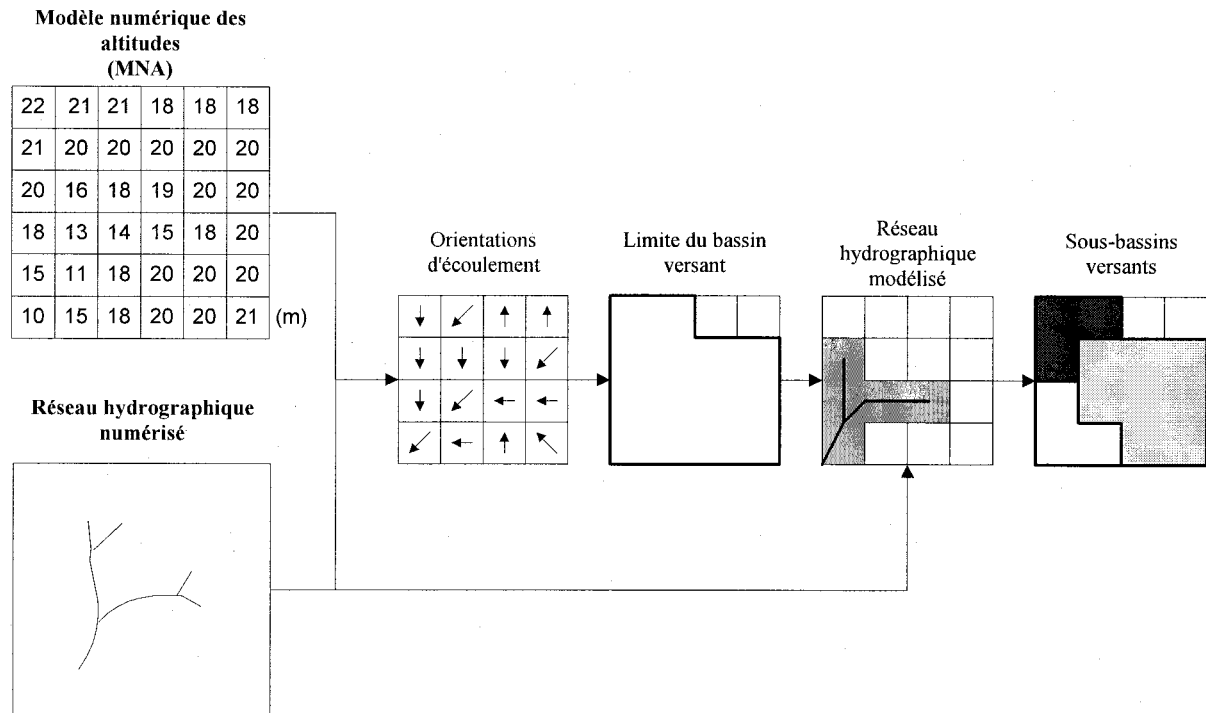


Figure 2.1 Schématisation de la déduction de la structure d'écoulement d'un bassin versant.

orientations d'écoulement dans les secteurs où le réseau forme des méandres et d'identifier les régions couvertes par des lacs. Des algorithmes de correction des zones plates et des dépressions doivent être utilisés pour obtenir des orientations d'écoulement dans les secteurs problématiques du bassin qui ne sont pas situés à proximité du réseau vectoriel.

Le bassin est reconstitué en identifiant tout d'abord la maille considérée comme exutoire. À partir de cette maille, on identifie de voisine en voisine chacune des mailles dont les orientations les amènent à se jeter dans les mailles situées en aval. Une fois le bassin reconstitué, il est possible de fixer un seuil de superficie à partir duquel on considère que l'on a un début de cours d'eau et d'identifier ainsi le réseau hydrographique du bassin. Le choix de cette superficie amont influence directement le degré de ramification du réseau et la densité de drainage du bassin.

Les mailles drainant une superficie amont supérieure au seuil sont considérées comme faisant partie du réseau hydrographique. Le réseau hydrographique ainsi formé est subdivisé en tronçons délimités (1) par deux points de confluence, ou (2) par un point de confluence et le point exutoire du réseau, ou encore (3) par un point de confluence et un point en tête du réseau. Les tronçons du réseau sont (1) de type “rivière”, (2) de type “lac” ou (3) de type “réservoir avec barrage”.

À l’aide des orientations d’écoulement, il est ensuite possible de déterminer les sous-bassins versants associés à chacun des tronçons du réseau hydrographique. La définition des sous-bassins est directement liée au découpage du réseau en tronçons. Ainsi, à chaque tronçon de type “rivière” est associé un et un seul sous-bassin. Ce dernier est défini par l’étendue de terrain qui se draine directement¹ dans le tronçon “rivière” auquel il est associé. Les tronçons de type “lac” diffèrent de cette règle. En effet, compte tenu de la superficie importante qu’ils occupent dans le plan, les tronçons de type “lac” servent à la simulation de processus verticaux en plus de la simulation de l’écoulement par le cours d’eau. De plus, autour d’un lac, on définit un ensemble de sous-bassins qui ont la propriété d’être indépendants entre eux et de se drainer directement dans le lac. Il y a donc généralement plus d’un sous-bassin associé à un tronçon de type “lac”. Les tronçons et les sous-bassins sont les éléments de discrétisation du bassin pour des fins de simulations hydrologiques. Ces éléments forment donc des unités hydrologiques naturelles.

Il est à noter par ailleurs que les orientations d’écoulement, le réseau hydrographique et les sous-bassins versants constituent un ensemble cohérent et intimement lié qui permet de définir la structure d’écoulement du bassin. C’est pour maintenir les liens entre ces données qu’il est nécessaire de déterminer le réseau hydrographique à partir des orientations même, si un réseau vectoriel est disponible en entrée. Il demeure que l’approche préconisée pour cette détermination assure que le réseau déterminé à l’aide des orientations soit un représentant fidèle du réseau fourni en entrée.

¹ On entend par “directement” le fait que le chemin de drainage pour atteindre le tronçon donné n'emprunte pas un autre tronçon

Les informations spatialisées sur l'occupation du sol sont obtenues par télédétection ou toute autre forme d'information adéquate. Pour des fins de modélisation hydrologique, l'occupation du sol est répartie en classes considérées comme significativement différentes en ce qui a trait à leur effet sur les processus hydrologiques. Chacune de ces classes doit être caractérisée par des attributs quantitatifs (hauteur, profondeur racinaire, albédo, indice foliaire) pouvant varier en fonction du temps.

Enfin, la distribution spatiale des types de sol sur chaque unité hydrologique est obtenue à partir des cartes appropriées. L'effet de ces types de sol sur les écoulements est traduit par leurs caractéristiques hydrauliques.

2.4 Simulation des processus hydrologiques

De manière générale, les algorithmes ont été choisis et conçus en fonction de leur compatibilité avec les données spatiales pouvant être fournies par la télédétection et les SIG, mais aussi en fonction de la disponibilité de certaines données sur le bassin traité. On retrouve donc des algorithmes, dérivés de représentations physiques des phénomènes en jeu, qui conservent une part d'empirisme et des algorithmes essentiellement empiriques, comme options de simulation des différents processus hydrologiques.

Le tableau 2.1 présente les options de simulations offertes par HYDROTEL. Les précipitations peuvent être estimées pour chacune des unités hydrologiques, à partir des stations météorologiques disponibles, par deux méthodes d'interpolation classiques. En plus, il est possible de lire directement sur disque des matrices de précipitations obtenues de radars météorologiques ou d'études de pluie maximale probable, par exemple.

La fonte de neige est simulée par une approche mixte basée sur la méthode des degrés-jours pour l'apport énergétique au stock de neige, mais sur un bilan énergétique pour le reste des processus d'évolution et de fonte du stock de neige au sol.

Tableau 2.1 Options de simulation hydrologique disponibles dans HYDROTEL.

Sous-modèle	Options
1. Interpolation des précipitations	1.1 Polygones de Thiessen 1.2 Moyenne pondérée des trois stations les plus rapprochées
2. Evolution du couvert nival	2.1 Méthode mixte (degrés-jours)-(bilan énergétique)
3. Evapotranspiration potentielle	3.1 Thornthwaite 3.2 Linacre 3.3 Penman-Monteith 3.4 Priestley-Taylor 3.5 Hydro-Québec
4. Bilan vertical	4.1 Bilan vertical en trois couches (BV3C) 4.2 CEQUEAU (modifié)
5. Ecoulement vers la rivière	5.1 Onde cinématique
6. Ecoulement en rivière	6.1 Onde diffusante 6.2 Onde cinématique

Quant à l'évapotranspiration potentielle, dont est tirée l'évapotranspiration réelle dans le modèle, elle peut être estimée, selon les données disponibles, par l'équation de Penman-Monteith (la plus complète) ou par d'autres équations dont celle développée par Hydro-Québec, récemment ajoutée aux options proposées antérieurement. Comme l'équation de Thornthwaite, l'équation d'Hydro-Québec est basée essentiellement sur les températures journalières maximales et minimales de l'air. Toutefois, les comparaisons effectuées jusqu'à maintenant entre cette équation et les autres indiquent des estimations par l'équation d'Hydro-Québec qui peuvent se comparer très favorablement en moyenne à celles fournies par l'équation de Penman.

Le bilan hydrologique vertical sur chaque unité hydrologique peut être effectué soit par essentiellement le même bilan hydrologique que celui utilisé dans le modèle CEQUEAU, soit par

BV3C, un algorithme plus près des processus physiques, permettant en particulier de tenir compte de la variabilité spatiale des sols sur le bassin et répartissant l'épaisseur de sol participant aux écoulements en trois couches d'épaisseurs variables, d'où son nom de Bilan Vertical sur Trois Couches (BV3C). Cet algorithme tient aussi compte d'autres caractéristiques physiques du sol comme la porosité, la conductivité hydraulique et le potentiel matriciel du type de sol majoritaire sur l'unité hydrologique relativement homogène constituée par chacun des sous-bassins. Ces caractéristiques peuvent être mesurées sur place ou peuvent être tirées de valeurs proposées dans la littérature pour divers types de sol, valeurs qui sont proposées par défaut par le modèle.

Le transfert des lames d'eau produites à chaque pas de temps sur les unités hydrologiques vers les cours d'eau est effectué par un hydrogramme géomorphologique spécifique à chaque unité et dont les valeurs sont déterminées à partir du cheminement d'une lame d'eau de référence effectué par un algorithme d'onde cinématique permettant de tenir compte de la structure d'écoulement de maille à maille à l'intérieur de l'unité et de la rugosité du trajet vers le cours d'eau. Cet hydrogramme géomorphologique simule donc l'effet tampon de l'unité, découlant de la propagation de la lame d'eau de chaque maille de l'unité vers la rivière.

Enfin, deux options permettent d'effectuer le cheminement de l'eau dans le cours d'eau, l'onde cinématique et l'onde diffusante. Cette approche permet de tenir compte des caractéristiques des cours d'eau du bassin. En particulier, on tient compte de la pente, de la largeur et de la rugosité de chaque bief du réseau hydrographique du bassin. L'effet des lacs et des barrages est également pris en compte. Dans le cas des barrages, l'approche de modélisation a été ajustée de manière à remplir les objectifs du présent projet. Cette approche ajustée est présentée en détail au chapitre suivant.

2.5 Autres caractéristiques du modèle et domaine d'application

Le modèle HYDROTEL a été conçu de manière à fournir le plus d'informations possibles à l'utilisateur en cours de simulation et à la fin de la simulation. Ainsi, il est possible, en cours de simulation, d'afficher des cartes présentant la distribution spatiale de variables diverses choisies par l'utilisateur, cartes qui peuvent être consultées interactivement. A titre d'exemple, on peut suivre l'évolution spatio-temporelle du contenu en eau de chaque couche de sol, ce qui permet en tout temps de vérifier quelles parties d'un bassin sont saturées. Le ruissellement peut aussi être cartographié. D'autres cartes présentent les débits entrant et sortant de chaque bief, ainsi que les débits latéraux pénétrant dans le bief. Toutes ces données peuvent aussi être stockées pour analyse ultérieure.

Des scénarios de variation de l'occupation du territoire en vue d'étudier l'effet de ces variations sur les écoulements peuvent être réalisés. On peut aussi simuler diverses règles de gestion de barrages ou encore des crues maximales probables ou de période de retour donnée.

Jusqu'à maintenant le modèle hydrologique HYDROTEL a été appliqué sur des bassins de superficies diverses. Il a démontré une bonne souplesse d'adaptation aux caractéristiques variées des bassins sur lesquels il a été appliqué. En particulier, le modèle a été appliqué sur la bassin de la rivière Chaudière (Fortin *et al.*, 1999, Turcotte *et al.*, 1999b) dans le cadre du projet GIBSI (Gestion Intégrée de Bassins versants par un Système Informatisé) de l'INRS-Eau (Villeneuve *et al.*, 1998; Rousseau *et al.* 1998). Le modèle HYDROTEL et sa structure ont été intégrés à l'intérieur du logiciel GIBSI. Outre le modèle HYDROTEL, GIBSI intègre des modèles d'érosion et de transfert de pollution diverses dans le sol et en rivière. HYDROTEL a aussi été appliqué avec succès pour la simulation des crues de juillet 1996 sur le bassin de la rivière Kénogami. Les résultats associés à ce projet sont sous le couvert de la confidentialité. De plus, le modèle est en cours de préparation sur le bassin de la rivière Mississipi en Ontario par une

firme d'ingénieurs-conseils travaillant pour le Mississippi Valley Conservation Authority, en vue de faire la gestion des écoulements sur le bassin de la rivière. Le projet inclut l'utilisation de précipitations provenant de radars météorologiques ainsi que d'informations hydrologiques que l'on compte tirer des images fournies par le satellite RADARSAT. Les logiciels PHYSITEL et HYDROTEL sont aussi utilisés par des groupes universitaires dans le cadre de projets de recherche et ce sur les bassins du Missouri Creek Valley en Idaho (University of Idaho), de la rivière Raisin en Ontario (Université d'Ottawa), de l'Allondon en Suisse (Institut F.A. Forel, Genève), de la rivière Los Angeles en Argentine (Universidad de Buenos Aires). Finalement, dans les phases initiales de développement, le modèle a été mis en place et testé sur les bassins des rivières Eaton (Québec), Grand (Ontario), Kootenay (Colombie-Britannique) et du Gardon d'Anduze (France).

3 SIMULATION DE L'EFFET DES BARRAGES SUR L'ÉCOULEMENT

L'effet des barrages sur l'écoulement en rivière est simulé dans HYDROTEL à l'aide d'une série de conditions et d'équations qui permettent d'approximer l'approche de gestion préconisée à un ouvrage et la capacité d'évacuation du barrage pour un niveau donné. Il y a donc deux éléments à modéliser: la gestion et la capacité d'évacuation.

3.1 Modélisation de la gestion

Pour la modélisation de la gestion des barrages, nous nous sommes inspirés de modes de gestion ayant lieu au Québec. Des gens ayant des activités reliées à la gestion des barrages au ministère de l'Environnement du Québec et chez Hydro-Québec ont fournis certaines balises quant aux règles de gestion courantes. Nous nous sommes aussi inspirés de quelques plans de gestion, notamment ceux des lacs Mégantic, Kénogami et Mitis. Les informations que nous avons obtenues sur ces plans ont une forme rigoureuse (Kénogami et Mitis) ou une forme plus approximative (Mégantic).

De cette démarche, il est apparu que pour simuler un bon nombre de plans de gestion, HYDROTEL se devait, à la base, d'être en mesure de permettre (1) que les directives de gestion puissent varier à l'intérieur d'une année, de manière, par exemple, à pouvoir simuler des gestions favorisant une approche préventive au printemps mais des niveaux plus élevés en été, et (2) que l'estimation des évacuations puisse varier en fonction des niveaux d'eau. Ce second cas permet de tenir compte de la définition de directives de gestion qui suppose l'entrée en fonction ou le retrait de tel ou tel évacuateur selon le niveau atteint. Autrement, certaines personnes consultées ont aussi laissé entendre que dans certains cas les directives de gestion s'appuient sur des contraintes majeures : des évacuations minimale et maximale possibles et des niveaux minimal et maximal à respecter. Il est donc essentiel que ces aspects puissent aussi être inclus.

L'algorithme présenté plus loin a été conçu de manière à offrir la plus grande souplesse possible pour répondre aux besoins exprimés plus haut. Par ailleurs, les discussions que nous avons eu ont eu tôt fait de nous montrer qu'il est plus facile de modéliser un plan de gestion que la gestion elle-même considérée au jour le jour. Il existe dans le monde de la gestion de barrage une série d'impondérables dont la gestion ne peut être planifiée parfaitement ou dont la planification peut difficilement être mise sous la forme d'un algorithme qui n'inclut que des niveaux et des apports comme critères de décision. C'est notamment le cas dans certaines situations de débits extrêmes, le cas du Saguenay peut être pris comme exemple, où les décisions de gestion sont prises en fonction d'une situation de crise.

3.2 Modélisation de la capacité d'évacuation

Contrairement à la modélisation de la gestion des barrages, l'évaluation de leur capacité d'évacuation est bien contrôlée. Il est généralement possible d'écrire une fonction mathématique permettant d'évaluer les évacuations en fonction du niveau en amont du barrage. Cette fonction est définie à partir de la géométrie et de l'ouverture des évacuateurs. À nouveau, il est à noter que la relation entre le niveau et le débit doit pouvoir être définie par paliers de niveaux. Ceci permet de tenir compte de la disponibilité changeante des évacuateurs lorsque certains niveaux charnières sont atteints. Cette approche par paliers de niveaux est aussi tout à fait compatible avec la définition de plans de gestion qui suppose des ensembles différents d'évacuateurs ou des degrés d'ouverture différents en fonction du niveau.

3.3 Algorithme

Sur le plan algorithmique, nous nous sommes efforcés de définir une approche très générale permettant de couvrir la majorité des plans de gestion dont nous avons été informés. Il est à noter que l'approche présentée est plus générale que ce que nécessite la plupart des cas pratiques. Il demeure que les cas particuliers que l'on peut définir en choisissant des paramètres qui rendent inopérant certaines parties de l'algorithme sont d'un intérêt pratique indéniable.

3.3.1 Pré-requis

Dès qu'il est nécessaire d'établir un lien entre les apports d'eau à un réservoir et le niveau de ce même réservoir, il est nécessaire de connaître la relation qui lie le volume emmagasiné au niveau d'eau. Pour définir cette relation, on utilise une loi polynomiale de la forme suivante :

$$V(h) = v_0 + v_1(h-D) + v_2(h-D)^2 + v_3(h-D)^3 + v_4(h-D)^4 + v_5(h-D)^5 \quad (1)$$

où V : volume dans le réservoir du barrage (m^3),

v_0, v_1, v_2, v_3, v_4 et v_5 : coefficients d'ajustement de la relation,

h : hauteur ou niveau d'eau à l'ouvrage (m), et

D : altitude du datum de référence (m).

Les coefficients d'ajustements sont choisis en fonction de la géométrie du réservoir et, tout comme l'altitude du datum de référence, doivent être fournis en entrée au modèle. Il est important de noter que le datum de référence doit être choisi de telle sorte que la différence entre le niveau d'eau à l'ouvrage et ce datum soit toujours positive. Il est à noter aussi que la méthode de Newton-Raphson est utilisée lorsqu'il est nécessaire d'obtenir la relation inverse de l'équation précédente soit le niveau correspondant à un volume donné. Il est ainsi obligatoire que les paramètres de la relation (1) définissent une fonction monotone croissante à l'intérieur de la gamme de niveaux vraisemblables pour le réservoir de manière à ce qu'un seul niveau vraisemblable corresponde à un volume donné.

L'intervalle de temps entre les manoeuvres est un autre paramètre important car il permet de préciser à quel moment les directives du plan de gestion sont appliquées. En effet, un plan de gestion donné peut imposer qu'un débit faible soit évacué jusqu'à un niveau donné. Lorsque ce niveau donné est outre-passé, le plan de gestion peut imposer l'ouverture d'une vanne supplémentaire et ainsi augmenter la capacité d'évacuation. Or, la réaction en terme d'ajout ou d'ouverture d'une vanne, par exemple, n'est pas nécessairement instantanée lorsque le niveau

charnière est dépassé. Il faut d'abord que la modification du niveau soit détectée et que les manoeuvres nécessaires soient effectuées. Ainsi, il se peut que l'a conformité au plan de gestion d'un barrage soit vérifiée à intervalle de quelques heures, d'une journée ou même d'une semaine. Le paramètre "intervalle de temps entre les manoeuvres" permet de tenir compte de ce temps de réaction.

Ainsi, au niveau de la modélisation, on vérifie si des manoeuvres sont prévues au pas de temps courant. Si c'est le cas, le niveau d'eau en amont du réservoir au début du pas de temps de calcul est utilisé pour choisir quelle est la directive de gestion à suivre. Par exemple, il peut être convenu que dans l'intervalle de niveaux où se situe le niveau courant, il faut utiliser les équations qui correspondent à l'ouverture de trois vannes. Si, au contraire, aucune manoeuvre n'est prévue au pas de temps courant, les équations utilisées pour calculer les évacuations seront les mêmes que lors de la dernière manoeuvre. Ceci implique que même si le niveau a dépassé un niveau charnière à partir duquel il faut modifier les évacuateurs en service et, du même coup, les équations à utiliser, il n'y aura modification des équations qu'au prochain pas de temps où une manoeuvre est prévue.

Il faut noter par ailleurs que dans la mesure où un barrage serait muni d'un système permettant un temps de manoeuvre très rapide ou que le barrage est opéré au fil de l'eau, et qu'alors c'est plutôt la modification de la géométrie d'écoulement en fonction de la hauteur d'eau qui crée des paliers dans la fonction niveau-évacuation, il suffit d'entrer la valeur zéro pour définir l'intervalle de temps entre les manoeuvres.

3.3.2 Contraintes

L'approche générale proposée repose dans un premier temps sur les contraintes liées aux niveaux et aux débits extrêmes. Les contraintes considérées sont les niveaux maximal et minimal et les évacuations minimale et maximale. Ces contraintes transcendent le calcul des évacuations à l'aide de la fonction niveau-évacuation. Ceci implique que, suivant cette première étape de

l'algorithme, les évacuations calculées devront permettre en tout temps d'assurer un débit minimal, de ne pas dépasser le débit maximal et de maintenir un niveau se situant entre les niveaux maximal et minimal proposés. Si les évacuations calculées selon la fonction niveau-évacuation proposée ne permettent pas de respecter les contraintes précitées, ces évacuations seront ajustées de manière à s'y conformer. Il est à noter qu'advenant le cas où il est impossible de respecter simultanément les contraintes sur les débits et sur les niveaux, les débits sont respectés en premier.

Par ailleurs, l'utilisateur voulant s'affranchir de la totalité ou d'une partie des contraintes sur les niveaux et les débits extrêmes peut choisir intentionnellement des valeurs numériques les rendant inopérantes. Par exemple, un débit et un niveau minimaux de zéro, un débit et un niveau maximaux de plusieurs millions de m³/s ou de m.

3.3.3 Fonction niveau-évacuation

Dans l'intervalle de niveaux compris entre les niveaux minimal et maximal, les évacuations sont calculées à l'aide d'une fonction mathématique reliant le débit évacué au niveau amont du réservoir.

L'apport en amont d'un ouvrage donné, tel que calculé par les algorithmes d'Hydrotel, contribue au calcul du bilan de masse dans le réservoir. L'équation de conservation de la masse s'écrit de la façon suivante :

$$V_t - V_{t-\Delta t} = Q_a \Delta t - Q_e \Delta t \quad (2)$$

où V : volume dans le réservoir du barrage (m³),

t : pas de temps courant (s),

Δt : incrément de temps (s),

Q_a : débit d'apport (m³/s), et

Q_e : débit évacué (m³/s).

À l'aide de la relation niveau-volume, il est facile de calculer le niveau correspondant au volume calculé à l'aide de l'équation de conservation de la masse. L'équation (2) peut donc être résolue simultanément avec l'équation qui donne les évacuations. Cette dernière est calculée à l'aide d'une somme d'équations polynomiales reliant l'évacuation au niveau. On parle ici d'une somme d'équations polynomiales car il est possible de définir autant de polynômes qu'il y a d'évacuateurs en service selon la directive de gestion s'appliquant à l'intervalle de niveau considéré. L'équation (3) définit la forme type des équations polynomiales utilisées, alors que l'équation (4) donne l'évacuation totale :

$$Q_{ei}(h) = [(a_0 + a_1(h-R) + a_2(h-R)^2 + a_3(h-R)^3 + a_4(h-R)^4) * (h-R)^b]_i \quad (3)$$

où i : indice de l'évacuateur,

Q_{ei} : débit sorti de l'évacuateur i (m^3),

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 et b : coefficients d'ajustement de la relation de l'évacuateur i ,

h : hauteur ou niveau d'eau à l'ouvrage (m), et

R : altitude du datum de référence pour l'évacuateur i (m).

$$Q_e(h) = \sum_{i=1}^n Q_{ei} \quad (4)$$

où n : le nombre d'évacuateurs en fonction pour la directive de gestion applicable au pas de temps courant.

Le système de deux inconnus (h et Q_e) et de deux équations (2 et 4), elles-mêmes définies à l'aide des équations (1 et 3), est résolu numériquement à l'aide de la méthode de Newton-Raphson.

3.3.4 Approche simplifiée

Comme présenté précédemment, l'utilisateur voulant s'affranchir des contraintes sur les niveaux et les débits extrêmes peut choisir intentionnellement des valeurs numériques les rendant inopérantes. Par exemple, un débit et un niveau minimaux de zéro, un débit et un niveau maximaux de plusieurs millions de m^3/s ou de m . Ceci permet alors d'effectuer le calcul des évacuations à l'aide d'une relation niveau-évacuation uniquement. De la même façon, l'utilisateur qui désire évaluer les évacuations correspondant à une gestion en tentant de cibler un niveau donné n'a qu'à choisir les niveaux minimal et maximal, admissibles pour un réservoir égaux, à ce niveau ciblé. Dans ce cas, chaque fois que les débits minimal et maximal le permettront, les débits évacués seront ajustés de manière à ce que le volume quittant le barrage permette que le niveau amont soit égal au niveau ciblé.

Il est à noter que l'interface d'HYDROTEL est conçue de manière à faciliter la mise en place des deux cas particuliers précédents.

3.3.5 Variation des directives de gestion à l'intérieur d'une année

Il est primordial de noter qu'à la fois l'approche utilisée pour le calcul des évacuations et les caractéristiques propres de la gestion à l'intérieur de cette approche peuvent varier annuellement à un pas de temps journalier. Ainsi, il est possible de définir autant de combinaison de modes de gestion et de paramètres de gestion qu'il y a de jours dans une année. Par ailleurs, ce schéma de gestion annuel est défini pour une année type et est supposée se reproduire invariablement d'une année à l'autre si l'on désire effectuer une simulation s'étendant sur plus d'une année. Évidemment, pour des simulations plus courtes qu'un an, comme c'est le cas en précision, la limitation précédente ne s'applique pas.

4 LE BASSIN DE LA RIVIÈRE MITIS

Le bassin de la rivière Mitis, illustré à la figure 4.1, couvre une superficie² de 1829 km² et est situé à la confluence entre la région du Bas-St-Laurent et de la Gaspésie. Le bassin déverse ses eaux dans le fleuve St-Laurent à la hauteur de la baie de Mitis, à l'est de la localité de Ste-Flavie. Il existe quatre ouvrages hydrauliques majeurs sur le bassin. Les deux premiers, les barrages Mitis 1 et Mitis 2, sont situés sur la rivière Mitis à quelques kilomètres de l'exutoire. Les deux autres, les barrages Mitis et Mistigouèche, sont situés dans la partie sud du bassin. Le barrage Mitis, dont la superficie amont est de 307 km², est situé à l'exutoire de la série de lacs constituée, de l'aval vers l'amont, des lacs Inférieur, À la croix et Supérieur qui sont localisés au sud-est du bassin. Les évacuations de ce barrage s'écoulent dans l'extrémité amont de la rivière Mitis. Le barrage Mistigouèche, par lequel se draine une surface de 127 km², est quant à lui situé à l'exutoire du lac Mistigouèche localisé au sud-ouest du bassin. Les eaux en provenance de ce barrage s'écoulent jusqu'à la rivière Mitis après avoir transité par le lac Des eaux mortes et la rivière Mistigouèche, longue de quelques dizaines de kilomètres et dont la superficie drainée à la confluence avec la rivière Mitis est de 464 km². La rivière Mitis a un troisième tributaire important, soit la rivière Neigette dont les écoulements ne sont contrôlés par aucun ouvrage. Cette rivière draine une surface de 566 km² localisée dans la partie nord-ouest du bassin. Les pentes des rivières Mistigouèche et Mitis, en amont de la confluence avec la rivière Mistigouèche, sont relativement importantes (environ 0,2%) alors que les pentes de la partie aval de la Mitis de même que les pentes de la rivière Neigette sont faibles.

La simulation des apports naturels à trois de ces barrages (Mitis 1, Mitis et Mistigouèche), ainsi que le laminage des crues et leurs effets sur l'écoulement par le réseau hydrographique est de première importance dans le cadre du présent projet. Ainsi, il sera fréquent dans ce rapport d'identifier les sous-bassins versants situés en amont des barrages Mitis et Mistigouèche par le nom des barrages eux-mêmes, le sous-bassin versant en amont de Mitis 1 par le nom "Mitis total"

² Les superficies présentées sont celles estimées par PHYSITEL

et le même sous-bassin versant mais amputer des sous-bassins Mitis et Mistigouèche par le nom “Mitis intermédiaire” ou “Mitis inter”. Cette appellation est inspirée de la façon de faire du personnel d’Hydro-Québec.

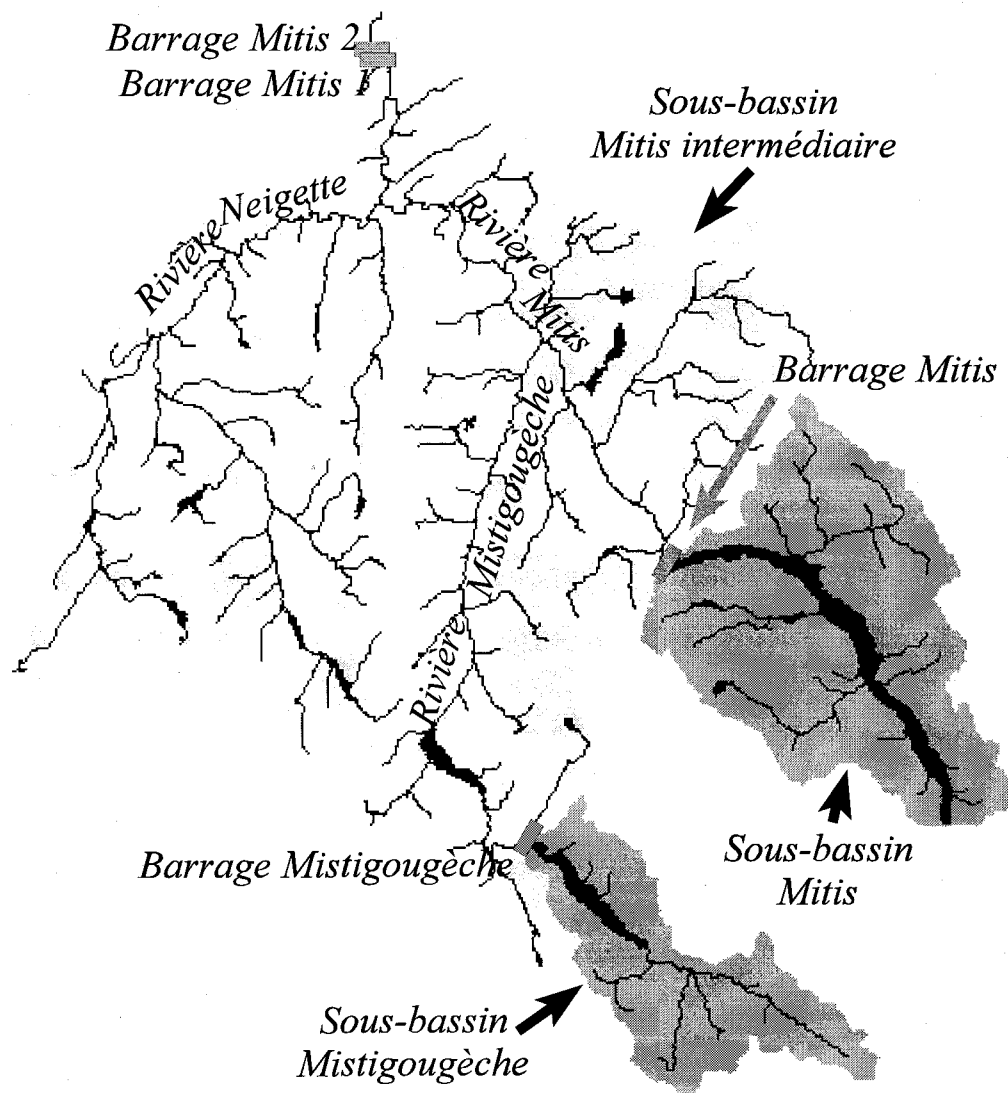


Figure 4.1 Le bassin de la rivière Mitis et ces principales composantes.

5 PRÉPARATION DE LA BASE DE DONNÉES DESCRIPTIVE DU BASSIN DE LA RIVIÈRE MITIS

La modélisation hydrologique à l'aide d'Hydrotel s'appuie sur une description numérique systématique du bassin versant de la rivière Mitis. L'objectif du présent chapitre est de présenter à la fois les données, les traitements appliqués aux données et la description systématique du bassin qui est utilisée par Hydrotel.

5.1 Données descriptives du bassin

Dans le cadre du présent projet, la description du bassin versant pour le modèle HYDROTEL s'effectue selon trois volets : (1) la détermination de la structure d'écoulement du bassin versant, (2) la structuration des données sur l'occupation du sol et (3) la structuration des données sur les types de sols.

5.1.1 Détermination de la structure d'écoulement

La détermination de la structure d'écoulement du bassin versant s'effectue à l'aide du logiciel Physitel. Les données d'entrée et les algorithmes de Physitel sont décrits succinctement au chapitre 2 et de manière plus détaillée dans le texte de Turcotte *et al.* (1999a).

5.1.1.1 Acquisition des données

Les données d'entrée utilisées sont un modèle numérique d'altitude (MNA) et des cartes numériques du réseau hydrographique. Pour le bassin de la rivière Mitis, les feuillets numériques 22B et 22C, selon la notation du système national de référence cartographique canadien, à l'échelle 1:250 000 permettent de couvrir la région d'intérêt. Le modèle numérique des altitudes a été obtenu dans le format NTS DEM du USGS et les cartes numériques du réseau hydrographiques ont été reçues dans le format COGIF. Les données ont été acquises par Hydro-Québec du fournisseur Géomatique Canada et ont ensuite été transmises à l'INRS-Eau.

5.1.1.2 Pré-traitement des données

Le traitement préliminaire appliqué au modèle numérique d'altitude (MNA) a consisté (1) à transformer les cartes dont les coordonnées étaient exprimées en longitude-latitude selon une projection UTM NAD 83 zone 19 sur un maillage carré de 100m de résolution et ce en rééchantillonnant selon le plus proche voisin,(2) à réunir les deux cartes (22B et 21C), (3) à transformer les altitudes exprimées en pieds en altitudes exprimées en mètres et (4) à circonscrire une sous-image de travail englobant la totalité du bassin de la rivière Mitis. Il a aussi été nécessaire de transformer le format NTS DEM du USGS dans le format matriciel ASCII accepté par PHYSITEL. La figure 5.1 permet de visualiser le MNA dans le secteur du bassin de la rivière Mitis, tel qu'importé dans PHYSITEL.

Les cartes numériques du réseau hydrographique utilisées ont été conçues initialement à des fins de graphisme. De ce fait, divers traitements ont dû leur être appliqués de manière à pouvoir en extraire des renseignements à caractère physique sur les écoulements. Principalement, il a été nécessaire (1) d'éditer les cartes numériques de manière à transformer les lacs en surfaces fermées, (2) de vérifier que chacun des tronçons du réseau soit bien connecté avec les tronçons situés immédiatement en aval ou en amont et (3) de s'assurer que chacun des tronçons soit représenté par un trait unique. Ces modifications ont été faites à partir d'un logiciel commercial de traitement d'image (EASI/PACE, PCI Geomatics inc.) qui inclut des fonctions de systèmes d'information géographique (SIG). Finalement, il a été nécessaire de transformer les cartes numériques initialement dans le format COGIF, vers le format de EASI/PACE, puis finalement vers le format d'importation ASCII de PHYSITEL. La figure 5.2 présente le réseau hydrographique numérique après son importation dans PHYSITEL.

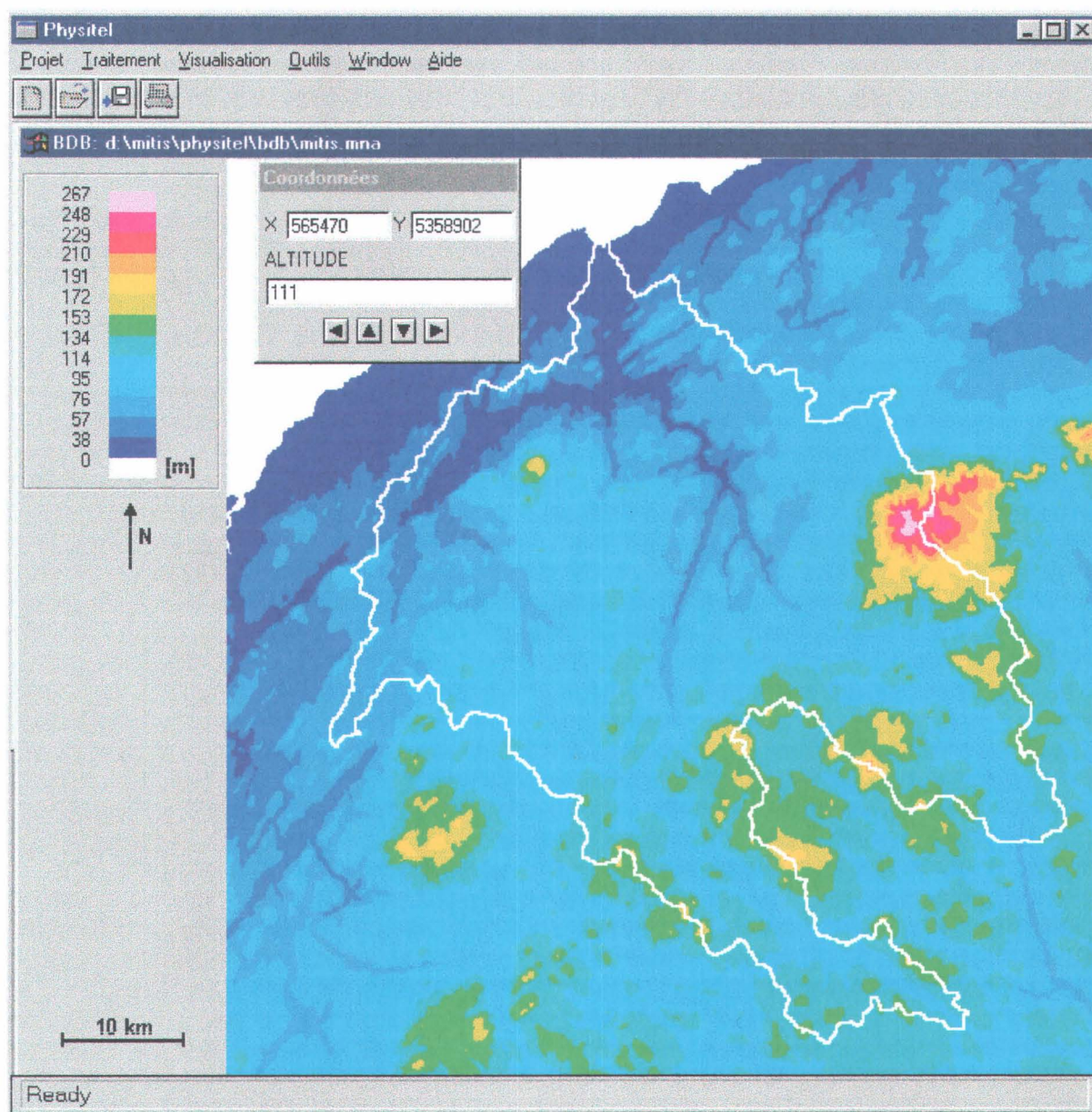


Figure 5.1 Modèle numérique des altitudes englobant le bassin de la rivière Mitis.



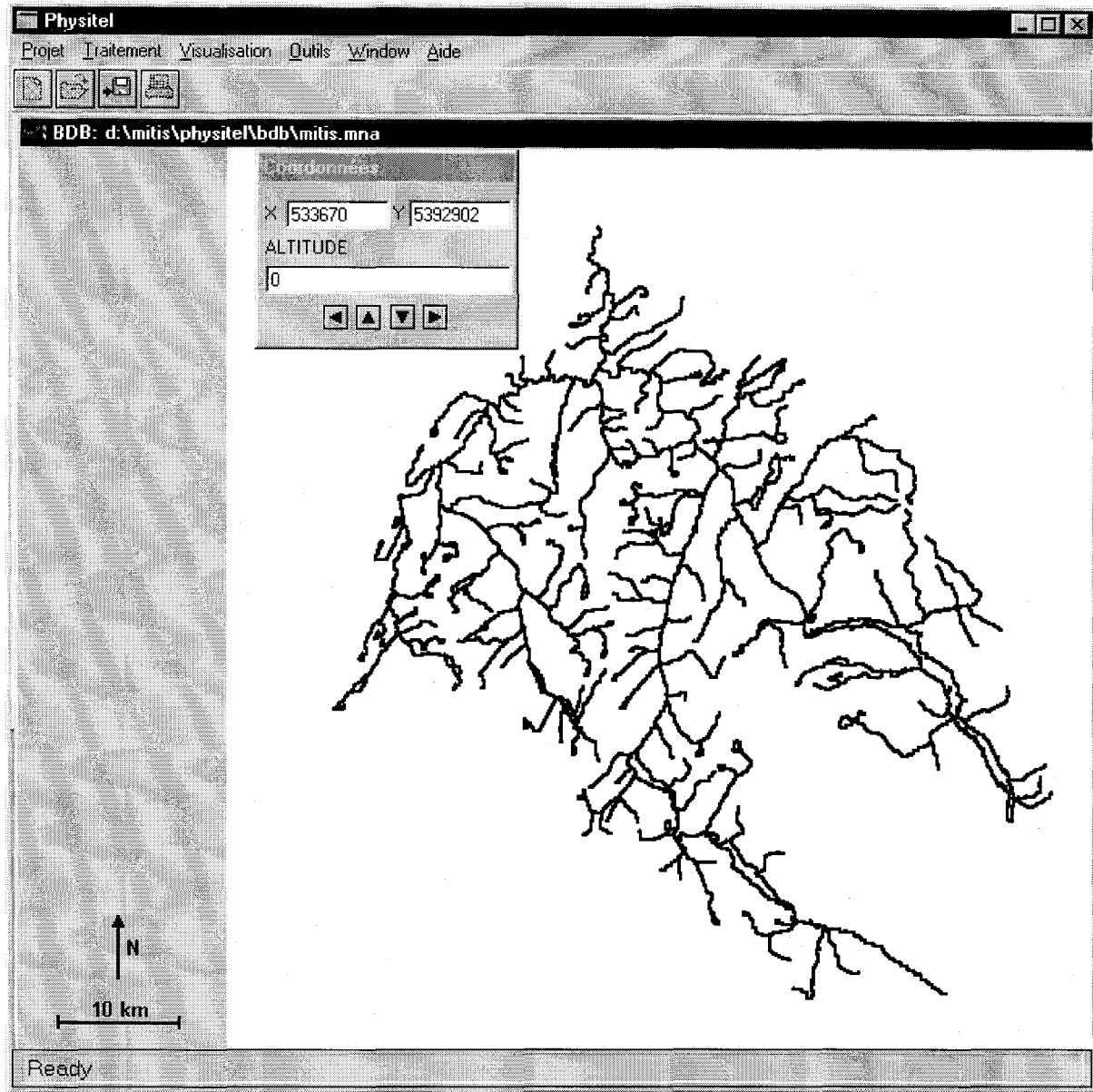


Figure 5.2 Réseau hydrographique numérique obtenu des cartes numérique de la région de la rivière Mitis.

5.1.1.3 Détermination de la structure d'écoulement

Pour des fins de simulation dans HYDROTEL, il est nécessaire d'obtenir la structure d'écoulement du bassin versant de la rivière Mitis. Cette structure d'écoulement est définie par l'intermédiaire des orientations et des pentes d'écoulement de chacune des mailles du MNA, par les tronçons du réseau hydrographique et par les sous-bassins versants qui leur sont associés. Dans Hydrotel, les sous-bassins sont les unités spatiales qui servent de base aux simulations des processus hydrologiques verticaux (par exemple: l'évapotranspiration et l'infiltration de l'eau dans le sol) et de l'écoulement sur la partie terrestre du bassin (par exemple: le ruissellement de surface). Les tronçons, quant à eux, sont utilisés pour la simulation de l'écoulement dans les cours d'eau.

La détermination de la structure d'écoulement requiert des algorithmes disponibles dans PHYSITEL. Le réseau hydrographique et les sous-bassins versants sont déterminés à partir des orientations d'écoulement de telle sorte qu'il existe une cohérence parfaite entre ces trois renseignements. C'est pour maintenir cette cohérence qu'il est nécessaire de déterminer le réseau hydrographique à partir des orientations, même si une représentation numérique du réseau est fournie en entrée à PHYSITEL. Par ailleurs, les algorithmes de PHYSITEL assurent la concordance entre le réseau fourni en entrée et le réseau déterminé à l'aide des orientations. Deux paramètres sont nécessaires pour l'utilisation de ces algorithmes.

Le premier paramètre est le seuil de superficie amont que doit minimalement drainer une cellule du MNA pour être considérée comme faisant partie du réseau hydrographique. Il faut comprendre que le choix du seuil influence directement la finesse du découpage du bassin versant en unités de calcul. En effet, un seuil petit conduira à un réseau hydrographique ramifié et, indirectement, à un grand nombre de sous-bassins versants alors qu'un seuil élevé conduira à un réseau peu ramifié et des sous-bassins versants peu nombreux.

Le choix d'un seuil doit permettre d'obtenir un nombre suffisant de sous-bassins pour pouvoir représenter la variation spatiale des caractéristiques du bassin versant et des précipitations tout en évitant que le nombre de sous-bassins soit trop grand et, de ce fait, que les temps de calcul soient prohibitifs. Par ailleurs, outre la question de représentation spatiale versus le temps de calcul, il est recommandé de choisir un seuil qui conduise à un réseau hydrographique dont la ramification soit assez similaire à celle du réseau en place en période de crue de manière à bien reproduire les mécanismes de l'acheminant de l'eau vers l'exutoire du bassin.

Vue la complexité de la tâche, l'intégration systématique des critères précités à l'intérieur d'une procédure permettant de déterminer le seuil à choisir reste à définir. En pratique, l'expérience acquise pour le choix du seuil sur d'autres bassins versants est un bon indicateur de la valeur à choisir. Des tests exploratoires sur le bassin de la rivière Chaudière ont montré que la diminution de la qualité des débits simulés près de l'exutoire de ce bassin versant de 6680 km² était acceptable lorsque le seuil passait de 1,5 km² (1880 sous-bassins) à 10 km² (392 sous-bassins) ou 40 km² (118 sous-bassins). Ceci indique que le modèle hydrologique n'est pas extrêmement sensible au seuil. La figure 5.3 donne un aperçu des résultats et de l'approche utilisée pour tirer cette conclusion.

Pour le cas de la rivière Mitis un seuil de 2,5 km² a été retenu. Les sous-bassins versants et le réseau hydrographique obtenu par Physitel suivant l'utilisation de ce seuil sont présentés à la figure 5.4. Le tableau 5.1 présente quelques statistiques concernant les sous-bassins et les tronçons. Le choix du seuil a été dicté par l'objectif d'obtenir un nombre de sous-bassins relativement restreints (environ 400) pour limiter des temps de calcul lorsque le modèle fonctionnera en mode prévision et le respect des caractéristiques du réseau hydrographique, notamment l'existence d'un certain nombre de lacs près de la tête du réseau. Il a semblé aussi intéressant de déterminer un nombre suffisamment élevé de sous-bassins de calcul en amont des lacs Mitis (environ 60) et Mistigouèche (environ 20) de manière à pouvoir vraiment bénéficier d'un modèle distribué sur ces sous-bassins et, ainsi, de pouvoir alimenter les discussions sur les avantages et inconvénients de l'utilisation d'un modèle distribué par rapport à un modèle global.

Tableau 5.1 Résumé statistique des caractéristiques des sous-bassins et des tronçons.

	Sous-bassins		Tronçons	
	Nombre = 404		Nombre = 383 (43 tronçons de type “lac” et 340 tronçons de type “rivière”) Seuil de superficie drainée = 2.5 km²	
	Superficies (km ²)	Altitudes (m)	Longueur (km)*	Pente*
Moyenne	4.5	96	2.4	6.7 x 10⁻³
Écart-type	3.6	31	1.9	7.9 x 10⁻³

* pour les tronçons “rivière” seulement

Le second paramètre est le rayon maximal, autour du réseau hydrographique numérique, à l'intérieur duquel des corrections peuvent être apportées aux orientations d'écoulement de manière à faire coïncider le réseau hydrographique modélisé et celui fourni en entrée. Le choix de ce rayon doit permettre de corriger les orientations dans les secteurs problématiques, notamment les zones plates, tout en évitant de modifier l'orientation d'un nombre superflu de cellules. L'approche la plus conservatrice consiste à choisir le rayon en l'égalant à la différence maximale entre le réseau numérique fourni en entrée et un réseau obtenu à partir d'orientations qui n'auraient subi aucune correction. Dans le cas de la rivière Mitis, après avoir observé un large échantillon de cas de figures, nous avons constaté qu'un rayon de 2 mailles (200 m) serait suffisant pour régler les cas où les orientations sont inadéquates.

5.1.2 Occupation du sol

Les diverses occupations du sol du bassin de la rivière Mitis sont fournies au logiciel Hydrotel pour chacun des sous-bassins versants de simulation. Chaque classe d'occupation du sol doit être associée à des propriétés quantitatives qui les caractérisent.

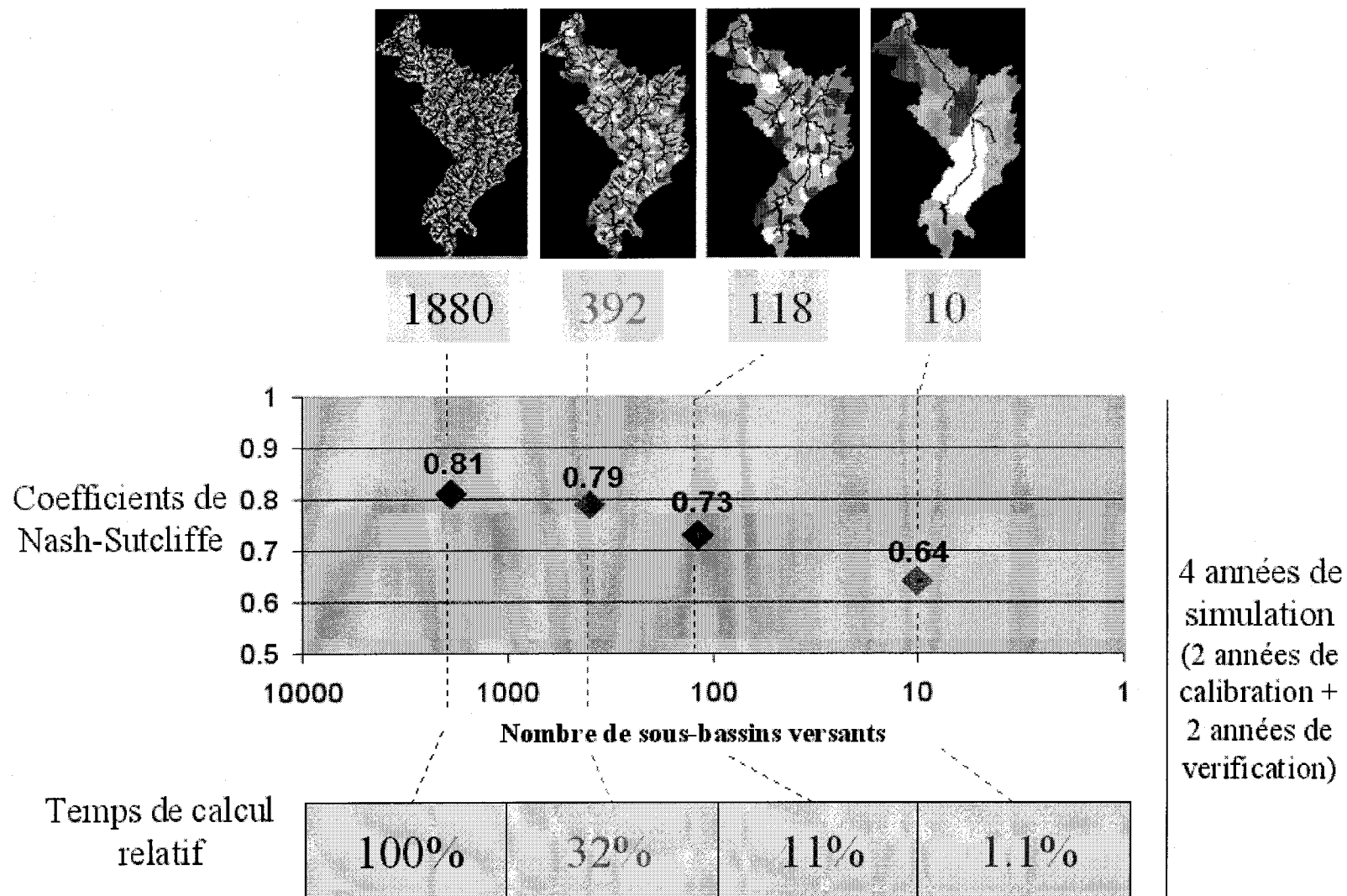


Figure 5.3 Relation entre le coefficient de Nash-Sutcliffe et le nombre de sous-bassins versants utilisés pour discrétiser le bassin de la rivière Chaudière.

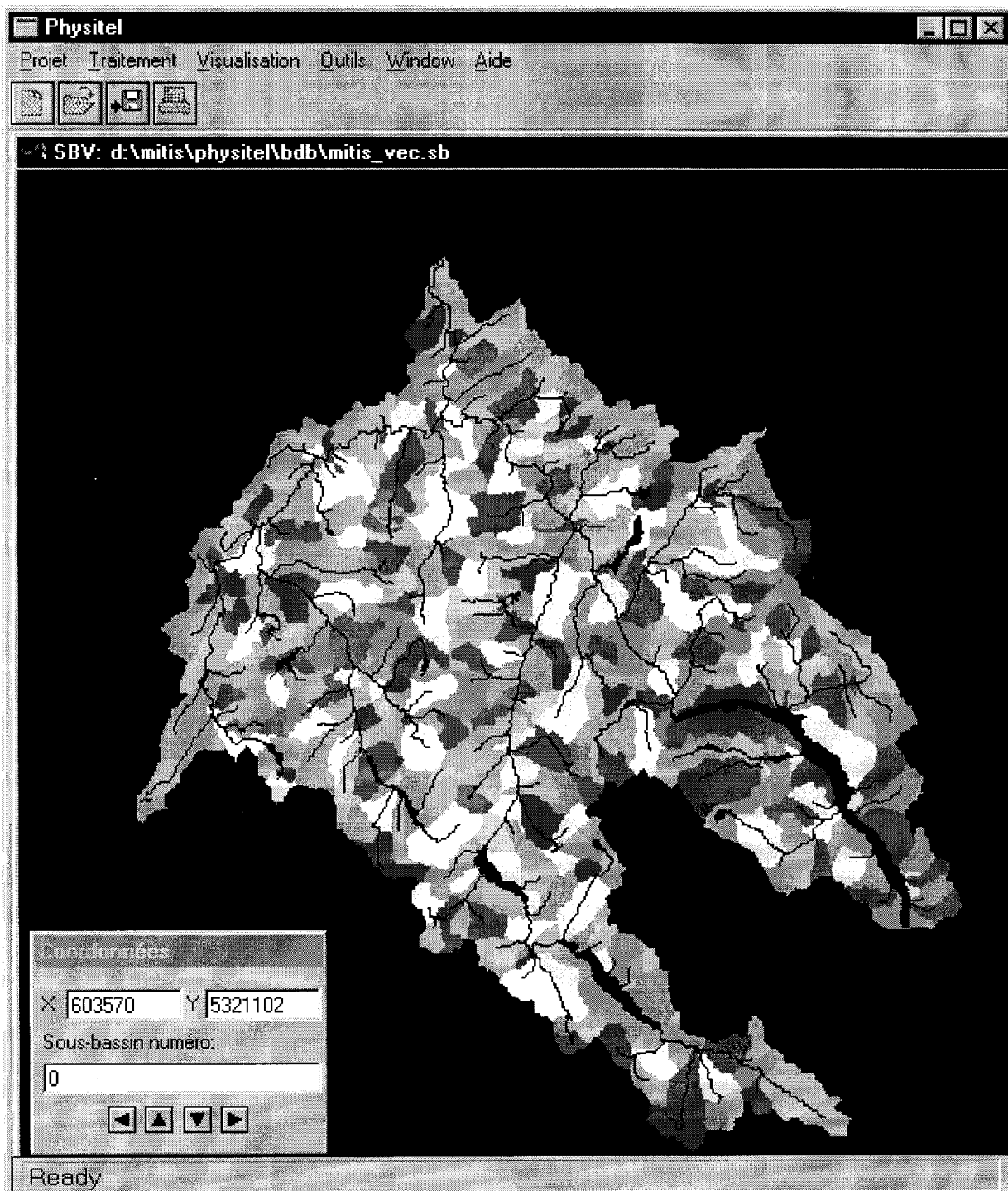


Figure 5.4 Sous-bassins versants de calcul sur le bassin de la rivière Mitis.

5.1.2.1 Acquisition des données

Les données d'occupation du sol ont été obtenues par l'intermédiaire d'une entente avec la direction régionale du Bas-Saint-Laurent du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). Hydro-Québec et l'INRS-Eau peuvent ainsi bénéficier de la classification réalisée à partir de l'image Landsat-TM prise le 14 août 1995 et qui couvre la totalité du bassin. Le rapport du MAPAQ sur la classification présente les détails techniques ayant conduit aux données reçues par l'INRS-Eau (Savoie et Desmarais, 1999).

5.1.2.2 Pré-traitement des données

Le pré-traitement des données a consisté principalement dans l'exercice de géoréférencer l'image classifiée des occupations du sol. La carte numérique du réseau hydrographique a été utilisée pour déterminer des points de contrôle. Des algorithmes standards disponibles dans EASI/PACE ont été utilisés. Les étapes principales ont été: (1) d'importer dans EASI/PACE les données initialement dans le format .tifw, (2) de géoréférencer l'image dans la projection du MNA et (3) de créer une sous-image contenant la région du bassin versant de la rivière Mitis.

Quelques regroupements de classes ont aussi été effectués de manière à réduire le nombre de classes d'occupation du sol en éliminant des classes ayant des effets semblables sur l'hydrologie. La carte finale obtenue est présentée à la figure 5.5. On remarque que la partie sud du bassin est principalement forestière. La forêt côtoie une agriculture plus abondante dans la partie nord. Le tableau 5.2 présente les superficies relatives que couvrent les occupations du sol sur le bassin.

5.1.2.3 Agrégation à l'échelle des sous-bassins versants

Les données sur les classes d'occupation de sol sont agrégées sur chacun des sous-bassins versants en conservant le pourcentage de la superficie du sous-bassin occupé par chacune des classes d'occupation (par exemple : pour un sous-bassin donné : 90% de type forêt mixte et 10% de type urbain).

Tableau 5.2 Classes d'occupation du sol et pourcentages de la superficie du bassin occupé par chacune de ces classes.

Classe d'occupation du sol	Pourcentage du bassin	Classe d'occupation du sol	Pourcentage du bassin
Non classé	3	Friches	3
Urbain	0	Forêt de feuillus	28
Céréales	2	Forêt mixte	32
Cultures spécifiques	1	Forêt de résineux	13
Foins et pâturages	9	Regénération en feuillus	6
Eau	2	Coupes récentes	3

5.1.2.4 Attributs quantitatifs de l'occupation du sol

L'indice foliaire sert à estimer l'effet d'écran pour la pénétration du rayonnement solaire jusqu'au sol nu. Sur le bassin de la rivière Mitis, la plupart des surfaces sont suffisamment végétalisées pour que le rayonnement solaire soit très faible au niveau du sol. Le processus est donc davantage un processus de transpiration qui doit tenir compte de la profondeur racinaire pour aller puiser l'eau dans les couches de sol. Le tableau 5.3 présente les valeurs d'indice foliaire et de profondeur racinaire en fonction du temps pour chacune des classes d'occupation du territoire présentes sur le bassin. Il est à noter que les valeurs présentes ont été déduites de la littérature et de l'expérience des modélisateurs.

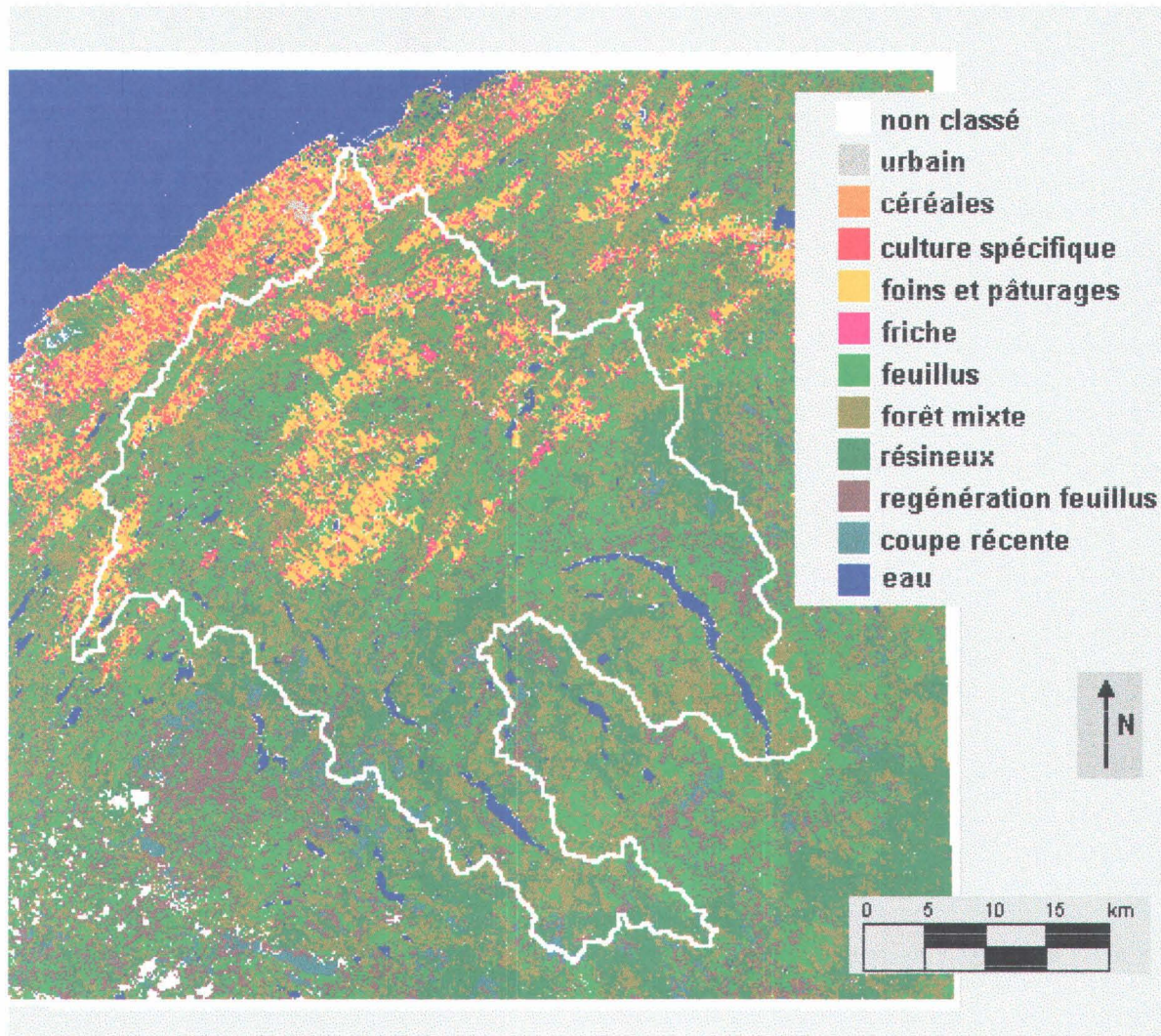


Figure 5.5 Carte des occupations du sol dans la région du bassin de la rivière Mitis.



Tableau 5.3 Indices foliaires (IF) et profondeurs racinaires (PR) des classes d'occupation du territoire sur le bassin de la rivière Mitis. Les profondeurs racinaires sont en mètres.

Jour julien	1		100		180		260		365	
Classe	IF	PR	IF	PR	IF	PR	IF	PR	IF	PR
Urbain	1	1	2	1	3	1	3	1	1	1
Céréales	1	0	2	0.2	3	0.4	2	0.2	1	0
Culture spécifique	1	0	2	0.2	3	0.4	2	0.2	1	0
Foins et pâturage	1	0.4	2	0.4	2	0.4	2	0.4	1	0.4
Eau	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Friches	2	0.8	3	0.8	4	0.8	4	0.8	2	0.8
Forêt de feuillus	3	3	3	3	5	3	3	3	3	3
Forêt mixte	3	4	3	4	3	5	3	5	3	4
Forêt de résineux	3	6	3	6	3	6	3	6	3	6
Regénération en feuillus	1	1.5	2	1.5	3	1.5	3	1.5	1	1.5
Coupes récentes	0	0.8	1	0.8	1	0.8	1	0.8	0	0.8

Il est à noter que de manière général d'autres attributs de l'occupation du sol peuvent être fournis à Hydrotel, tel que l'albédo et la hauteur de la végétation. Par ailleurs, compte tenu des données météorologiques disponibles et des équations qui seront utilisées pour la simulation ces attributs ne sont pas nécessaires pour le présent projet.

5.1.3 Types de sol

Le type de sol dominant sur chacun des sous-bassins versants de simulation, de même que ses propriétés hydrauliques, doivent être fournies en entrée au logiciel HYDROTEL. De plus, la profondeur moyenne des sols meubles sur l'ensemble du bassin (ou exceptionnellement pour cette étude sur les trois bassins principaux où des apports sont simulés: Mitis, Mistigouèche et Mitis 1) doit être connue pour la modélisation avec HYDROTEL.

5.1.3.1 Acquisition et justification des données utilisées

Des feuillets sur papier des dépôts meubles à l'échelle 1:50 000 ont été acquis par Hydro-Québec. Les feuillets sur papier ont été préférés à des cartes pédologiques numériques sur les bases de l'expérience acquise lors de l'acquisition et le pré-traitement des données de sol sur le bassin de la rivière Chaudière. Sans entrer dans les détails, il est à noter que sur le bassin de la rivière Chaudière, les données numériques de pédologie disponibles au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) ont nécessité un pré-traitement considérable. Une analyse préliminaire a montré que l'utilisation des données très détaillées provenant des cartes pédologiques améliorerait faiblement les débits simulés comparativement à l'utilisation de données de sols approximées grossièrement, mais conservant les principales caractéristiques des sols en place.

5.1.3.2 Distribution spatiale et attributs des sols

L'analyse visuelle des cartes sur papier a conduit à l'identification de deux classes principales de dépôts meubles, soit: des dépôts glaciaires de type till indifférencié et des dépôts de pente et d'altération. Le comportement hydraulique de ces deux classes de dépôts est relativement semblables et s'apparente à celui des sables. Il a donc été décidé d'utiliser des propriétés hydrauliques constantes spatialement pour l'ensemble du bassin de la rivière Mitis. Chacun des sous-bassins de simulation s'est donc vu attribuer le même ensemble de propriétés hydrauliques. Les propriétés qui ont été attribués au sol ont été obtenues de Rawls et Brakensiek (1989) et sont présentées au tableau 5.4. Comme nous l'affirmions précédemment, il a été supposé que les dépôts meubles en présence sur le bassin ont un comportement assez similaire à celui des sables. Par ailleurs, comme nous ne pouvons pas affirmer avec certitude que le comportement des sols sera exactement celui qui correspond aux propriétés du tableau 5.4, nous pourrions possiblement effectuer un ajustement fin de ces paramètres au moment de l'étalonnage du modèle, si cela s'avère nécessaire.

Une analyse rapide des cartes des dépôts meubles nous permet aussi d'estimer que la profondeur des sols est supérieure à un mètre dans la partie nord du bassin et inférieure à un mètre dans la partie sud du bassin. La distribution spatiale des profondeurs permet *grosso modo* d'affirmer que le sous-bassin Mitis intermédiaire possède des sols dont la profondeur est supérieure à un mètre alors que les sous-bassins de Mistigouèche et de Mitis ont des profondeurs inférieures à un mètre. Des valeurs plus précises de profondeurs seront ajustées lors de l'étalonnage.

Tableau 5.4 Propriétés hydrauliques du type de sol retenu.

Propriété hydraulique	Valeur
Porosité effective	0.417
Porosité à la capacité au champs	0.091
Porosité au point de flétrissement	0.033
Conductivité hydraulique à la saturation (m/h)	0.21
Potentiel matriciel à la saturation (m)	0.1598
Distribution des dimensions des pores	0.694
Coefficient pour l'assèchement	10.0

6 DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES, HYDROMÉTRIQUES ET NIVOMÉTRIQUES

Les données météorologiques sont les données relatives à l'observation des conditions météorologiques prévalant à un endroit donné, notamment les précipitations, les températures de l'air, etc. Les données hydrométriques sont les données qui renseignent sur les flux d'eau dans les cours d'eau, on pense particulièrement aux niveaux d'eau et aux débits. Finalement, les données nivométriques sont les niveaux de neige au sol. Dans le cadre du présent projet, les données ci-haut mentionnées sont connues ponctuellement aux endroits où sont localisés les stations de mesures.

6.1 Données météorologiques

Le réseau de stations météorologiques et le pré-traitement nécessaire pour transformer les données météorologiques sous une forme acceptable par Hydrotel sont présentés ci-après.

6.1.1 Réseau de stations

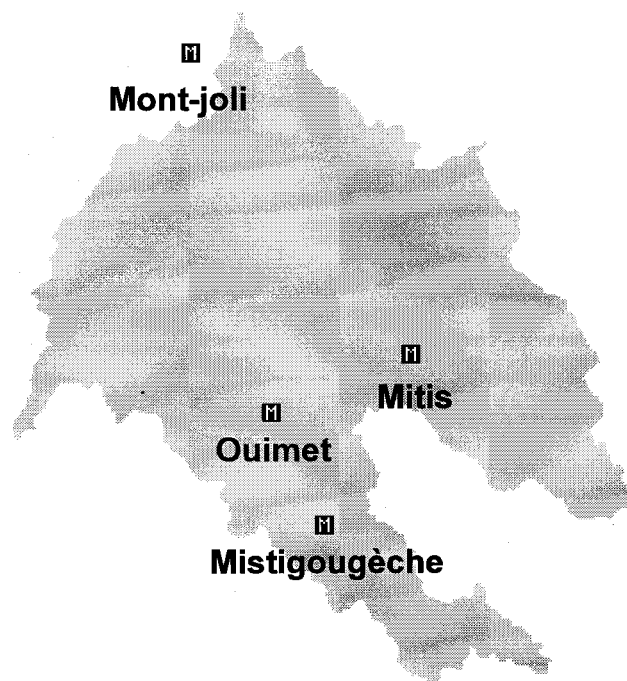
Les données météorologiques que nous avons obtenues proviennent des quatre stations météorologiques identifiées au tableau 6.1. Seules des données de précipitations totales et de températures de l'air étaient disponibles à toutes les stations et ont été obtenues. La figure 6.1 présente la carte des stations.

6.1.2 Pré-traitement

Au niveau des données qui lui servent d'entrée, le modèle HYDROTEL accepte une température par heure par station, lorsque l'on est en présence de données à l'échelle horaire, et les températures maximales et minimales sur l'intervalle de temps, lorsque l'on est en présence de données dont l'intervalle est de 2,3,4,6,8,12 ou 24 heures. Quant aux précipitations requises par HYDROTEL, ce sont les équivalents en eau s'étant abattus à la station pendant l'intervalle de temps qui caractérisent les données (1, 2,3,4,6,8,12 ou 24 heures).

Tableau 6.1 Stations météorologiques et caractéristiques des données obtenues.

Nom de la station	Longitude ouest (degrés.minutes)	Latitude nord (degrés.minutes)	Altitude (m)	Période obtenue	Intervalle temporel
Mont-Joli	68.12	48.36	18	1980/01/01 à 1999/07/13 et 1990/01/01 à 1993/12/31	24h 1h (pluie estivale et température)
Ouimet	68.06	46.17	111	1990/06/20 à 1997/08/31	15 min.
Mitis	67.55	48.17	84	1992/05/07 à 1999/05/10	1h
Mistigouèche	68.02	48.11	91	1992/05/07 à 1999/05/10	1h

**Figure 6.1 Localisation des stations météorologiques.**

Pour la simulation, HYDROTEL est en mesure d'utiliser des données connues à un pas de temps plus fin pour des simulations à un pas de temps plus grands dans la mesure où le second est un multiple entier du premier. Ainsi, si des précipitations et des températures horaires sont fournies en entrée alors qu'une simulation journalière est demandée, HYDROTEL cumulera automatiquement les précipitations sur une période de 24 heures et extraira les températures maximale et minimale sur la même période.

Les données à la station de Mont-Joli, qu'elles soient au pas de temps de horaire ou journalier, étaient connues sous la forme pré-citée. Il n'en était pas de même pour les données à Ouimet, Mitis et Mistigouèche. À Ouimet, il est nécessaire d'abord d'effectuer la moyenne des données de températures de l'air disponibles aux 15 minutes. La stratégie utilisée a été d'effectuer la moyenne des valeurs disponibles sur chaque intervalle d'une heure en excluant les données manquantes. Lorsque les quatre données s'inscrivant à l'intérieur d'un intervalle d'une heure étaient manquantes, la données horaire intégrée correspondante était elle aussi considérée manquante.

Quant aux précipitations, pour les trois stations ci-haut mentionnées, les valeurs disponibles sont des précipitations cumulées. Il a donc été nécessaire de faire la soustraction entre les précipitations cumulées du début et de la fin de chaque intervalle d'une heure de manière à obtenir la précipitation mesurée pendant l'intervalle. Ce travail, en apparence banal, est compliqué par la présence de fluctuations dans la valeur de la précipitation cumulée. Il faut d'abord noter la présence de diminutions importantes et brusques dans la précipitation cumulée. Ces diminutions correspondent à des vidanges de l'appareil de mesure. On considère que la précipitation dans l'intervalle de temps qui précède la vidange est nulle.

Il faut ensuite noter la présence de fluctuations reliées à la précisions de l'appareil de mesure. À la station de Ouimet, la précision étant de 0.2 mm, les fluctuations de cette nature sont sans importance pratique. Il n'en est pas de même à Mitis et Mistigouèche où la précision de

l'appareil est d'environ 3 ou 4 mm. Il n'est pas rare que les précipitations cumulées à ces stations contiennent des périodes de diminutions et de hausses qui sont causées exclusivement par l'imprécision de l'appareil. Il apparaît donc impossible à ces stations de mesures de savoir si toutes les augmentations de 3 ou 4 mm de la précipitation cumulée correspondent à des précipitations réelles ou à un effet de l'imprécision de l'appareil. En pratique, de manière à éviter de sur-évaluer les volumes de précipitations à long terme, nous avons ignoré les fluctuations négatives de l'appareil. Par ailleurs, nous sommes pleinement conscient que, si l'on considère uniquement l'effet de la faible précision des appareils, les stations de Mitis et de Mistigouèche ne fourniront pas des données de précipitations très précises quant au moment où les précipitations faibles (3 ou 4 mm) surviennent. Il demeure que, sur une période plus longue, les erreurs sur la fluctuation des précipitations cumulées ont un effet relatif moins important.

Outre les problèmes pré-cités, les stations Mitis et Mistigouèche sont, selon les dires du personnel responsable chez Hydro-Québec, peu fiables. Il est nécessaire tout au cours de cette étude de porter un regard critique sur tout résultat dépendant directement des données météorologiques issues de ces stations.

6.1.3 Synthèse des données

Le tableau 6.2 donne un aperçu des précipitations observées à chacune des quatre stations sur le bassin. On note immédiatement qu'il y a peu d'homogénéité dans les précipitations mesurées dans la partie sud du bassin. En effet, des différences importantes existent entre les précipitations cumulées à Mitis et à Ouimet, si l'on considère les extrêmes. Ces différences ne semblent *a priori* pas explicables par les phénomènes météorologiques ayant lieu sur le bassin, et, compte tenu des commentaires en provenance de chez Hydro-Québec, nous font croire à un problème de mesure à Mitis. Or, comme la technique de mesure à Mistigouèche est identique, nous croyons qu'il faut aussi être prudent avec ces données même si, à première vue, elles semblent du bon ordre de grandeur.

Tableau 6.2 Précipitations observées, cumulées sur six mois, sur le bassin de la rivière Mitis.

	Mistigouèche	Ouimet	Mitis	Mt-Joli
11/93 à 05/94	528 94%	599 99%	450 95%	481 100%
05/94 à 11/94	572 94%	448 79%	546 93%	527 100%
11/94 à 05/95	527 99%	724 100%	487 99%	626 100%
05/95 à 11/95	530 100%	619 96%	541 99%	611 100%
11/95 à 05/96	477 99%	655 96%	427 94%	469 100%
05/96 à 11/96	656 97%	555 93%	509 97%	415 100%
11/96 à 05/97	446 99%	381 73%	376 100%	446 100%
05/97 à 11/97	518 98%	505 66%	515 99%	456 100%
Total	4254 97%	4486 88%	3851 97%	4032 100%

Le pourcentage inscrit en italique présente le pourcentage de données disponibles
Aucun traitement n'a été fait pour tenir compte des données manquantes

6.2 Données hydrométriques

Le réseau de stations hydrométriques et le pré-traitement nécessaire pour transformer les données hydrométriques pour qu'elles soient utilisables par Hydrotel font l'objet de la présente section.

6.2.1 Réseau de stations

Pour le présent projet, les données hydrométriques qui ont été acquises sont des données de niveaux et d'évacuations des réservoirs et de débits. Elles proviennent des quatre points de contrôle présentés à la figure 6.2 et au tableau 6.3.

Pour les trois stations associées à des réservoirs de barrages, Hydro-Québec a fourni les relations niveau-volume. À ce sujet, il faut noter que pour ce qui est de Mitis et de Mistigouèche, les relations ont été obtenues par régression à travers une série de points de mesure. À Mitis 1, faute de mesures, il a été supposé que la superficie dans le plan du réservoir est invariable en fonction du niveau. Cette approximation, plutôt réaliste, a permis d'obtenir la relation présentée au tableau 6.4.

Tableau 6.3 Stations hydrométriques et caractéristiques des données obtenues.

Nom de la station	Longitude ouest (degrés.minutes)	Latitude nord (degrés.minutes)	Type de données	Période obtenue	Intervalle temporel
Neigette	68.10	48.31	Débits	1975/01/01 à 1998/05/25 et 1994/11/10 à 1998/05/25*	24h 1h
Mitis 1	68.08	48.36	Évacuations	1992/06/25 à 1999/04/29	En fonction des manoeuvres**
			Niveaux	1993/04/23 à 1999/04/30	1h
Mitis	67.55	48.17	Évacuations	1992/06/25 à 1999/02/24	En fonction des manoeuvres**
			Niveaux	1993/04/01 à 1999/04/30	1h
Mistigouèche	68.02	48.11	Évacuations	1992/06/25 à 1999/02/24	En fonction des manoeuvres**
			Niveaux	1993/04/01 à 1998/12/31	1h

* Seules des données concernant quelques épisodes de crues à l'intérieur de l'intervalle mentionné ont été obtenues

** La date et l'heure des manoeuvres conduisant à la modification des évacuations, de même que la valeur de la nouvelle évacuation, sont fournies.

Tableau 6.4 Relations niveau-volume aux réservoirs des trois barrages.

Réservoir	Volume (hm ³)
Mitis	$0.48518 (N-256.428)^2 + 13.09967 (N-256.428) - 2.55082$
Mitis 1	$0.15 * (N - 64.92)$
Mitigouèche	$0.0063805 (N-287.56)^3 + 0.0990206 (N-287.56)^2 - 0.125477 (N-287.56) - 0.0262573$

N : Niveau en amont du barrage exprimé en mètres

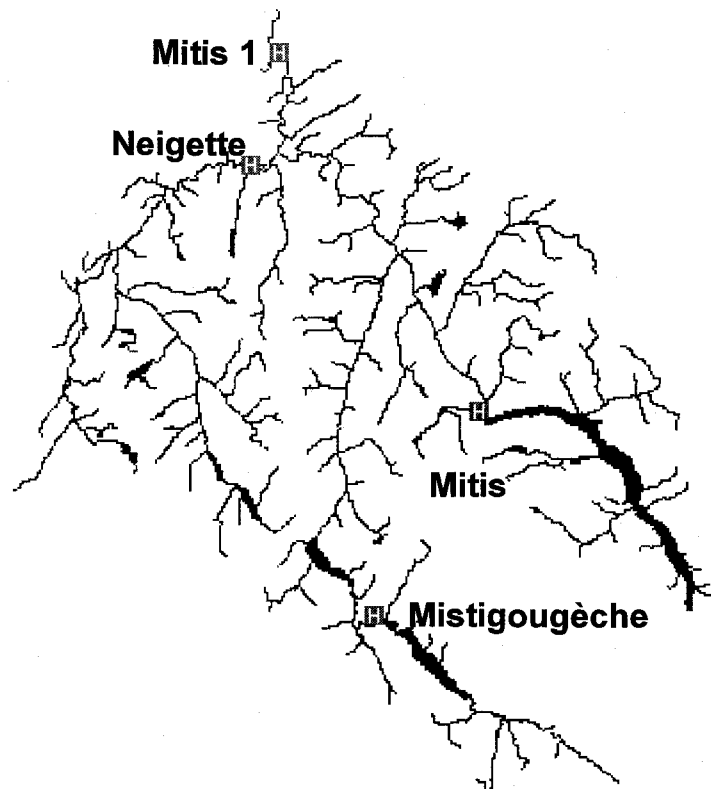


Figure 6.2 Localisation des stations hydrométriques.

6.2.2 Pré-traitement

Dans le cas de la station de la rivière Neigette, le pré-traitement des données de débits a été très simple et a consisté à la modification du format des fichiers d'entrée de manière à être compatible avec les formats acceptables dans HYDROTEL. Par contre, le pré-traitement des données hydrométriques relatives aux trois barrages a nécessité une somme de travail importante. Il faut noter d'abord que le modèle sous sa forme actuelle n'accepte en entrée que des débits. Il est donc nécessaire de reconstituer à l'extérieur d'Hydrotel les débits d'apports aux trois ouvrages à l'aide des évacuations et des niveaux.

La première étape dans la reconstitution des apports est de ramener les données d'évacuations et de niveaux à un pas de temps commun. Comme des simulations aux pas de temps de 6h et de 24h

sont prévues et que la possibilité d'effectuer des simulations horaires pourrait être considérée dans le futur, il a été convenu de choisir l'heure comme pas de temps de base. Les données d'évacuation ont donc été interpolées de manière à combler les périodes entre les manoeuvres. Dans ce cas, nous avons supposé qu'après une manoeuvre, les débits demeuraient constant jusqu'à la prochaine manoeuvre. Ainsi par exemple, si le fichier d'entrée indiquait une manoeuvre le 20 juin à 20h15 et une évacuation résultante de 15 m³/s suivi d'une manoeuvre le 23 juin à 9h27 et d'une évacuation de 21 m³/s, les évacuations du 20 juin 21h au 23 juin 9h inclusivement ont été supposées égales à 15 m³/s. Dans l'heure incluant une ou plusieurs manoeuvres, nous avons supposé, et ce de manière à simplifier l'extraction des données, que l'évacuation est égale à l'évacuation de la dernière manoeuvre incluse pendant cette heure. Ainsi, si on reprend l'exemple précédent, l'évacuation du pas de temps du 20 juin entre 20h et 21h est égale à 15 m³/s et celle du 23 juin entre 9h et 10h est de 21 m³/s.

Dans une deuxième étape, il a fallu s'assurer d'avoir des niveaux valables. Le problème majeur avec les données de niveaux est la présence de bruits ou d'oscillations artificielles enregistrés. Ces bruits peuvent provenir de l'imprécision de l'appareil de mesure, de l'effet des vents ou autres phénomènes perturbant la représentativité de la mesure de niveau. Pour amenuiser les oscillations, il est intéressant d'utiliser un filtre qui élimine les oscillations dont la fréquence est très élevée. Ces oscillations aux fréquences élevées sont les plus susceptibles d'être artificielles.

Une observation minutieuse des courbes de niveau en fonction du temps, nous a permis de conclure que les niveaux aux stations de Mitis1 et de Mitis semblaient être utilisables sans filtrage. Inversement, il nous est apparu qu'il était nécessaire de filtrer les niveaux au lac Mistigouèche. Pour le filtrage, nous avons utilisé un filtre de Hanning en excluant toutes les fréquences supérieures à 1/24h, donc toutes les oscillations ayant une période inférieure à 24h. L'équation associée au filtre de Hanning est présentée ci-après :

$$N_t = \sum_{i=-p}^p \omega_i N_{t+i} \quad (5)$$

- où N_t : le niveau au temps t
 N_{t+i} : le niveau au temps $t + i$
 i : compteur de pas de temps de décalage
 p : la période maximale conservée

$$\omega_i = \frac{1 + \cos(\pi_i / p)}{2p} \quad (6)$$

La décision plus ou moins arbitraire de filtrer ou de ne pas filtrer et, lorsque filtrage il y a, de choisir une fréquence maximale tolérée, et d'éliminer toutes les fréquences supérieures, aura une incidence directe sur les débits d'apport reconstitués aux ouvrages. À ce sujet, il faut noter que plus la fréquence maximale tolérée est faible, c'est-à-dire plus le filtrage est fort, plus les pointes de crues sont évasées. Inversement, ne pas filtrer risque de créer des crues plus pointues. Par ailleurs, l'utilisation d'un filtre ne modifie en rien les bilans de volume d'apport calculés sur des longues périodes (saison, année). Il est important d'avoir ces considérations en tête lors de l'étalonnage du modèle.

Concernant les niveaux, il est aussi essentiel de noter le nombre important de valeurs manquantes à la station du lac Mitis.

La troisième et dernière étape du calcul des débits d'apports consiste à reconstituer ces débits à partir des évacuations et des niveaux horaires. Pour ce faire, il suffit, à chaque pas de temps, d'évaluer l'accroissement (ou la diminution) du volume stocké dans le réservoir. Ce calcul s'effectue en calculant la différence entre le volume stocké au pas de temps précédent et celui du pas de temps courant. Les volumes ci-haut mentionnés sont évalués à l'aide des niveaux mesurés ou issus de l'opération de filtrage et des relations niveau-volume présentées au tableau 6.4. Les accroissements de volume sont transformés en flux en les divisant par le pas de temps de calcul. Les flux ainsi calculés sont sommés aux évacuations correspondantes et permettent d'évaluer les apports.

6.2.3 Synthèse des données

Le tableau 6.5 donne un aperçu des débits observés à chacune des quatre stations de mesure sur le bassin. Les valeurs incluses dans ce tableau indiquent clairement une disparité dans les volumes ruisselés dans la partie sud du bassin, notamment à la station hydrométrique de Mistigouèche et les volumes ruisselés dans la partie nord du bassin, notamment à la station de Neigette. En fait, il y a pratiquement deux fois plus de ruissellement dans la partie sud du bassin qu'il y en a dans la partie nord.

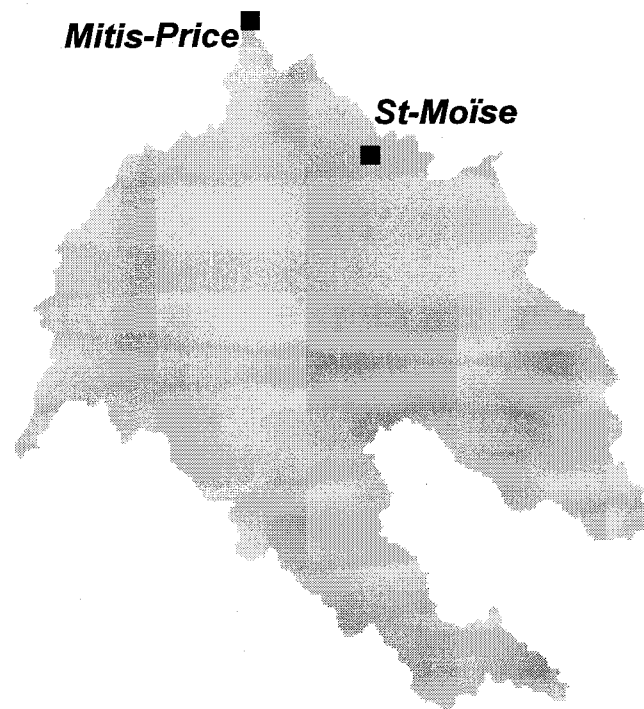
Par ailleurs, on peut noter que cette disparité forte n'est pas présente lorsque l'on considère les données de précipitations (voir tableau 6.2). En effet, même s'il n'y a une diminution des précipitations de la station météorologique de Ouimet à la station de Mont-joli, cette diminution n'est pas aussi radicale. À ce sujet, il est par ailleurs surprenant de remarquer, si l'on ne tient pas compte dans une première approximation des gradients de précipitations à l'intérieur du sous-bassin, que le pourcentage de ruissellement par rapport aux précipitations à Mistigouèche est de 93%. Ceci signifierait, si les données utilisées sont valables, que bien peu d'eau est disponible pour la transpiration des plantes qui occupent une large superficie dans cette partie du bassin. Il faut même remarquer que pour l'été et l'automne de 1997, la précipitation enregistrée à Mistigouèche est insuffisante pour soutenir le ruissellement!

6.3 Données nivométriques

En pratique, deux stations nivométriques sont situées dans la région de travail. Ces stations sont présentées à la figure 6.3 et au tableau 6.5. À ces stations, des données de hauteur de neige, d'équivalent en eau de la neige et de densité sont disponibles à quelques dates au cours de l'hiver.

Tableau 6.6 Stations nivométriques et caractéristiques des données obtenues.

Nom de la station	Longitude ouest (degrés.minutes)	Latitude nord (degrés.minutes)	Période obtenue	Intervalle temporel
St-Moïse	67.59	48.31	1958-1997	3 à 5 mesures par année
Mitis-Price	68.08	48.38	1958-1997	3 à 5 mesures par année

**Figure 6.3 Localisation des stations nivométriques.**

7 ÉTALONNAGE DU MODÈLE

L'étalonnage d'un modèle hydrologique est l'exercice qui consiste à ajuster les paramètres de ce modèle de manière à minimiser les écarts entre certaines variables simulées et les valeurs mesurées de ces mêmes variables. Dans ce chapitre, nous présentons l'étalonnage du modèle sur le bassin de la rivière Mitis en nous attardant d'abord à la stratégie d'étalonnage utilisée, puis en présentant ensuite les résultats d'étalonnage sur les trois sous-bassins étudiés.

7.1 Éléments clés et stratégies d'étalonnage

Dans la présente section, nous présenterons un à un les éléments clés caractérisant l'étalonnage d'Hydrotel sur le bassin de la rivière Mitis. Certains de ces éléments sont repris très succinctement au début des sections traitant de l'étalonnage sur les sous-bassins (7.2 et 7.3) de manière à illustrer comment ils s'appliquent dans ces cas précis.

7.1.1 Importance des séquences de données météorologiques et hydrométriques

Les données d'observations météorologiques et hydrométriques sont les données qui permettent l'ajustement fin du modèle aux conditions hydrologiques prévalant sur un bassin versant. Lors de l'étalonnage, les divers paramètres du modèle sont dans un premier temps choisis de manière à prendre des valeurs physiquement vraisemblables. Certains de ces paramètres sont par la suite réajustés de manière à réduire l'écart existant entre les débits simulés par le modèle et les observations. Le jeu de paramètres résultant de l'étalonnage est donc fortement influencé par la qualité des données météorologiques et hydrométriques. Ainsi, la qualité plus ou moins grande de ces données a un effet direct sur la capacité du modèle à reproduire le comportement du bassin à l'étude.

Pour nous en convaincre, imaginons que les données météorologiques fournies au modèle sont excellentes mais que les données hydrométriques pour les périodes correspondantes sont

systématiquement biaisées. Au moment de l'étalonnage du modèle, certains paramètres prendront des valeurs peu représentatives du comportement du bassin pour permettre un ajustement forcé du modèle aux données biaisées. Il s'ensuit que lorsque le modèle sera utilisé pour simuler, par exemple une crue maximale probable en fonction de la pluie maximale probable, la crue simulée le sera de façon imprécise. Inversement, nous pouvons imaginer que les précipitations sont de mauvaises qualités. Pour reproduire les débits observés sur les périodes correspondant aux précipitations, il sera nécessaire de forcer certains paramètres à prendre des valeurs peu représentatives et ce peu importe le modèle hydrologique utilisé. À la rigueur, on pourrait dire que même si l'on possédait le meilleur modèle physique qui soit, le bassin lui-même, et qu'on le sollicitait avec les précipitations inexactes, il n'arriverait certainement pas à reproduire le débit observé correspondant.

À ce niveau, le présent exercice d'étalonnage est plutôt difficile. En effet, en ce qui a trait aux données météorologiques, deux problèmes majeurs existent. D'abord, les données des stations de Mitis, et dans une plus faible mesure, celles de Mistigouèche, ne sont pas considérées comme très fiables (voir section 6.1). Sur la partie sud du bassin, il n'y a que la station de Ouimet en laquelle nous avons confiance *a priori*. Ensuite, la partie nord du bassin n'est couverte que par la station de Mont-Joli, et ce, au pas de temps journalier. Il n'y a donc, à toutes fins utiles, aucune station dans la partie nord du bassin pour les simulations au pas de temps de six heures. À ce sujet, nous nous retrouvons donc dans une situation où il est fondamental d'effectuer une partie de la réflexion sur l'étalonnage à l'aide de simulation aux 24h de manière à pouvoir compter sur la station de Mont-Joli et où il faudra considérer avec réserve les résultats de simulations au pas de temps de 6h dans la partie nord du bassin.

Il est à noter que les problèmes liés aux stations météorologiques sont considérés cruciaux chez Hydro-Québec, et qu'un effort y est fait pour trouver des stratégies alternatives pour l'obtention de données représentatives des événements pluviaux. En ce sens, si Hydro-Québec parvient à des solutions, nous pourrions réviser la stratégie d'étalonnage.

Quant aux données hydrométriques, certains problèmes ont été notés à la section 6.2. Entre autres, il est évident que les oscillations dans les niveaux amonts des réservoirs créent des imprécisions dans les débits d'apports reconstitués aux ouvrages. Ces imprécisions, comme il a été explicité précédemment (section 6.2), ne génèrent pas d'erreurs sur les bilans de volumes d'apports lorsque des périodes importantes sont considérées. Elles génèrent, par contre, des imprécisions sur la grandeur des pointes. Dans le pire des cas, des oscillations importantes des niveaux peuvent générer des oscillations dans les débits d'apports qui ne sont pas représentatives. Aux erreurs d'oscillations viendront s'ajouter les erreurs sur les évacuations, qui sont supposées constantes entre les manoeuvres, et les erreurs sur les relations niveau-volume que nous croyons moins importantes. Sur le plan de la stratégie d'étalonnage, il apparaît important de ne pas contraindre outre mesure le modèle à coller aux débits d'apports reconstitués. Il est plutôt désiré de tenter de reproduire par simulation les tendances présentes dans la séquence de débits d'apports mesurés et de s'efforcer de respecter les bilans de volume à diverses échelles temporelles (saison, année) lorsque cela est possible.

L'autre difficulté provient du grand nombre de données manquantes à la station du lac Mitis. Cette situation fait qu'il est difficile d'évaluer la qualité de l'étalonnage puisqu'en de nombreuses occasions des débits sont manquants. Sur le plan stratégique, nous supposons que les débits d'apports au lac Mitis se comportent généralement comme ceux du lac Mistigouèche. Ainsi, pour une période relativement longue où il y a des données manquantes à Mitis, nous vérifierons la qualité des simulations en nous assurant que le comportement simulé à Mitis est compatible avec le comportement observé à Mistigouèche. Par exemple, s'il y a une forte crue à Mistigouèche, on supposera qu'il y a eu aussi une crue à Mitis. Loin de donner des valeurs précises, cet approche a, à tout le moins, l'avantage de vérifier si les tendances prédites à Mitis sont en harmonie avec ce qui se passe ailleurs sur le bassin.

Il est à noter finalement que, compte tenu des problématiques associées à la qualité des données hydrométriques, il sera difficile de quantifier la qualité des simulations effectuées par le recours

à des indices tel le coefficient de Nach-Suttcliffe ou la comparaison des volumes de ruissellement observés et simulés. En fait, nous ne recourons à de pareils indices que pour les simulations contrôlées à Mitis 1 où, vue la taille relativement importante du bassin amont, les apports observés contiennent peu d'oscillations et sont plutôt fiables.

7.1.2 Évacuations historiques

La configuration du bassin de la rivière Mitis fait en sorte que les apports totaux au barrage Mitis1 sont constitués des apports naturels provenant du sous-bassin de Mitis Intermédiaire et de l'arrivé par le réseau hydrographique des évacuations des barrages de Mitis et de Mistigouèche. Comme historiquement les évacuations sont connues, la stratégie la plus valable quant à la simulation des apports totaux à Mitis 1 est celle qui consiste à utiliser les évacuations historiques aux deux ouvrages amonts comme conditions aux limites pour leurs effluents respectifs plutôt que de tenter d'évaluer des évacuations à partir des règles de gestion tel que l'autorise Hydrotel. Ceci implique entre autres qu'au moment de l'étalonnage, les apports simulés à Mitis et à Mistigouèche n'auront aucune influence sur les apports estimés à Mitis 1. Cette approche permet d'éviter un transport d'erreur d'un sous-bassin amont au sous-bassin aval.

7.1.3 Distribution des jeux de paramètres

En principe, la version actuelle du modèle Hydrotel ne permet la définition que d'un seul jeu de paramètres pour l'ensemble du bassin versant à l'étude. Or, comme il a été présenté à la section précédente, l'utilisation des évacuations historiques comme conditions aux limites pour les tronçons en aval des réservoirs de Mitis et Mistigouèche permet de rendre indépendants les trois sous-bassins d'intérêt. En ce sens, il devient possible de contourner la limitation d'un seul jeu de paramètres et de définir ici un jeu de paramètres par sous-bassin, soit trois jeux de paramètres en tout.

Par ailleurs, pour obtenir trois jeux de paramètres significatifs, il faut posséder des données suffisantes, notamment des données hydrométriques, permettant d'effectuer un étalonnage distinct

sur chacun des sous-bassins. Dans notre étude, l'insuffisance de données d'apports au lac Mitis, nous a conduit à jumeler les exercices d'étalonnage des sous-bassins du lac Mitis et du lac Mistigouèche en un seul et donc de définir un jeu de paramètres commun pour ces deux sous-bassins.

7.1.4 Période d'étalonnage

Le choix de la période d'étalonnage dépend de la disponibilité des données historiques utilisées. Pour la borne inférieure, les contraintes proviennent des données hydrométriques qui ne sont disponibles qu'à partir du printemps 1993. Or, comme il est courant de débiter les simulations à l'automne de manière à couvrir des années hydrologiques complètes et à minimiser les problèmes des conditions initiales, la date du premier novembre 1993 a été retenue comme date de début des simulations. Pour la borne supérieure, la contrainte vient de la station météorologique de Ouimet, dont on ne peut se passer, pour laquelle nous avons obtenu des données jusqu'à la fin août 1997. De manière à avoir quatre années hydrologiques complètes, nous avons fixé au premier novembre 1997 la date de fin d'étalonnage en utilisant pour la courte période pour laquelle nous n'avons pas de données à Ouimet les données des stations avoisinantes.

7.1.5 Étalonnage versus vérification

La pratique courante en hydrologie veut qu'une première partie de la période disponible pour l'étalonnage soit utilisée pour le calage proprement dit des paramètres et qu'une seconde partie servent à la vérification de l'exercice de calage, quant celui-ci est complété.

Dans le présent exemple, cette approche n'a pu être retenue. Pour les périodes de printemps, il aurait été possible de subdiviser la période de quatre années dont nous disposons en deux périodes de deux ans. Nous aurions pu, à la rigueur, compter sur deux crues de printemps pour étalonner le modèle et sur deux crues de printemps pour la vérification. Ce n'était déjà pas beaucoup, si l'on considère que ces crues doivent être représentatives de longues séries de

données devant contenir des crues importantes compte tenu de l'objectif de ce projet. La situation était pire pour les crues d'été et d'automne qui sont très peu nombreuses sur la période disponible. En effet, il n'existe à toutes fins utiles qu'une seule crue d'été sur la période et quelques crues d'automne tardives. Ces événements trop peu nombreux devaient venir alimenter l'étalonnage et du coup n'étaient plus disponibles pour la vérification. En fait, avant de passer aux phases subséquentes du projet, notamment l'utilisation du modèle en mode prévision, il serait intéressant d'établir une stratégie nous permettant d'étalonner le modèle sur d'autres événements estivaux importants.

Par ailleurs, il est à noter qu'à titre de validation des calculs internes menant à l'obtention des apports, notamment le calcul de l'évolution du couvert de neige, nous pourrions compter sur les données nivométriques des stations identifiées à la section 6.3 pour les quatre années de l'étalonnage.

7.1.6 Choix des sous-modèles

Le logiciel Hydrotel offre un choix de sous-modèles pour la simulation des divers processus hydrologiques affectant un bassin versant. Ces sous-modèles sont sélectionnés en fonction des données disponibles sur le bassin versant. Pour la présente application, les modèles présentés au tableau 7.1 ont été sélectionnés. Le tableau 7.1 présente aussi les principaux paramètres servant à l'étalonnage du modèle.

7.2 Étalonnage des sous-bassins du Lac Mitis et de Mistigouèche

Compte tenu des demandes d'Hydro-Québec, l'étalonnage d'Hydrotel sur le sous-bassin du lac Mitis a été la première des tâches qui a été complétée pour le projet. Cette tâche s'est avérée plutôt ardue. En effet, les plages de données manquantes d'apports à l'ouvrage du lac Mitis sont

Tableau 7.1 Les sous-modèles sélectionnés et leurs paramètres de calage.

Processus	Sous-modèles	Principaux paramètres
Interpolation des données météorologiques	Moyenne pondérée des trois stations les plus proches	<ul style="list-style-type: none"> - Gradient vertical du facteur multiplicatif de la pluie - Gradient vertical de la température - Température de passage de la pluie en neige
Évolution du couvert de neige	Méthode mixte (degrés-jours) - (bilan énergétique)	<ul style="list-style-type: none"> - Facteurs de fonte (zones ouvertes, de feuillus et de résineux) - Seuils de fonte (zones ouvertes, de feuillus et de résineux) - Taux de fonte au sol - Coefficient de compaction
Évapotranspiration	Hydro-Québec	<ul style="list-style-type: none"> - Facteur multiplicatif
Bilan vertical	Bilan vertical en trois couches (BV3C)	<ul style="list-style-type: none"> - Limites inférieures des trois couches - Coefficient de récession
Écoulement sur la partie terrestre du bassin	Onde cinématique	<ul style="list-style-type: none"> - Coefficients de frottement de Manning en surface (zones forestières, ouvertes, d'eau)
Écoulement par le réseau hydrographique	Onde cinématique	<ul style="list-style-type: none"> - Coefficients de frottement de Manning en rivière

nombreuses et sont malheureusement situées à des moments inopportuns, notamment, lors des crues de printemps. Il a donc fallu valider l'étalonnage à lac Mitis à l'aide de l'hydrométrie du Lac Mistigouèche (section 7.1.1). Ce faisant, nous avons décidé de procéder en simultané à l'étalonnage des deux bassins et de définir un seul jeu de paramètres pour les deux bassins (section 7.1.3). De plus, il est apparu impossible de s'appuyer sur les données de la station météorologique du lac Mitis (section 6.2) et, vu la similitude des caractéristiques des stations, un

certain inconfort à recourir aux données météorologiques de Mistigouèche est aussi apparu. Ainsi, pour fins de test l'étalonnage du modèle a été fait à l'aide de simulations n'utilisant que la station de Ouimet et de d'autres utilisant la station de Ouimet et de Mistigouèche, l'idée initiale étant de trouver un jeu de paramètres satisfaisant chacune des deux configurations ou, à tous le moins, de pouvoir prioriser l'utilisation d'un des deux réseaux dans certaines situations données. Par ailleurs, il a été convenu, après que l'étalonnage soit complété, que la configuration du réseau météorologique qui inclut la station de Mistigouèche devrait être conservée pour mieux répondre aux impératifs d'application d'Hydrotel en mode prévision prévue dans la prochaine phase du projet. Les paramètres déterminés par l'exercice d'étalonnage sont présentés au tableau 7.2.

Tableau 7.2 Valeurs des paramètres de calage pour les sous-bassins du lac Mitis et du lac Mistigouèche.

Paramètres	Valeurs
Gradient vertical du facteur multiplicatif de la pluie	0.5 (1/100m)
Gradient vertical de la température	-0.5 (C/100m)
Température de passage de la pluie en neige	0 (C)
Facteurs de fonte (zones ouvertes, de feuillus et de résineux)	25 17 6 (mm j ⁻¹ C ⁻¹)
Seuils de fonte (zones ouvertes, de feuillus et de résineux)	0.5 0.5 0.5 (C)
Taux de fonte	0.3 (mm j ⁻¹)
Coefficient de compaction	0.05 (j ⁻¹)
Facteur multiplicatif de l'évapotranspiration	1.2
Profondeurs des trois couches	0.1 0.3 0.7 (m)
Coefficient de récession	0.0005 (m.h ⁻¹)
Coefficients de frottement de manning en surface (zones forestières, ouvertes, d'eau)	0.35 0.15 0.05
Coefficients de frottement de manning en rivière	0.05

Les figures 7.1 et 7.2 présentent les simulations faites avec les paramètres finaux de l'étalonnage en utilisant la station météorologique de Ouimet pour le lac Mitis et le lac Mistigouèche respectivement. Les figures 7.3 et 7.4 présentent les mêmes résultats mais en utilisant cette fois les données météorologiques de Ouimet et de Mistigouèche. L'analyse des courbes de chacune des années hydrologiques permet de bien relativiser les résultats qui y apparaissent.

Intéressons nous d'abord à la première année hydrologique étudiée, 1993-1994. La première pointe de crue de printemps est absente de la série de données observées au lac Mitis. Par ailleurs, cette crue est plutôt bien simulée à Mistigouèche. On note par ailleurs que la crue de printemps y est extrêmement étendue dans le temps. En effet, la crue débute à la mi-avril et se termine au début juin et même plus tard. Pour arriver à simuler une pareille crue, il est nécessaire de bien répartir dans le temps la contribution à la fonte des zones découvertes, des feuillus et des résineux. C'est principalement cette crue de 1993-1994 qui nous a amené à choisir des paramètres de fonte radicalement différents pour les zones pré-citées. Finalement, il faut aussi noter la présence d'oscillations non significatives dans les apports observés. Les oscillations les plus marquées sont celles de la mi-juin aux lacs Mitis et Mistigouèche et celle du début octobre au lac Mistigouèche.

L'année hydrologique 1994-1995 est caractérisée par un nombre important de données d'apports qui sont manquantes au lac Mitis. Par ailleurs, au printemps 1995, les mesures à Mistigouèche nous renseignent sur la présence d'une petite pointe de crue suivi de deux pointes plus importantes. Les simulations présentées ne permettent pas de simuler la première petite crue. Par ailleurs, l'effet du choix des stations météorologiques est déterminant sur la forme des pointes de crues simulées qui suivent. Dans le cas où l'on utilise Ouimet uniquement, la première des deux pointes de crue est bien simulée et la deuxième pointe est moins bonne alors que lorsque l'on pondère les données de Ouimet avec celles de Mistigouèche, c'est l'inverse qui se produit. Il y a donc pour cette année hydrologique des disparités spatiales dans la météorologie qui font qu'il est difficile de bien simuler les débits avec un réseau de stations météorologiques boiteux.

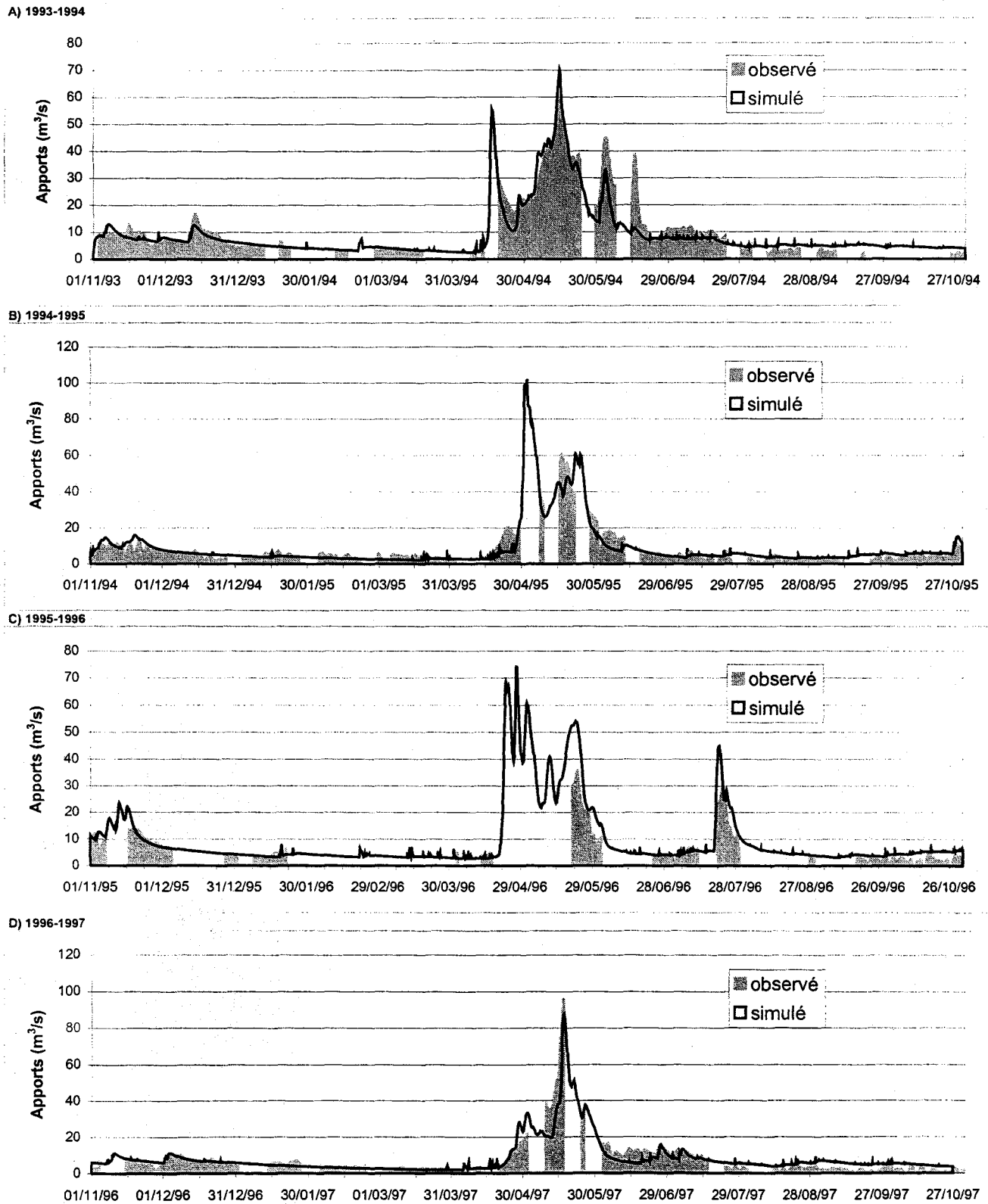


Figure 7.1 Comparaison entre les apports observés et simulés au lac Mitis avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet.

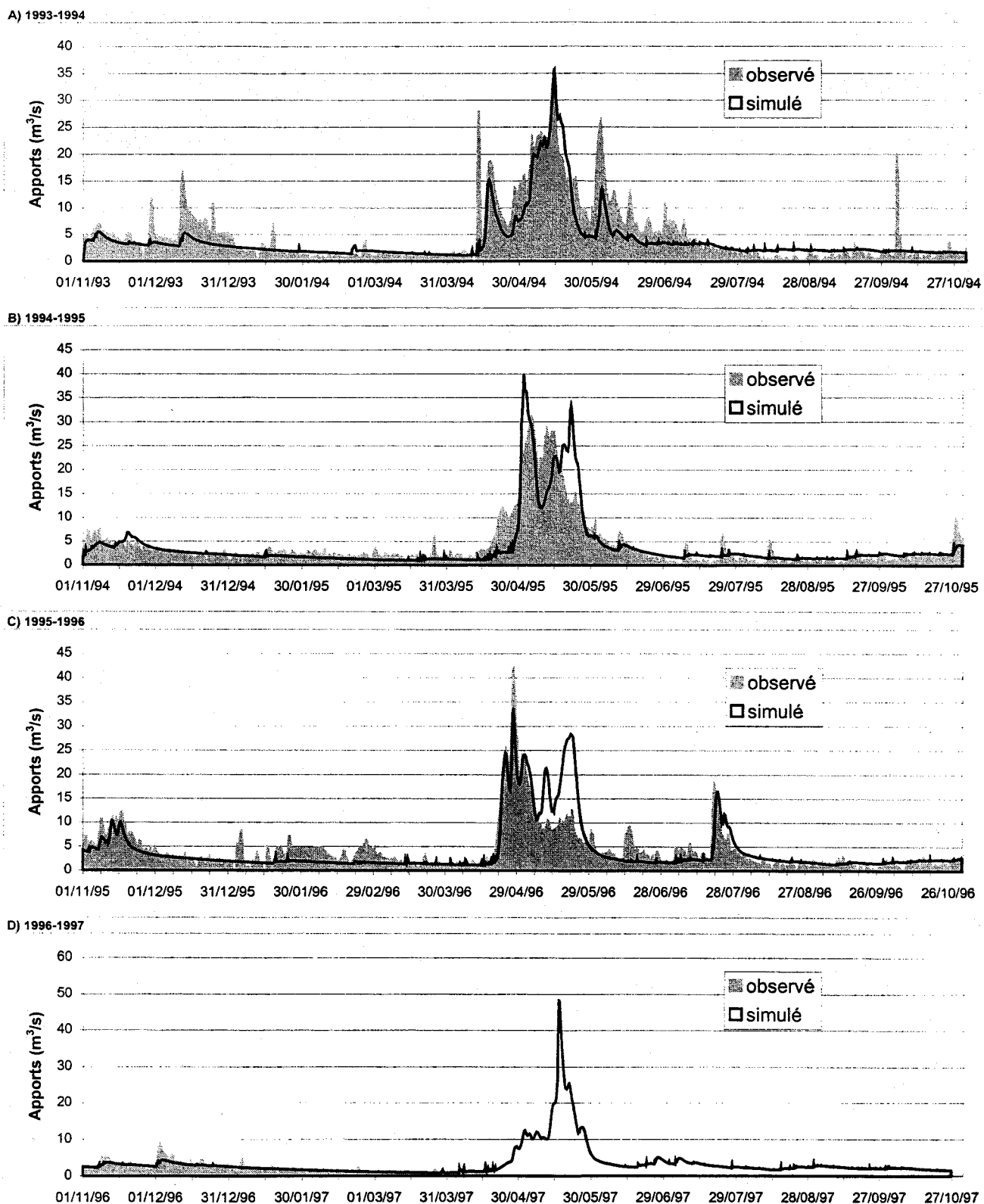


Figure 7.2 Comparaison entre les apports observés et simulés au lac Mistigouèche avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet.

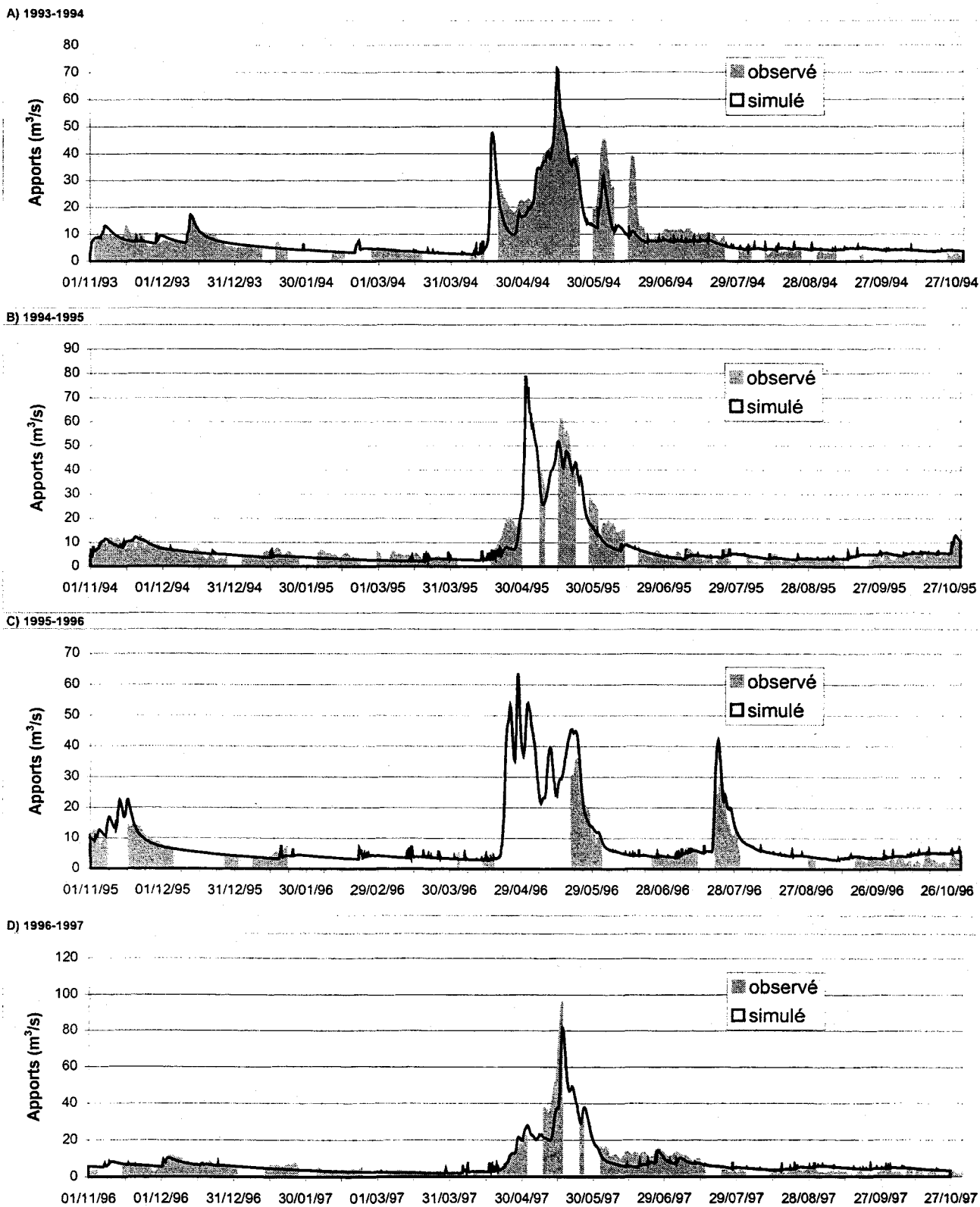


Figure 7.3 Comparaison entre les apports observés et simulés au lac Mitis avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet et de Mistigouèche.

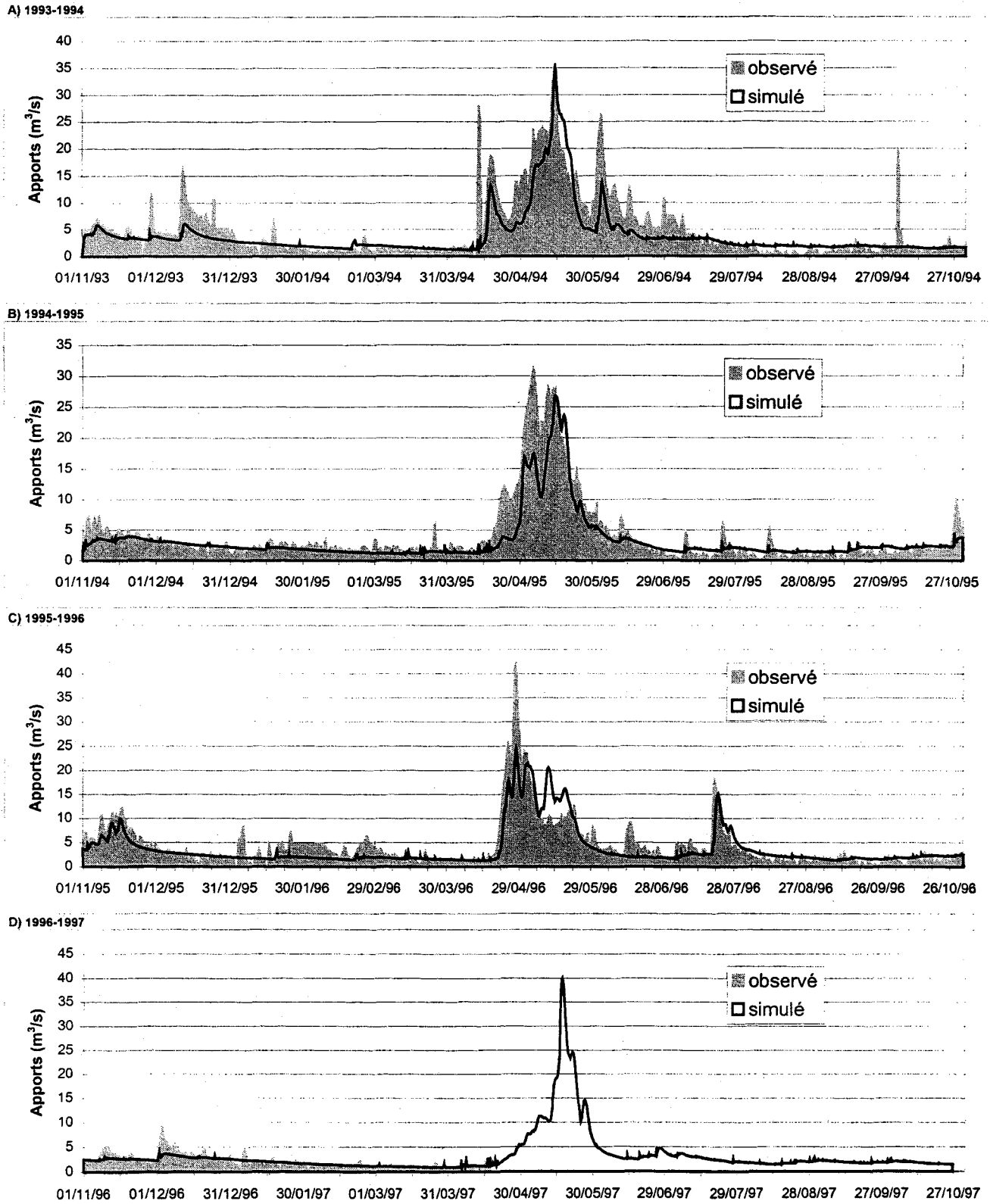


Figure 7.4 Comparaison entre les apports observés et simulés au lac Mistigouèche avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet et de Mistigouèche.

L'année hydrologique 1995-1996 est elle aussi caractérisée par un très grand nombre de données manquantes au lac Mitis pour la période de fonte de neige. Encore une fois, pour cette année hydrologique, la qualité de la simulation se contrôle mieux au lac Mistigouèche. Avec l'utilisation des données météorologiques de Ouimet, la crue principale est bien simulée. En fait, seule l'intensité de la pointe la plus élevée n'est pas exactement simulée. Par ailleurs, pour la fin du printemps, les volumes sont surévalués. Avec l'utilisation conjointe des stations de Ouimet et de Mistigouèche, nous notons sensiblement les mêmes effets qu'en 1994-1995. La première des trois pointes de la crue de printemps est nettement détériorée, alors que les débits simulés au cours de la seconde partie sont nettement plus faibles et par la suite correspondent mieux aux débits mesurés au cours de cette seconde partie. Il y a donc à nouveau un problème de représentativité des données météorologiques.

Pour la crue estivale de 1996, les résultats sont à toutes fins pratiques identiques que l'on utilise les deux stations météorologiques conjointement ou uniquement la station de Ouimet. Cette crue est la seule occasion d'étalonner le modèle pour des événements d'été majeurs. Or, il n'est pas évident de pouvoir se fier parfaitement aux apports observés. Compte tenu des oscillations dans les apports observés, il est difficile d'avoir une forte confiance dans un seul événement d'apports observés. En fait, une utilisation efficace des renseignements sur les apports observés nécessiterait un nombre important d'événements pour lesquels nous nous efforcerions d'assurer que le modèle colle bien en général. En effet, dans un pareil cas, nous pourrions par exemple supposer que dans certains cas l'effet des oscillations aurait tendance à diminuer artificiellement l'intensité des crues alors que pour les autres cas l'effet serait inversé. Or, nous ne pouvons compter que sur une seule observation de crue estivale. Ceci dit, il est à noter que la valeur simulée de cette crue est légèrement supérieure à la valeur observée au lac Mitis alors qu'à Mistigouèche, nous avons la situation inverse.

Finalement, pour l'année hydrologique 1996-1997, seules des apports observés au lac Mitis sont disponibles. La forme de la crue simulée semble tout à fait acceptable. Par ailleurs, il semble y

avoir une légère sous-estimation des volumes et, ce pour les deux réseaux de stations météorologiques utilisés.

Dans l'ensemble, on note donc qu'à partir de renseignements partiels, il a été possible d'étalonner le modèle de telle sorte qu'il puisse reproduire avec une précision intéressante le comportement du bassin. Par ailleurs, nous croyons que les paramètres issus de l'étalonnage permettent d'obtenir des résultats d'un niveau de qualité assez équivalent pour les deux configurations du réseau météorologique testé. En effet, pour certaines crues l'ajout de la station Mistigouèche est bénéfique alors que le contraire est vrai pour d'autres crues.

Le lecteur attentif notera peut-être la présence de très petites oscillations dans les apports simulés. Ces oscillations sont causées par des apports soudains d'eau aux lacs lors des événements pluvieux. Pour bien interpréter la signification de ces oscillations, il faut comprendre que, selon la configuration du modèle, toutes les eaux qui atteignent les lacs Mitis et Mistigouèche sont considérées comme étant des apports, que ce soit l'eau qui arrive par les affluents ou la précipitation qui s'abat directement sur les lacs. De plus, il n'y a aucun laminage lié à la propagation de l'onde d'apport à l'intérieur des lacs. Ainsi, chaque fois qu'il y a une pluie de moyenne envergure, toute l'eau qui s'abat directement sur le lac et, ce même si les précipitations sont insuffisantes pour produire du ruissellement de surface ailleurs sur le bassin, est considérée comme un apport. Or, comme les lacs occupent des superficies importantes par rapport à la taille de leurs sous-bassins respectifs, ces petits apports directs de pluie infligent de petites impulsions perceptibles dans l'hydrogramme de sortie. Ces petites impulsions sont impossibles à détecter dans les apports observés puisqu'elles se confondent avec le bruit et disparaissent au moment du filtrage. Il est à noter que les petites oscillations pré-citées n'ont aucune influence sur les crues majeures et, par le fait même, qu'elles ne brouilleront pas le calcul des crues maximales probables.

7.3 Étalonnage du sous-bassin Mitis intermédiaire

L'étalonnage d'Hydrotel sur le sous-bassin de Mitis intermédiaire a été réalisé après que l'étalonnage sur les sous-bassins des lacs Mitis et Mistigouèche ait été complété et que le calcul des crues maximales probables au lac Mitis ait été lui aussi achevé.

Les difficultés principales de ce second exercice d'étalonnage sont aussi principalement liées au réseau de stations météorologiques. En effet, au pas de temps de six heures, seules les données des stations situées dans la partie sud du bassin, les stations de Ouimet et de Mistigouèche, sont disponibles. Par ailleurs, la station de Mont-joli, qui est située dans la partie nord, a tendance à recevoir moins de précipitations que celles du sud. Ceci nous laisse croire qu'il y a une différence significative entre les quantités de précipitations reçues au nord et au sud du bassin. Ainsi, comme nous ne pouvons pas compter sur la station de Mont-joli au pas de temps de six heures, nous devons nous attendre à sur-évaluer les débits par l'utilisation exclusive des stations du sud du bassin.

La méthodologie d'étalonnage, que nous avons suivie, a consisté à procéder à un étalonnage préliminaire du modèle au pas de temps journalier en utilisant les stations de Mont-Joli, de Ouimet et de Mistigouèche. Les résultats de cet étalonnage préliminaire sont présentés à la figure 7.5. Les paramètres qui ont été utilisés pour l'obtention des résultats précités et de l'ensemble des résultats de l'étalonnage du sous-bassin Mitis intermédiaire sont présentés au tableau 7.3. Ainsi, on observe à la figure 7.5 que les volumes sont en général bien simulés. De même, il est intéressant de remarquer que les volumes des crues d'automne et d'été, quoique légèrement sous-évaluées, sont simulés de façon acceptables. Ces deux observations ont alimenté notre réflexion pour l'étalonnage au pas de temps de six heures.

La figure 7.6 sert aussi à alimenter la réflexion sur le passage des simulations journalières à des simulation aux six heures. Par l'intermédiaire de cette figure, qui présente les résultats d'une simulation au pas de temps journalier avec l'utilisation des stations de Ouimet et de

Mistigouèche uniquement et le même jeu de paramètres que précédemment, on peut saisir les effets de l'utilisation exclusive de ces stations.

Tableau 7.3 Valeurs des paramètres de calage pour le sous-bassin de Mitis intermédiaire.

Paramètres	Valeurs
Gradient vertical du facteur multiplicatif de la pluie	0 (1/100m)
Gradient vertical de la température	-0.5 (C/100m)
Température de passage de la pluie en neige	0 (C)
Facteurs de fonte (zones ouvertes, de feuillus et de résineux)	17 13 7 (mm j ⁻¹ C ⁻¹)
Seuils de fonte (zones ouvertes, de feuillus et de résineux)	-0.5 0.5 0.5 (C)
Taux de fonte	0.3 (mm j ⁻¹)
Coefficient de compaction	0.05 (j ⁻¹)
Facteur multiplicatif de l'évapotranspiration	1.2
Profondeurs des trois couches	0.1 0.3 1.5 (m)
Coefficient de récession	0.00001 (m.h ⁻¹)
Coefficients de frottement de manning en surface (zones forestières, ouvertes, d'eau)	0.35 0.15 0.05
Coefficients de frottement de manning en rivière	0.05

Ainsi, il est primordial de remarquer que le volume de la crue importante d'été, celle de 1996, de même que les volumes des autres crues d'été-automne, dans une moindre mesure, sont sur-évalués lorsque les données de Ouimet et de Mistigouèche ne sont pas pondérées par celles de Mont-Joli. À une échelle moindre, on note aussi une augmentation indésirable des volumes de crues simulés pour les printemps de 1994 et de 1996 lorsque seules Ouimet et Mistigouèche sont utilisées, signe qu'il reste possiblement trop de neige sur le bassin et donc que les stations de Ouimet et de Mistigouèche sur-évaluent, comme prévue, la précipitation dans la partie sud du bassin. Par ailleurs, la qualité des simulations des crues de printemps de 1995 et de 1997 est relativement semblable quelles que soit le réseau météorologique utilisé.

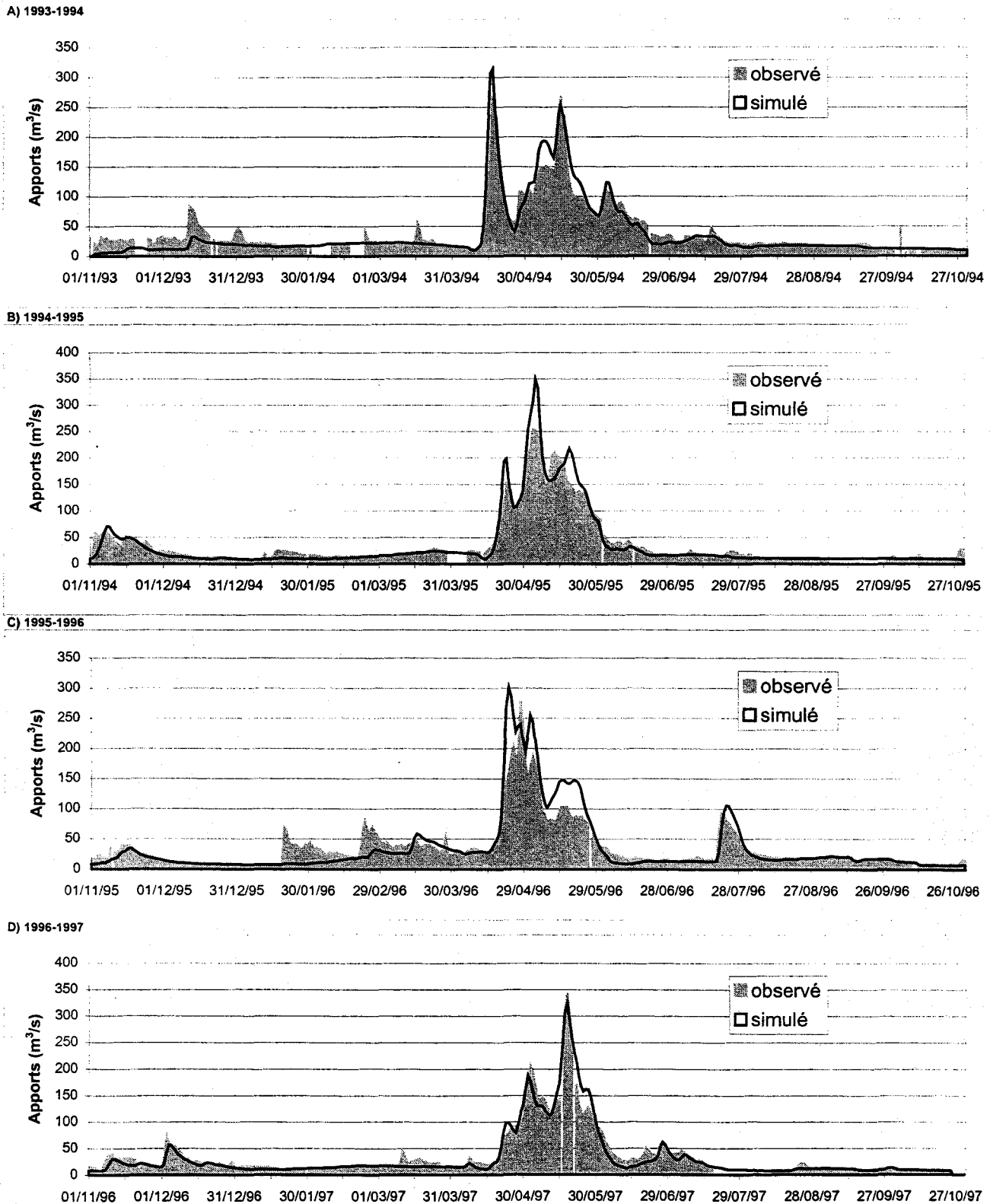


Figure 7.5 Comparaison entre les apports simulés et observés à Mitis 1 résultant de l'étalonnage préliminaire du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps journalier à l'aide des stations de Ouimet, de Mistigouèche et de Mont-Joli.

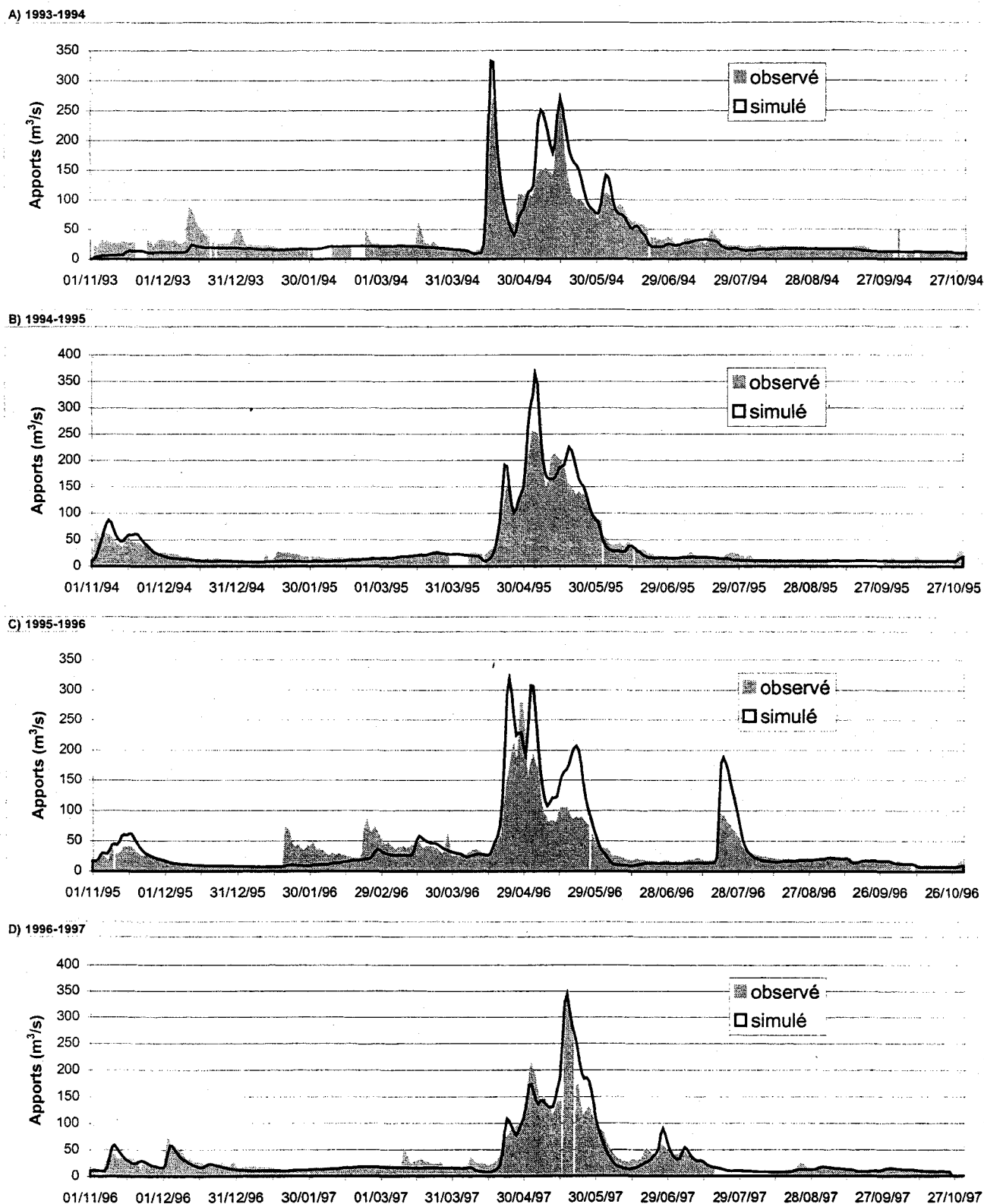


Figure 7.6 Comparaison entre les apports simulés et observés à Mitis 1 résultant de l'étalonnage préliminaire du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps journalier à l'aide des stations de Ouimet et de Mistigouèche.

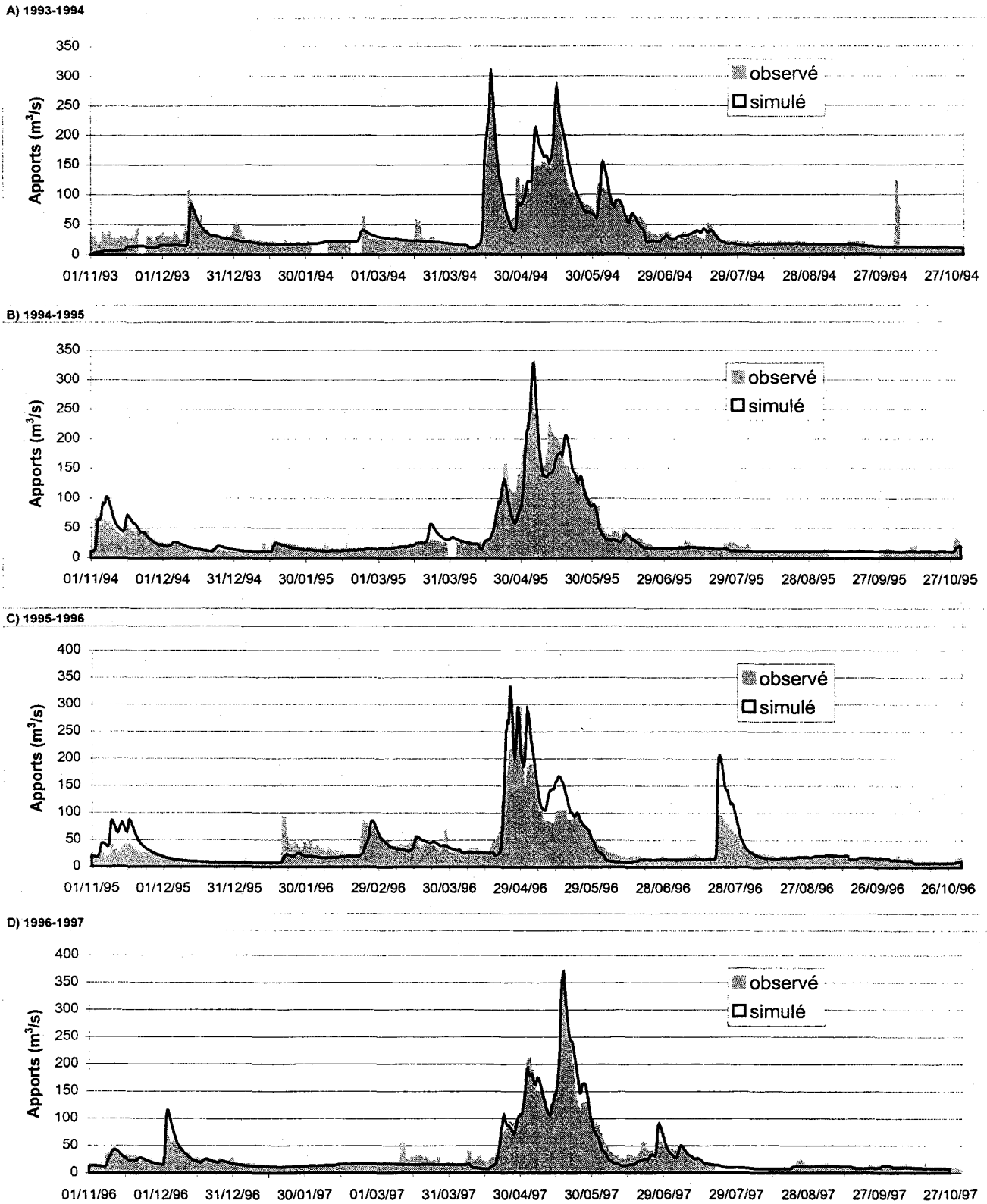


Figure 7.7 Comparaison entre les apports simulés et observés à Mitis 1 résultant de l'étalonnage du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps de six heures à l'aide des stations de Ouimet et de Mistigouèche.

Les résultats de l'étalonnage au pas de temps de six heures sont présentées à la figure 7.7. Comme les apports observés à Mitis 1 sont suffisamment nombreux et plutôt fiables, il a aussi été possible de compiler des statistiques sur la qualité de la simulation, statistiques qui sont présentées au tableau 7.4.

Tableau 7.4 Statistiques sur l'étalonnage de Mitis intermédiaire à la station de Mitis 1 pour les simulations au pas de temps de six heures.

Années hydrologiques	Coefficient de Nash-Suttcliffe	Volume observé (10 ⁹ m ³)	Volume simulé (10 ⁹ m ³)
1993-1994	0.85	1.17	1.19
1994-1995	0.92	1.05	1.05
1995-1996	0.63	1.09	1.25
1996-1997	0.93	1.03	1.03
1993-1997	0.85	4.34	4.53

L'analyse des résultats de la figure 7.7 et du tableau 7.4, nous amène dans la même direction de réflexion que celle proposée précédemment. Ainsi, il appert que le modèle reproduit plutôt bien la forme des événements de crues mais aussi qu'il sur-évalue les débits de certains de ces événements. C'est notamment le cas pour des crues tardives d'automne et pour la crue de l'été 1996. Compte tenu des résultats obtenus au pas de temps de 24h avec l'utilisation conjointe des stations de Ouimet, de Mistigouèche et de Mont-joli et de ceux obtenus à l'aide de Ouimet et de Mistigouèche seulement, il semble logique de croire que cette sur-évaluation des volumes est causées par la sur-évaluation des précipitations qu'amène l'utilisation exclusive des stations de Ouimet et de Mistigouèche au pas de temps de 6 heures. Les écarts entre apports simulés et observés trouvent donc, en grande partie, leur explication dans la non-représentativité des stations météorologiques utilisées plutôt que dans un étalonnage déficient du modèle.

Par ailleurs, il est intéressant de remarquer que le passage du pas de temps journalier au pas de temps de six heures entraîne une accélération dans la fonte de neige, tous autres paramètres restant

inchangés. En effet, au pas de temps de six heures, les températures moyennes par pas de temps à l'intérieur d'une journée donnée peuvent être plus élevées que la température moyenne sur vingt-quatre heures de la même journée. Les simulations au pas de six heures sont donc potentiellement plus sensibles aux hausses de températures qui mènent aux crues de printemps. Ainsi, on remarque entre autres que les petits épisodes de fonte observés à l'hiver 1996 sont présents lors des simulations à intervalle de six heures alors qu'il y a peu de réaction du modèle pour les simulations journalières. L'utilisation de simulations aux six heures contribue donc à améliorer la qualité de la réponse du modèle en période de fonte.

Finalement, il faut noter aussi qu'une partie des imprécisions sur les apports simulés à Mitis 1 peut provenir de l'imprécision sur les données d'évacuation aux ouvrages des lacs Mitis et Mistigouèche. En effet, comme les évacuations historiques à ces deux ouvrages sont utilisées directement comme conditions aux limites pour les simulations sur le sous-bassin Mitis intermédiaire, les imprécisions sur ces évacuations influencent directement la qualité des simulations d'apport à Mitis 1.

Tel que mentionné à la section 6.2, une station hydrométrique, celle de la rivière Neigette, permet de jauger les apports d'une partie du sous-bassin de Mitis intermédiaire et, qui plus est, cette partie du sous-bassin n'est pas affectée par des ouvrages hydrauliques. Les apports mesurés à cette station ont donc servi à la vérification spatiale de l'étalonnage du modèle sur le sous-bassin de Mitis intermédiaire. Les figures 7.8 à 7.10 présentent les apports simulés et observés au tronçon où se situe la station de la rivière Neigette pour les mêmes trois cas que ceux étudiés à Mitis 1, soit une simulation journalière utilisant les stations de Ouimet, de Mistigouèche et de Mont-Joli (figure 7.8), une seconde simulation journalière utilisant cette fois uniquement les stations de Ouimet et de Mistigouèche (figure 7.9) et une simulation aux six heures n'utilisant aussi que les stations de Ouimet et de Mistigouèche (figure 7.10).

La figure 7.8 met en évidence que la qualité des résultats à la Neigette est tout à fait comparable à la qualité des résultats à Mitis 1, lorsque la station de Mont-Joli fait partie de l'ensemble des stations utilisées. Les différences entre les apports simulés et observés s'expliquent de la même façon et elles ont environ les mêmes amplitudes qu'elles soient analysées à Mitis 1 ou à la Neigette. Par ailleurs, il est évident que toutes proportions gardées, les résultats à la Neigette sont plus affectés par l'exclusion de la station de Mont-Joli du réseau météorologique que le sont les résultats à Mitis 1 (voir figures 7.9 et 7.10). En effet, une partie importante des apports à Mitis 1 provient de régions pour lesquelles les stations de Ouimet et de Mistigouèche sont représentatives, ce qui n'est pas le cas pour les apports à la Neigette. De plus, une autre partie importante des apports à Mitis 1 provient des évacuations historiques aux lacs amonts et n'est donc pas affectée par le changement de réseau météorologique. Il demeure que, malgré ces nuances, les résultats de simulations à la Neigette sont excellents et sont de bons indices de validité spatiale du modèle.

Les figures 7.11 et 7.12 présentent la comparaison entre les équivalents en eau de la neige au sol observés et simulés. Il faut noter que les valeurs observées sont celles qui ont été obtenues pour les milieux de feuillus et que les simulations ont été faites au pas de temps de six heures en utilisant les stations météorologiques de Ouimet et de Mistigouèche. Il faut noter aussi que la localisation ou des stations nivométriques, utilisées pour la comparaison est présentée à la section 6.3.

Autrement, la comparaison entre les équivalents en eau observés et simulés à Mitis-Price met en évidence une sur-évaluation plus systématique de la neige au sol simulée. Il faut bien comprendre que la station de Mitis-Price est située à proximitier du fleuve et que les écarts entre les équivalents en eau observés et simulés dans ce secteur ne sont probablement pas symptomatiques de ce qui se passe ailleurs sur le bassin.

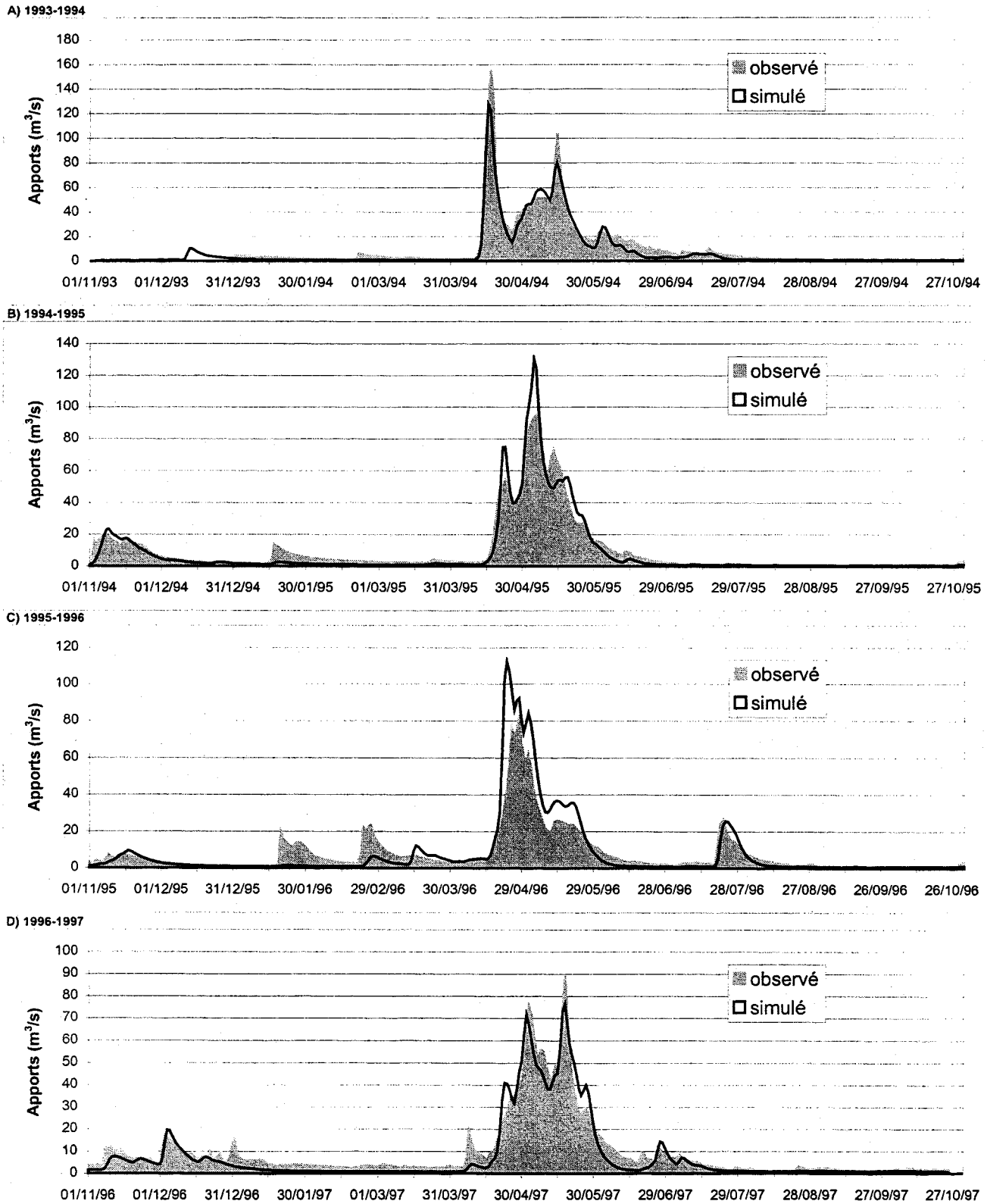


Figure 7.8 Comparaison entre les apports simulés et observés à la Neigette résultant de l'étalonnage préliminaire du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps journalier à l'aide des stations de Ouimet, de Mistigouèche et de Mont-Joli.

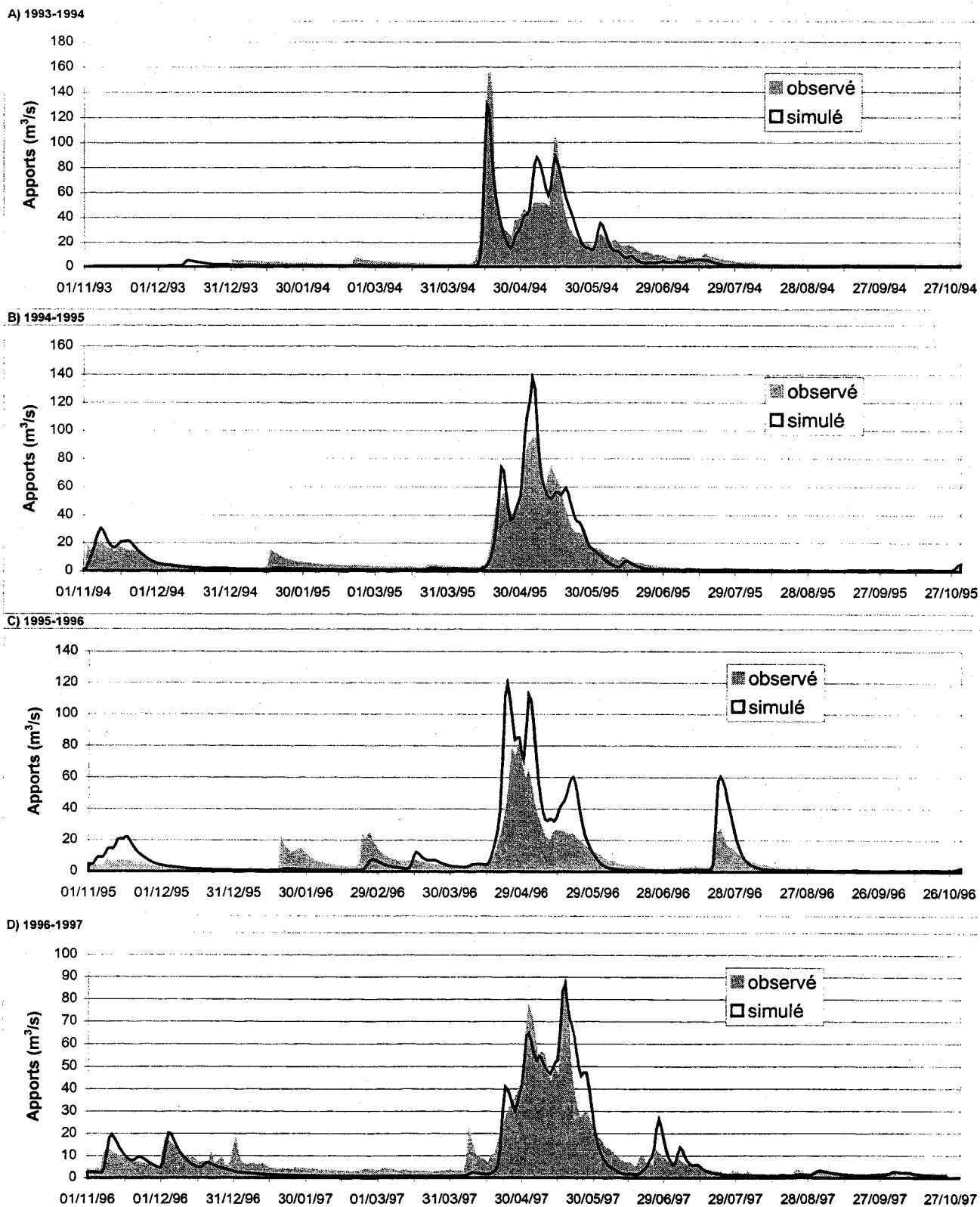


Figure 7.9 Comparaison entre les apports simulés et observés à la Neigette résultant de l'étalonnage préliminaire du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps journalier à l'aide des stations de Ouimet et de Mistigouèche.

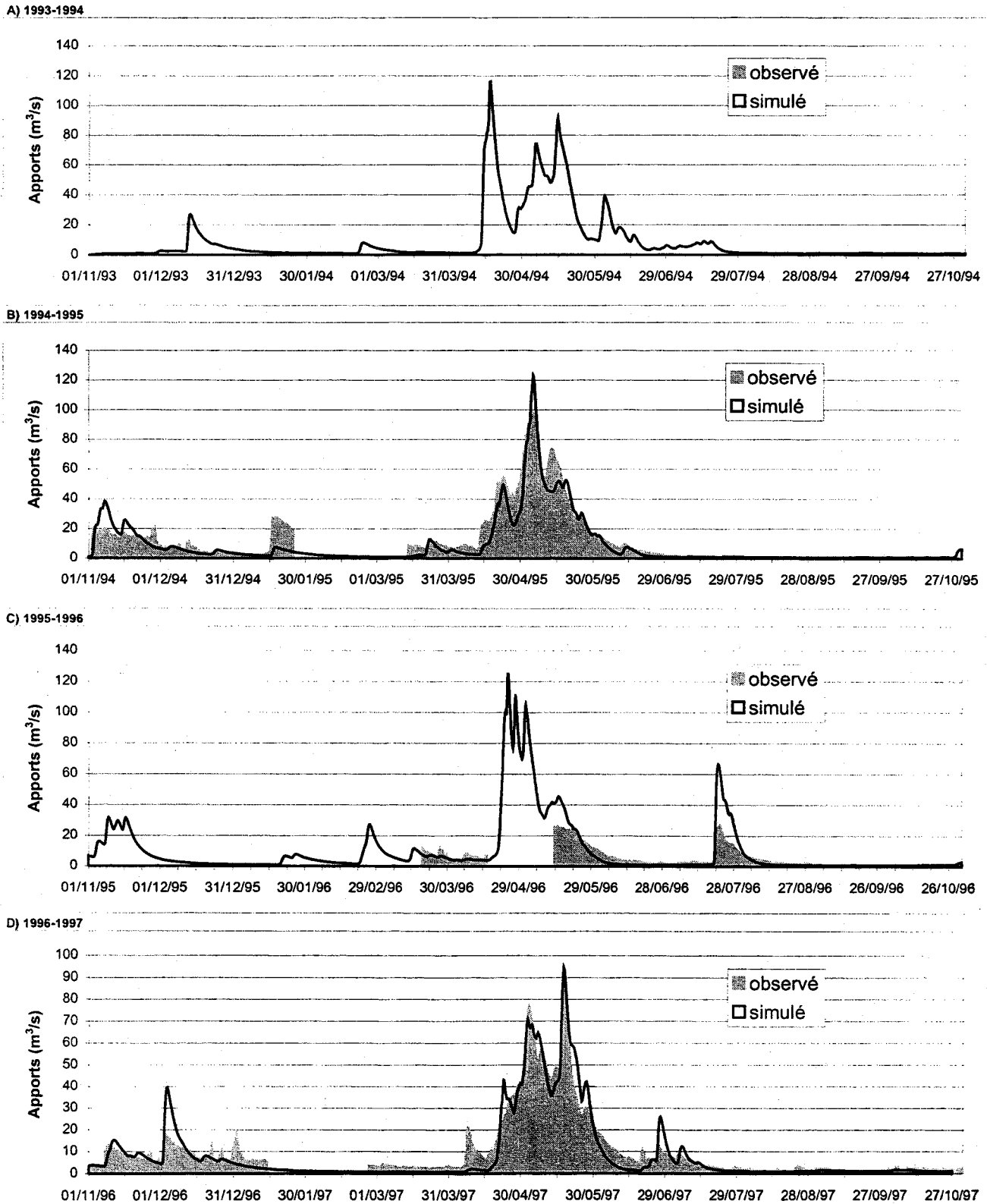


Figure 7.10 Comparaison entre les apports simulés et observés à la Neigette résultant de l'étalonnage du modèle sur le bassin de Mitis intermédiaire effectué au pas de temps de six heures à l'aide des stations de Ouimet et de Mistigouèche.

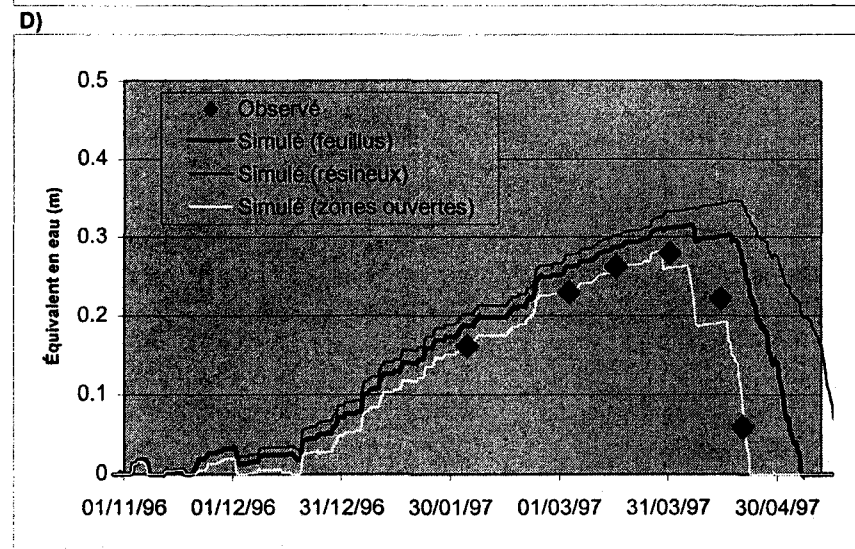
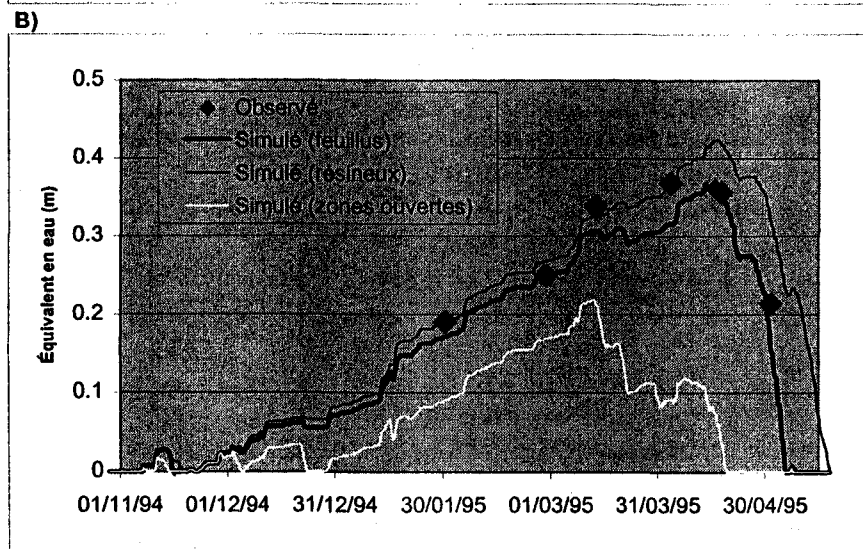
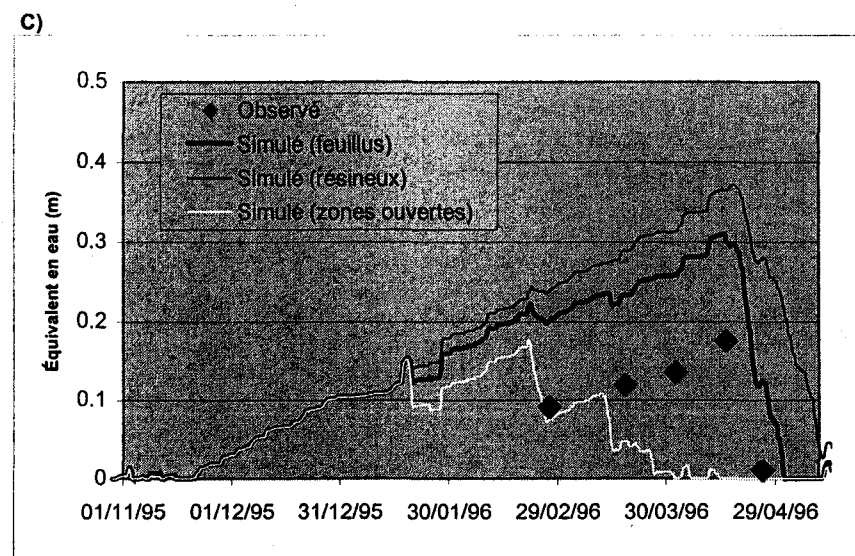
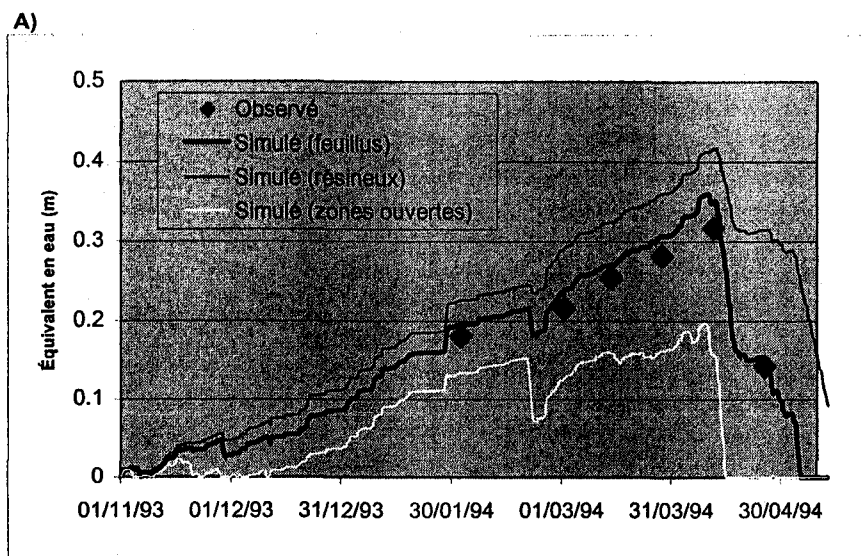


Figure 7.11 Comparaison entre les équivalents en eau de la neige au sol observés à la station nivométrique de Saint-Moïse et simulés à un pas de temps de six heures sur le sous-bassin versant de calcul qui inclut la station de Saint-Moïse.

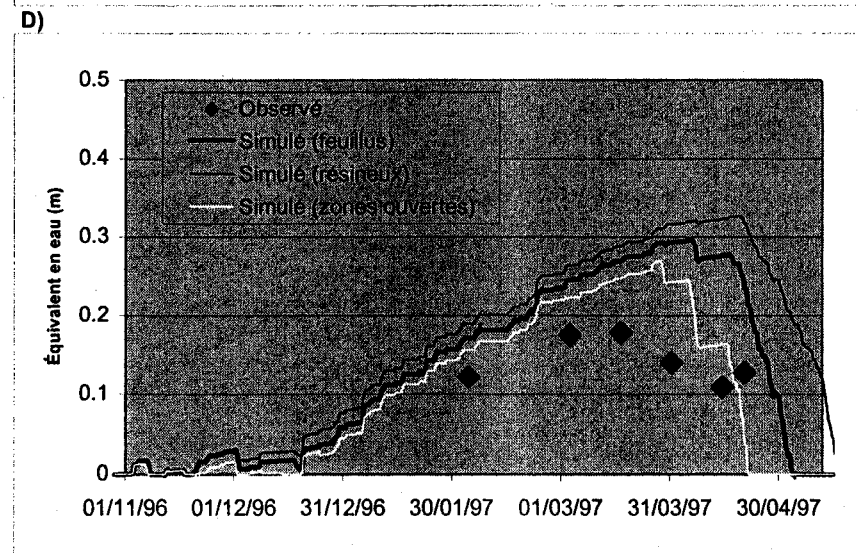
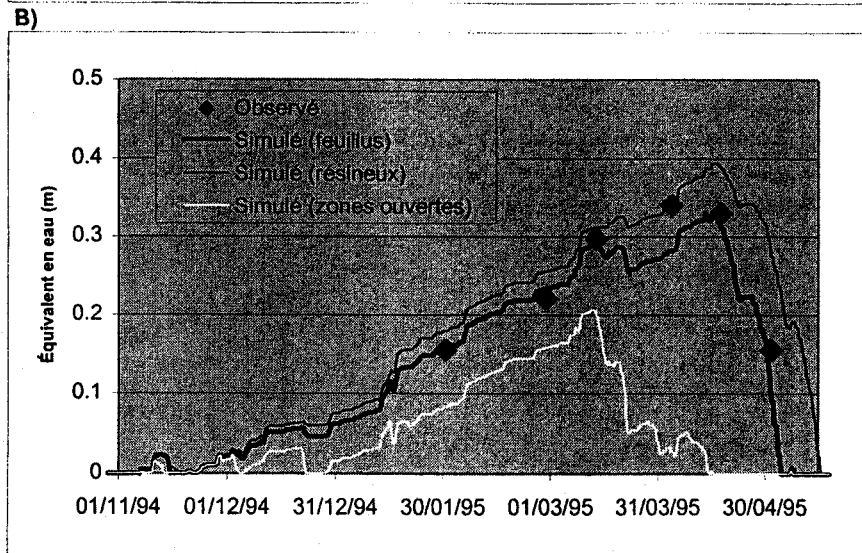
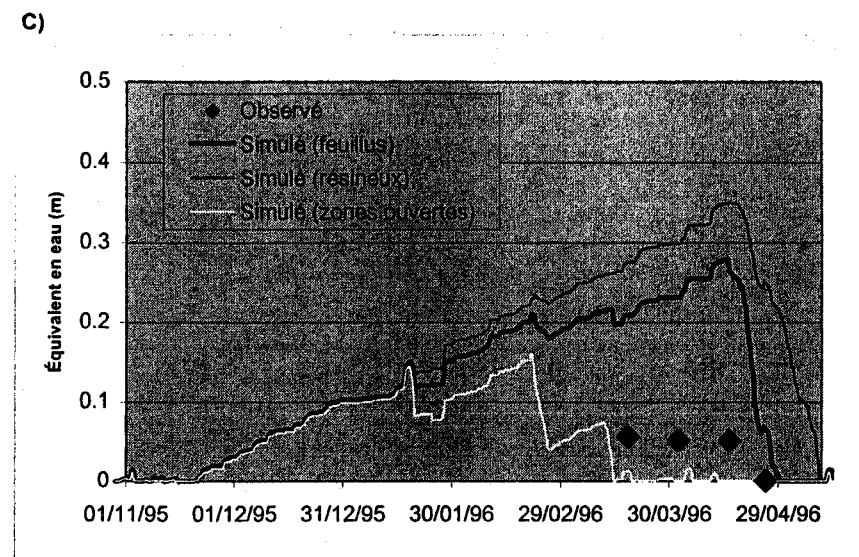
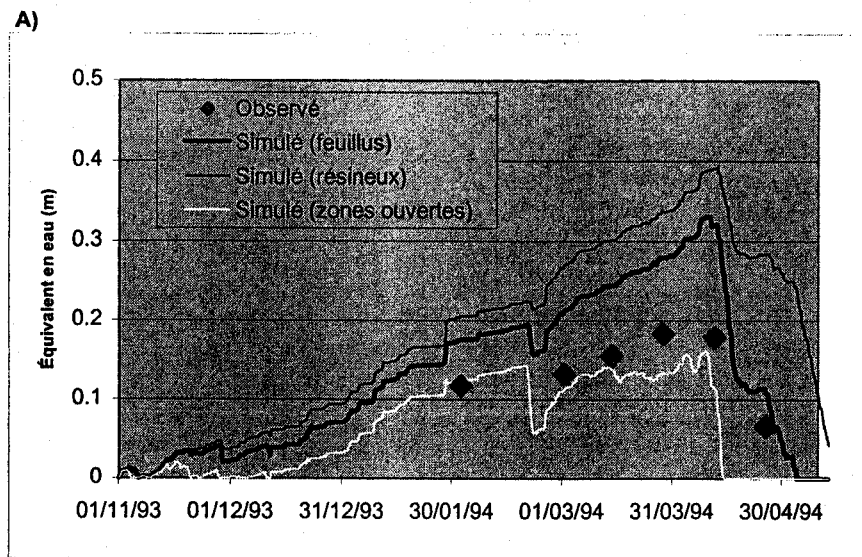


Figure 7.12 Comparaison entre les équivalents en eau de la neige au sol observés à la station nivométrique de Mitis-Price et simulés à un pas de temps de six heures sur le sous-bassin versant de calcul qui inclut la station de Mitis-Price.

7.4 Différences entre les deux étalonnages

On note quelques différences entre les paramètres utilisés pour l'étalonnage sur les sous-bassins des deux lacs en amonts (tableau 7.2) et pour celui de Mitis intermédiaire (tableau 7.3).

En premier lieu, le coefficient de récession utilisé pour les deux lacs amonts est beaucoup plus élevé que pour Mitis intermédiaire. Cette différence est nécessaire car le débit de base pour les deux sous-bassins amonts est beaucoup plus élevé que celui de Mitis intermédiaire, quand on considère ces débits relativement à la surface des sous-bassins. Physiquement, nous croyons que cette différence peut provenir d'une quantité importante de fractures dans le roc sous-jacent aux sous-bassins amonts. Ces fractures nombreuses favoriseraient un écoulement souterrain important et, à la rigueur, pourrait même alimenter le réseau hydrographique avec de l'eau souterraine puisée à l'extérieur du bassin hydrographique de surface. Cette hypothèse, que nous n'avons malheureusement pas pu vérifier, a été jugée plausible par l'équipe d'Hydro-Québec.

Une autre des différences entre les paramètres résultant des deux étalonnages existe au niveau des profondeurs des sols. En effet, la profondeur des sols dans la partie sud du bassin a été estimée à 70 cm alors qu'elle a été estimée à 150 cm dans la partie nord. Cette différence s'appuie sur l'interprétation des cartes des dépôts meubles qui indiquent la présence de nombreux dépôts de moins de 1 mètre dans la partie sud du bassin et, inversement, de plus de 1 mètre dans la partie nord du bassin.

On remarque aussi une différence dans le facteur d'amplification de la pluie avec l'altitude. Comme la partie nord du bassin est relativement plate, il n'a pas été nécessaire d'y utiliser un tel facteur alors que dans la partie sud, plus pentue, l'utilisation d'un facteur d'amplification a permis de mieux évaluer les volumes de ruissellement.

Finalement, des différences apparaissent dans les facteurs de fonte retenues pour les deux étalonnages. Ces différences peuvent provenir de la variabilité dans la densité du couvert végétal entre les parties nord et sud du bassin et dans l'incertitude liée à l'estimation de l'albédo de la neige au sol.

8 CONCLUSION

L'utilisation du modèle Hydrotel sur le bassin de la rivière Mitis a conduit à l'obtention de résultats auxquels s'attache un niveau de confiance élevé. En effet, malgré les problèmes de représentativité des données météorologiques et le manque de données hydrométriques importantes, il a été possible de définir une méthodologie d'étalonnage solide. Les résultats obtenus à partir des paramètres découlant de l'étalonnage se sont avérés tout à fait satisfaisants. Autrement, une étape de révision de l'étalonnage en fonctions de nouvelles données disponibles est prévue d'ici la fin de l'an 2000.

Par ailleurs, avec l'ajustement du sous-modèle de simulation de l'effet des barrages sur l'écoulement, le modèle Hydrotel s'est montré capable de répondre à l'ensemble des besoins formulés par Hydro-Québec quant à la simulation et au laminage de divers scénarios de crues.



RÉFÉRENCES

Fortin, J.P., Moussa, R., Bocquillon, C., et J.P. Villeneuve (1995). HYDROTEL, un modèle hydrologique distribué pouvant bénéficier des données fournies par la télédétection et les systèmes d'information géographique. *Rev. sci. eau*, 8: 97-124.

Fortin, J.P., Turcotte R., Massicotte S., Moussa R., et J. Fitzback (1999). A Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data, *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineering, accepté pour publication en janvier 1999.

Rawls, W.J., et D.L. Brakensiek (1989). Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties. *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*. (Morel-Seytoux Ed.). NATO ASI series. Series C : Mathematical and Physical Sciences- Vol. 275. Kluwer Academic Publishers, pp. 275-300.

Rousseau, A.N., Mailhot, A., Turcotte, R., Duchemin, M., Blanchette, C., Roux, M., Etong, N., Dupont, J., et J.P. Villeneuve (1998). GIBSI - an integrated modelling system for sustainable river basin management, dans *Assessing the Ecological Integrity of Running Waters International Conference*. Vienne, Autriche, 9-11 nov. 1998.

Savoie, C., et C. Desmarais (1999). Rapport technique sur la classification des images Landsat Thematic Mapper utilisées lors de la production des cartes d'utilisation du sol pour les MRC du Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 20 p.

Turcotte R., Fortin, J.P., Massicotte S., Fitzback J. and A.N. Rousseau (1999a). Determination of watershed drainage structure using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, soumis en juin 1999.

Turcotte, R., Rousseau, A.N., Mailhot, A., Villeneuve, J.P., et J. Dupont (1999b). GIBSI - an

Integrated Modelling System for Sustainable Watershed Management, dans Air and Waste Management Association's/ Environmental Protection Agency permitting Symposium, Pittsburgh, Pa.

Villeneuve, J.P., Blanchette, C., Duchemin, M., Gagnon, J.F., Mailhot, A., Rousseau, A.N., Roux, M., Tremblay, J.F., et R. Turcotte (1998). Rapport final du projet GIBSI, mars 1998. Rapport No. R-462. INRS-Eau, Sainte-Foy, Québec.

ANNEXE

Liste des documents électroniques joints.

Contenu	Nom du fichier
Scénarios de crues maximales probables	CMP.xls
Laminages de la PMP d'été-automne	PMP-E.xls
Laminages de la PMP-N100 de printemps	PMP-P-N100.xls
Laminages de la P100-NMP de printemps	P100-P-NMP.xls